

Дослідження екологічної безпеки транспортних потоків

Олена Бакуліч

*Національний транспортний університет
м. Київ, Україна*

I. СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

З кожним роком стають все більш актуальними питання, спрямовані на посилення забезпечення екологічної безпеки.

Екологічна безпека - стан захищеності біосфери та суспільства, а на державному рівні - держави від загроз, що виникають в результаті антропогенних і природних впливів на довкілля. У поняття екологічної безпеки входить система регулювання та управління, що дозволяє прогнозувати і не допускати, у разі виникнення, розвитку надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека реалізується на глобальному, регіональному та локальному рівнях. Глобальний рівень управління екологічною безпекою припускає прогнозування і відстежування процесів в стані біосфери в цілому та її складових. Нині ці процеси відображаються в глобальних змінах клімату, виникненні "парникового ефекту", руйнуванні озонового шару, запустинюванні планети і забрудненні світового океану. Управління глобальною екологічною безпекою є прерогативою міждержавних відносин на рівні ООН, ЮНЕСКО, ЮНЕП та інших міжнародних організацій. Регіональний рівень охоплює великі географічні або економічні зони, а іноді території декількох держав. Контроль і управління здійснюються на рівні урядів держав і міждержавних зв'язків. Локальний рівень включає міста, райони, підприємства, транспортну мережу, а також контроль викидів, стоків та ін. Управління екологічною безпекою здійснюється на рівні адміністрації окремих міст, районів, підприємств (компаній, фірм) із

залученням відповідних служб, відповідальних за санітарний стан і природоохоронну діяльність.

Найбільш гостро проблема збереження екологічної безпеки та охорони навколишнього середовища відчувається на локальному рівні, а саме на рівні міста, де існує щільна мережа промислових, торговельних, культурних центрів, а отже, росте кількість перевезень та подорожей на транспорті. Отже, інтенсивні транспортні потоки міст, що рухаються на щільній вулично-дорожній мережі, обмеженій історично сформованою забудовою (особливо в центрі міст), є найбільш небезпечним та масовим джерелом забруднення на локальному рівні.

Забезпечення екологічної безпеки – це комплексна проблема для вирішення якої необхідно застосовувати системний підхід. Цей підхід заснований на впровадженні у практику сучасних методів управління рухом транспортних потоків, розробці ефективного застосування нормативних, інформаційних, технічних та експертних технологій. Система забезпечення екологічної безпеки дорожнього руху уявляє собою складну сукупність функціональних елементів дорожньо-транспортного комплексу, до складу якого належать суб'єкти транспортної, дорожньої, соціальної та муніципальної діяльності. Елементами системи екологічної безпеки є учасники дорожнього руху, транспортні засоби, вулично-дорожня мережа із інженерно-технічним обладнанням та технічні засоби організації дорожнього руху (Рис.1). Вирішення проблем, пов'язаних із екологічною безпекою руху транспортних потоків залежить від якості функціонування її елементів на всіх етапах розробки (проектуванні), експлуатації, а також від методів управління, які засновуються на результатах наукових досліджень у даній галузі.

Управління системою екологічної безпеки транспортних потоків ускладнюється тим, що механізм впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище має ряд специфічних особливостей у порівнянні з іншими джерелами забруднення.

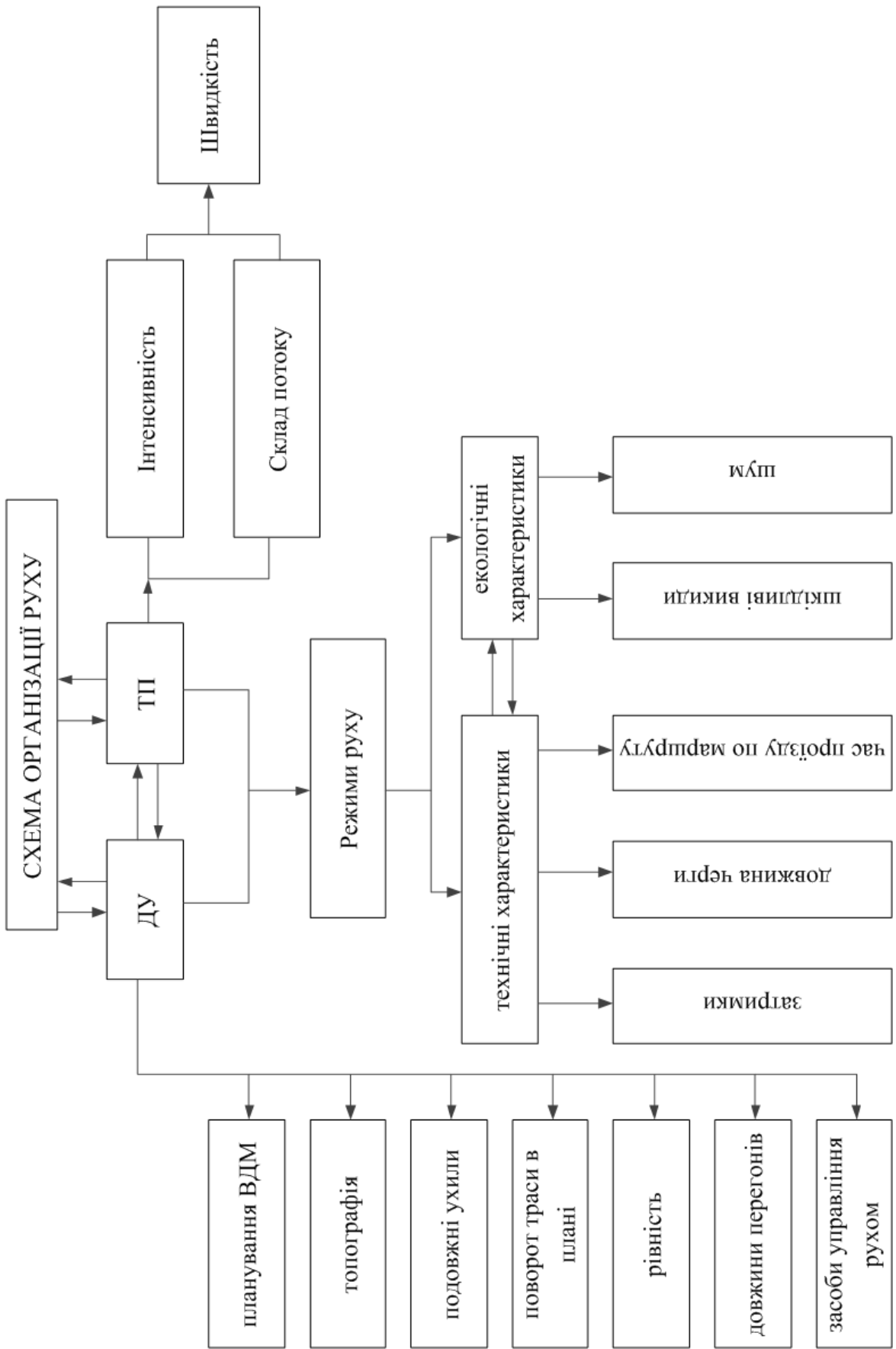


Рисунок 1 – Структурна схема стану системи «ДУ – ТП»

Це масовість та постійно зростаючі темпи процесу автомобілізації; широкий спектр негативних явищ, що супроводжують процес автомобілізації; низькі питомі показники екологічної безпеки транспортних засобів на одиницю виконаної транспортної роботи; складність значного поліпшення показників екологічної безпеки в найближчій перспективі; концентрація великої кількості транспортних засобів на обмеженій території та їх масове проникання в зони житлової забудови; відставання темпів розвитку вулично-дорожньої мережі міст від темпів автомобілізації.

Таким чином, на рівень екологічної безпеки впливають умови руху, що залежать від дорожніх умов, параметрів транспортного потоку, режимів руху транспортного потоку та погодні умови [7].

Погодні умови – це сукупність метеорологічних умов у даний момент часу, яка характеризується факторами, за якими проводиться постійне спостереження. Це – опади, хуртовина, туман, ожеледь, вітер, температура та вологість повітря. Зміна цих факторів носить випадковий характер та пов'язана із природно-кліматичними умовами регіону та надає невизначеність функціонуванню об'єкту управління – дорожньому руху.

Режим руху визначається швидкістю руху транспортного потоку, складом транспортного потоку, щільністю транспортного потоку, можливістю реалізації обгонів та інших маневрів на дорозі, тобто рівнем завантаження дороги рухом. Параметри режиму руху є найважливішою характеристикою функціонування системи управління дорожнім рухом та визначає його ефективність та якість.

Дорожні умови є складовою систем управління дорожнім рухом. Дорожні умови – це сукупність геометричних параметрів та транспортно-експлуатаційних якостей дороги, які мають відношення до руху. Всю сукупність параметрів можливо розподілити на дві групи – постійні та змінні. До постійних відносяться параметри та характеристики доріг, які не змінюються у часі протягом експлуатації, або змінюються дуже рідко (під час реконструкції або ремонту). До таких параметрів належать параметри повздовжнього

профілю, радіуси кривих у плані, довжина прямих ділянок дороги тощо. До змінних параметрів належать параметри та характеристики доріг, які змінюються протягом року під впливом сезонних коливань метеорологічних умов та якості утримання дороги. До них відносяться – стан покриття та узбіччя, наявність з'їздів та перетинів, видимість в плані, наявність технічних засобів регулювання. Основними геометричними характеристиками дороги, є: подовжній і поперечний профіль дороги, частота поворотів і радіуси кривизни в плані, ширина трас, довжина їх прямих і криволінійних ділянок.

II. ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ, ЯК ДЖЕРЕЛА ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Об'єктом управління в системі управління дорожнім рухом є транспортний потік, що складається з різних транспортних засобів. Під час руху водії автомобілів мають вільний вибір і реалізують при русі свої приватні цілі. Таким чином, дорожній рух є техносоціальною системою, що і визначає його специфіку як об'єкту управління. Тому навіть розглядаючи тільки технічні аспекти управління дорожнім рухом, ми повинні постійно мати на увазі, що цей об'єкт складний і має специфічні, з точки зору управління, властивості.

Першою особливістю транспортних потоків є їх нестаціонарність, причому спостерігаються коливання їх характеристик принаймні в трьох циклах: добовому, тижневому і сезонному.

Другою особливістю є стохастичність транспортних потоків, параметри яких допускають визначати прогноз тільки з певною мірою вірогідності. Зупиняючись на цьому моменті детальніше, відмітимо, що транспортний потік в першому наближенні поводить себе як традиційний технічний об'єкт і описується параметрами, що і потік рідини або газу: швидкістю, щільністю, інтенсивністю і складом потоку, зв'язки між якими досить добре досліджені і описані як за допомогою диференціальних рівнянь, так і іншими методами.

Транспортний потік рухається по транспортній мережі, що у свою чергу має певні параметри, що допускають більш менш суворий опис. Як правило, досить просто описується топологія транспортної мережі, довжини і пропускні здібності її ділянок, складніше - стан покриття, який залежить від зовнішнього середовища. Характеристики транспортної мережі теж є нестаціонарними. Стан покриття залежить від погодних умов, топологія мережі - від містобудівних заходів і просто від проведення дорожніх робіт. Природно, транспортна мережа впливає на характеристики транспортних потоків, вносячи додатковий елемент нестаціонарності. Крім того, на транспортні потоки можуть впливати різноманітні випадкові події: дорожньо-транспортні події, вихід пішоходів на проїжджу частину тощо.

Третьою особливістю руху транспортного потоку як об'єкту управління є неповна керованість, суть якої полягає в тому, що навіть за наявності у системи управління повної інформації про транспортні потоки і можливість доведення управляючих дій до кожного водія, ці дії у ряді випадків можуть носити тільки рекомендаційний характер. Ця особливість робить дуже проблемним досягнення глобального екстремуму будь-якого критерію управління.

Четвертою особливістю, що відноситься вже не лише до дорожнього руху але і до системи управління – є множинність критеріїв ефективності та якості управління. Рух транспортного потоку в районі або місті, керований певним чином, має деякі характеристики, серед яких можуть бути названі: транспортна робота, часові затримки руху, швидкість сполучення, кількість дорожньо-транспортних подій, об'єм шкідливих викидів в атмосферу тощо.

П'ятою особливістю дорожнього руху як об'єкту управління є складність і навіть неможливість виміру практично усіх характеристик ефективності управління [8].

З останніх двох особливостей дорожнього руху як об'єкту управління витікає, зокрема, необхідність створення моделей дорожнього руху, що дозволяють прогнозувати наслідки змін

параметрів, які впливають на характеристики транспортних потоків та екологічний стан навколишнього середовища.

Отже, при вирішенні екологічних задач у транспортній системі, транспортний потік розглядається, як самостійний об'єкт управління. Звернення до транспортного потоку, як до самостійного об'єкту управління пояснюється рядом причин:

- насамперед це можливість на єдиній методологічній основі розглядати ефективність заходів по зниженню різних по фізичній суттєвості та характеру впливу на людину шкідливих екологічних факторів;

- на рівні транспортного потоку формуються різноманітні критерії ефективності. Всі існуючі на даний момент критерії оцінки ефективності функціонування схем організації дорожнього руху можна класифікувати на групи: транспортно-експлуатаційні (оцінка можливості проїзду, оцінка стану покриття), техніко-економічні (затримка та витрати пов'язані з нею, число зупинок і т.д.), соціальні (критерії безпеки та надійності, комфортності та зручності руху) та екологічні критерії;

- дані про екологічні характеристики транспортного потоку є вихідними для застосування комплексу різноманітних методів охорони навколишнього середовища;

- транспортний потік може розглядатися як самостійний об'єкт управління, його екологічна безпека визначається комплексом законодавчих, організаційних, технічних, економічних заходів, що забезпечують мінімальний сумарний вплив транспортних засобів на навколишнє середовище.

Підхід до визначення транспортного потоку, як джерела забруднення, заснований на тому, що його вплив на навколишнє середовище розглядається, як сумарний вплив окремих автомобілів.

Екологічна безпека окремого автомобіля визначається наступними факторами: конструкцією автомобіля, його технічним станом, підготовкою водія, дорожніми умовами, станом потоку та режимом руху, схемою організації дорожнього руху.

В наш час існує низка методів для визначенню екологічних характеристик транспортного потоку (рис.2).

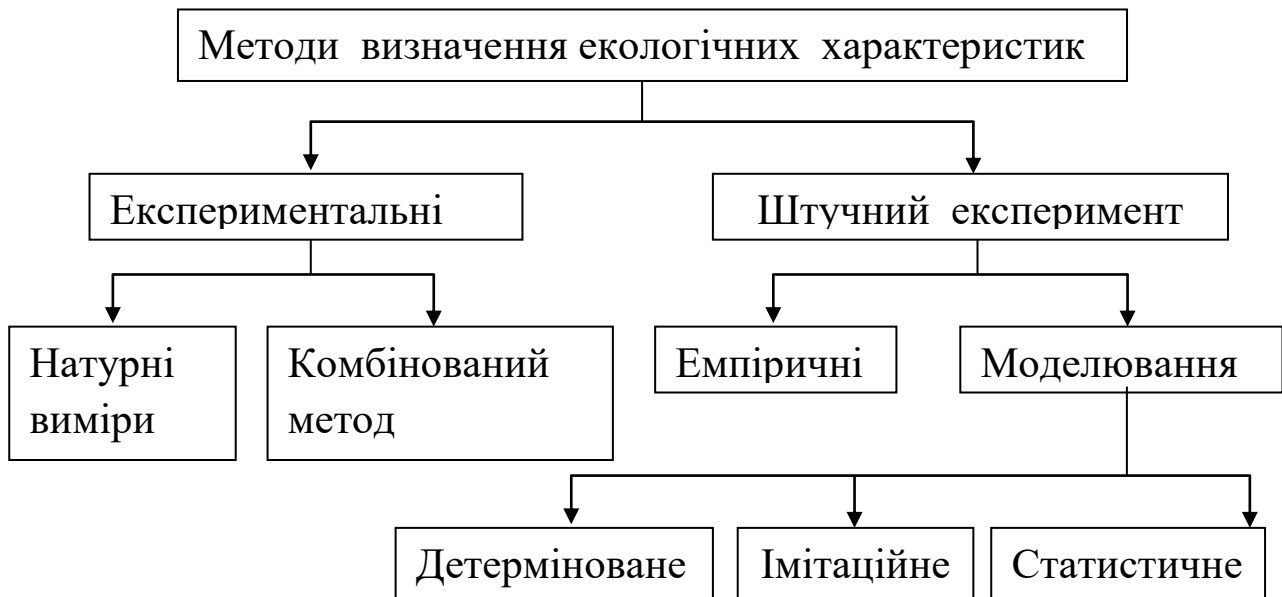


Рисунок 2 – Методи визначення екологічних характеристик

Найбільш потужним інструментом дослідження екологічної безпеки дорожнього руху є моделювання забруднення навколишнього середовища на основі теорії транспортних потоків.

Розглянувши транспортний потік як основне джерело забруднення навколишнього середовища можна зробити висновок, що при оцінці варіантів схем організації дорожнього руху за рівнем екологічної безпеки основними критеріями є такі екологічні характеристики, як шкідливі викиди окису вуглецю (CO), вуглеводнів (C_nH_m), окисів азоту (NO_x) та транспортний шум. Вибір саме цих екологічних характеристик для розгляду зумовлений наступним: за впливом на навколишнє середовище та організм людини вони відносяться до найбільшого класу небезпеки; можливість їх зниження методами організації дорожнього руху.

III. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РУХУ АВТОМОБІЛІВ У ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ

Важливим показником, що відображає фактичні умови руху транспортного потоку, є час проїзду автомобілями ділянки міської магістралі (швидкість сполучення). Враховуючи циклічний характер руху автомобілів у містах, середній час проїзду можна розглядати у вигляді суми складових, що становлять середній час роботи автомобіля у різних режимах: розгін, гальмування, усталений рух, холостий хід. Від співвідношення цих складових залежить багато показників екологічної безпеки автомобілів. Розглянемо кожний з режимів.

У процесі розгону автомобіля кількість відпрацьованих газів та споживання палива визначаються: режимом роботи двигуна; характером його зміни; токсичними та економічними характеристиками двигуна.

У розрахунках при визначенні характеристик розгону зазвичай розглядається рівноприскорений рух автомобіля з постійним прискоренням a , яке приймається для легкових автомобілів від 0,9 до 1,5 м/с² для вантажних від 0,7 до 1,0 м/с². Але значення прискорення при розгоні автомобіля не є постійним, а весь час знижується при збільшенні швидкості і переході на більш високу передачу.

Внаслідок аналізу характеристик розгону автомобілів отримана залежність прискорення - швидкість:

$$j_p = \frac{dv}{dt} (a + b \cdot v)^{-1}, \quad (1)$$

де j_p - прискорення автомобіля, м/с²; v - швидкість автомобіля, м/с; a, b - постійні, що мають розмірність, a - с²/м; b - с³/м².

Оскільки при $v = 0$ відношення $\frac{dv}{dt} = a^{-1}$, то ця постійна має значення, зворотне максимальному прискоренню в момент початку розгону.

Враховуючи, що при $t = 0, v = 0$, можна записати час розгону автомобіля як функцію від швидкості v :

$$dt = \frac{dv}{(a + bv)^{-1}} = (a + bv)dv$$

$$t_p = \int_0^t t = \int_0^v (a + bv)dv \quad (2)$$

$$t_p = av + 0,5 \cdot bv^2$$

Шлях, який проходить транспортний засіб при розгоні (змінної швидкості) з моменту початку розгону до моменту досягнення швидкості v :

$$S_p = \int_{v_1}^{v_2} v dt, \quad S_p = 0,5av^2 + 0,333bv^3 \quad (3)$$

Внаслідок обробки експериментальних даних про характеристики руху автомобілів, що розганяються з першого місця в черзі, були одержані значення параметрів a і b :

Таблиця 1

	a	b
Легкові автомобілі	0,5	0,072
Вантажні автомобілі та автобуси	0,76	0,2

В місті, при проїзді регульованого перехрестя характер і спосіб гальмування залежить від роботи світлофорної сигналізації (екстрене, сповільнення, вибіг чи гальмування накатом).

Обробка результатів спостережень за зміною сповільнення j_T залежно від поточної швидкості автомобіля показала, що для високих швидкостей руху характерне більше значення сповільнення при гальмуванні. Із зменшенням швидкості j_T знижується.

Кореляційне рівняння, що описує залежність часу гальмування від швидкості:

$$t_T = \rho \cdot (v)^{0.5}, \quad (4)$$

де ρ - параметр, значення якого дорівнюють: легкові - 3,75; вантажні - 5,7.

Шлях гальмування до повної зупинки в залежності від швидкості в момент початку гальмування:

$$S_T = 0,333 \cdot \rho \cdot (v)^{1.5} \quad (5)$$

Зважаючи на те, що найбільш “вузькими”, а, отже, і найбільш екологічно небезпечними ділянками вулично-дорожньої мережі є перехрестя, є необхідним дослідження поведінки транспортних потоків в даних зонах.

Для оцінки екологічної ситуації поблизу перехресть необхідно визначити число автомобілів, зупинених на перехресті при включенні забороняючого сигналу світлофора.

В практичних розрахунках при визначенні числа автомобілів, що затримуються біля ізольованого перехрестя зі світлофорним регулюванням, використовують відому в теорії транспортних потоків формулу

$$\delta_{0j} = \frac{1 - \lambda_j}{1 - y_j}, \quad (6)$$

де δ_{0j} - частка автомобілів, що затримуються біля перехрестя; λ_j - ефективна частка j -ї фази в циклі регулювання; y_j - фазовий коефіцієнт j -ї фази регулювання.

$$\lambda_j = \frac{t_{осн j}}{T_{ц}}; \quad (7)$$

$$y_j = \frac{N_j}{M_{нj}}. \quad (8)$$

Потік насичення для однієї смуги руху визначається виходячи із середнього інтервалу часу між автомобілями $\Delta \bar{\tau}$, с/авт, при роз'їзді черги

$$M_{нj} = (\Delta \bar{\tau})^{-1}; \quad (9)$$

$$M_{нj} = \frac{3600}{\Delta \bar{\tau}} \text{ (для авт/год)} \quad (10)$$

Другою характеристикою роз'їзду черги є $\Delta \bar{\tau}_{руш}$ – середній інтервал запізнення або відтинок часу між моментами зрушення з місця попереднього та наступного автомобілів в черзі в процесі її ліквідації.

Для середніх умов руху на перехресті (гарний стан покриття, поздовжній ухил менше 1,5%):

$$\Delta \bar{\tau}_{руш} = 1,2 - 0,4\Delta_{л}; \quad (11)$$

$$\Delta \bar{\tau} = 3,45 - 1,15\Delta_{л}, \quad (12)$$

де $\Delta_{л}$ - частка легкових автомобілів в потоці.

Час зупинки одного автомобіля в черзі складається з часу на очікування дозволяючого сигналу світлофору та часу очікування розвантаження черги.

Групу зупинених біля перехрестя автомобілів можна умовно поділити на дві підгрупи:

- що зупиняються на забороняючий сигнал світлофору;
- що спиняються через наявність черги.

Середній час очікування дозволяючого сигналу світлофору одним автомобілем можна вважати рівним половині довжини забороняючого сигналу світлофора:

$$t_{\text{очік}} = t_{\text{черв}} / 2 \quad \text{або} \quad t_{\text{очік}} = 0,5 T_{\text{ц}} (1 - \lambda_j) \quad (13)$$

Даний вираз застосовується в розрахунках при визначенні середнього часу зупинки автомобіля в черзі.

Враховуючи частку зупинених автомобілів, отримаємо середню затримку автомобіля біля перехрестя.

Визначення довжини черги на перехресті виконується в залежності від складу транспортного потоку. Для однорідного потоку довжина черги $l_{\text{ч}}$, що складається з числа n зупинених автомобілів певного типу, та вимірюється від стоп-лінії до коліс останнього автомобіля, описується кореляційною залежністю:

$$l_{\text{ч}} = A (n_0 - 1) + B, \quad (14)$$

де A , B - постійні параметри, значення яких для однорідної черги дорівнюють:

Таблиця 2

Тип автомобілів в черзі	A	B
легкові	7.5	2.4
вантажні з причепами	11	3.6
автобуси	13.5	5

Для змішаного потоку довжина черги визначається:

$$l_{\text{ч}} = (4 \Delta_{\text{л}} + 7.5 \Delta_{\text{в}} + 10\Delta_{\text{вг}}) n_0 + 3.5 (n_0 - 1), \quad (15)$$

де $\Delta_{\text{л}}$, $\Delta_{\text{в}}$, $\Delta_{\text{вг}}$ - відповідно частки легкових, вантажних і великогабаритних автомобілів в черзі.

Від усталеної швидкості руху автомобіля, числа зупинок, затримок залежить така характеристика, як час проїзду ділянки магістралі. При швидкості усталеного руху 25 - 60 км/год час проїзду ділянки магістралі з регульованим рухом описується залежностями:

$$t_{\text{прл}} = \delta_{0j} \cdot [(2,2 + 0,9 v_{\text{л}}) + 0,5 (1 - \lambda_j) T_{\text{ц}}] + L_{\text{п}}/v_{\text{л}} \quad (16)$$

$$t_{\text{прв}} = \delta_{0j} \cdot [2,2v + 0,5 (1 - \lambda_j) T_{\text{ц}}] + L_{\text{п}}/v_{\text{в}}, \quad (17)$$

де $t_{\text{прл}}$, $t_{\text{прв}}$ - середній час проїзду ділянки легковим і вантажним автомобілем відповідно, с; $v_{\text{л}}$, $v_{\text{в}}$ - середня швидкість усталеного руху на перегоні у вантажних та легкових автомобілів.

Однією із основних характеристик транспортного потоку, що формує екологічну безпеку, є швидкість руху. Швидкість руху суттєво впливає на ефективність використання автомобілів у містах, а також на ступінь негативного впливу автомобілів на навколишнє середовище. В зв'язку з цим прогнозування зміни швидкості руху є важливою умовою при розробці заходів з організації дорожнього руху. Труднощі, пов'язані з проведенням натурних обстежень, а також неможливість експериментальної оцінки швидкостей руху на стадії проектування, викликають необхідність використання засобів математичного моделювання при вирішенні даної проблеми. Внаслідок моделювання руху транспортного потоку одержані наступні залежності.

Залежність швидкості сполучення $v_{\text{с}}$ від затримки перед перехрестям:

$$v_{\text{с}} = \frac{75 - 0,62t_n}{L_n^{0,47 - 0,0028t_n}} \ln(L_n + 1), \quad (18)$$

де t_{Π} - затримка перед перехрестям зі світлофорним регулюванням, с.
Середня швидкість транспортного потоку

$$v_{\Pi} = v_{\text{вр}} - \alpha K_{\alpha} N, \quad (19)$$

де α , K_{α} - комплексні коефіцієнти, що враховують склад потоку і зміну дорожніх умов; $v_{\text{вр}}$ - середня швидкість вільного руху автомобілів на перегоні:

$$v_{\text{вр}} = \theta \cdot v_0, \quad (20)$$

де θ - комплексний коефіцієнт, що враховує вплив ДУ і складу потоку; v_0 - середня швидкість вільного руху “швидких” автомобілів при однорідному потоці, на рівній ділянці вісьмисмугової магістралі безупинного руху ($v_0 = 70$ км/год).

Коефіцієнт θ

$$\theta = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5 \quad (21)$$

Коефіцієнт m_1 враховує вплив довжини перегону на швидкості вільного руху автомобілів:

$$m_1 = L_{\Pi} / (0,057 - 0,943 \cdot L_{\Pi}) \quad (\text{при } 150 \text{ м} \leq L_{\Pi} \leq 1000 \text{ м}). \quad (22)$$

Коефіцієнт m_2 враховує вплив числа смуг руху:

$$m_2 = 0,92 + 0,2 R, \quad (23)$$

де R - число смуг руху в одному напрямку.

Для $R = 2$ коефіцієнт m_2 залежить від ширини проїжджої частини в одному напрямі руху:

Таблиця 3

Ширина проїжджої частини $B_{пч}$, м	7,5	7,0	6,5	6,0
Коефіцієнт m_2	0,96	0,94	0,9	0,85

Для $L_{п} > 1$ км і $R > 5$ значення коефіцієнтів m_1 і m_2 приймаються рівними 1.

Коефіцієнт m_3 враховує вплив складу транспортного потоку на швидкість вільного руху:

$$m_3 = 0,8 + 0,2 \Delta_{л}. \quad (24)$$

Вплив поздовжнього ухилу на швидкість вільного руху враховується коефіцієнтом m_4 :

при русі на ділянках підйому:

$$m_4 = 1,08 - (0,08 - 0,05 \Delta_{л}) i. \quad (25)$$

при русі на ділянках спуску:

$$m_4 = 1 + 0,01i \quad , \quad (26)$$

де i - поздовжній ухил в %. Для ділянок з ухилом $i < 2\%$ $m_4 = 1$.

Коефіцієнт m_5 враховує вплив рівності дорожнього покриття на швидкість вільного руху:

$$m_5 = 1 - 0,1 S, \quad (27)$$

де S - бальна оцінка стану дорожнього покриття по рівності.

Зміна стану покриття на 1 бал приблизно відповідає зміні швидкості потоку на 10%.

При наявності на перегоні міської магістралі дорожніх знаків, що обмежують швидкості руху транспортних засобів, чи системи

координованого регулювання дорожнім рухом значення швидкості вільного руху визначається за залежністю:

$$v_{\text{вр}}^* = \begin{cases} \theta v_0 & \text{при } v_{\text{вр}} \leq 1,05v_{\text{обм}} \\ 1,05v_{\text{обм}} & \text{при } v_{\text{вр}} > 1,05v_{\text{обм}} \end{cases}, \quad (28)$$

де - $v_{\text{обм}}$ гранична швидкість руху, обмежена дорожнім знаком, чи регламентована середня швидкість руху в режимі “зеленої хвилі”, км/год.

IV. ТОКСИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

При оцінці рівня екологічної безпеки транспортних систем міст вулично-дорожню мережу умовно розділяють на типові елементи «перегін – перехрестя» та по кожному типовому елементу збирають всі параметри. Визначаються показники токсичності транспортних потоків такі, як валовий викид та інтенсивність викиду транспортного потоку.

Валовий викид CO , г/(м·с) розраховується залежно від витрати палива потоком автомобілів:

$$Q_{co} = 2,06 \cdot 10^{-4} \cdot m (G_{\text{Л}}N_{\text{Л}} + G_{\text{В}}N_{\text{В}} + G_{\text{А}}N_{\text{А}}), \quad (29)$$

де $G_{\text{Л,В,А}}$ - середня кількість палива, що споживається легковим, вантажним автомобілем та автобусом на 1 км пробігу; $N_{\text{Л,В,А}}$ - інтенсивність руху легкових, вантажних автомобілів та автобусів; m - поправочний коефіцієнт, що враховує перерозподілення процентного вмісту CO у ВГ при зміні швидкості руху автомобілів.

Визначення викидів токсичних речовин по витраченому паливу може бути використано тільки для орієнтовної оцінки, бо не враховує структуру, технічний стан парку, умови руху та експлуатації автомобілів.

Токсична характеристика транспортного потоку залежить від складу (однорідності) дорожнього руху. При оцінці впливу транспортного потоку на навколишнє середовище для обліку складу транспортного потоку вводять поправочні коефіцієнти для приведення до однорідного потоку приведених автомобілів.

Транспортний потік приводиться до потоку, що складається із двох груп розрахункових автомобілів: легкових і вантажних, що відрізняються параметрами режимів руху та питомою масою приведенного до *СО* викиду на цих режимах.

$$\bar{N}_{pj} = \sum_{i=1}^I K_{пріj} N_i, \quad (30)$$

де N_{pj} - приведена інтенсивність руху Л або В в одиницю часу;

N_i - фактична інтенсивність руху ТЗ i -того типу;

$K_{пріj}$ - коефіцієнт приведення до Л або В для ТЗ i -того типу;

I - число типових груп транспортних засобів.

Таблиця 4

Тип транспортного засобу	Коефіцієнт приведення по викиду <i>СО</i>	
	Л	В
Легковий автомобіль	1	-
Вантажний автомобіль вантажопідйомністю, т:		
до 2	1,5	-
2-5	-	1
10 - 15	-	1,85
понад 15	-	2,5
Автобус пасажиромісткості:		
особливо малої	1,4	-
малої	-	1
середньої	-	1,85
великої	-	2,25

Для дизельних вантажних автомобілів та автобусів коефіцієнт приведення множать на 0,14 для газобалонних автомобілів на 0,25.

Середнє значення пробігового викиду від одного автомобіля j -того типу на ділянці магістралі “перегін - регульоване перехрестя”:

$$q_j^{CO} = \{ \delta_{0j} L_n^{-1} [a_j v + b_j T_{\text{ц}} (1 - \lambda) + c_j] + d_j / v + e_j \} \cdot \text{PR}_j^{CO}, \quad (31)$$

де a_j, b_j, c_j, d_j, e_j - постійні коефіцієнти,

v - середня швидкість руху, що установився на перегоні, км / год;

λ - ефективна частка горіння дозволяючого сигналу;

PR_j^{CO} - добуток поправочних коефіцієнтів, що враховують вплив середнього віку парку автомобілів на викид CO , рівень технічного стану автомобілів на викид CO , зміна нормативних вимог на пробіговий викид CO .

За пробіговими викидами розраховуються викиди CO в одиницю часу на ділянці магістралі одиничної довжини від транспортного потоку, що рухається в одному напрямі, інтенсивність викидів CO , мг/(м·с):

$$Q_{CO} = 2,78 \cdot 10^{-4} \sum_{j=1}^2 q_j^{CO} \bar{N}_{pj} \quad (32)$$

Викиди вуглеводнів $C_n H_m$, мг/(м·с) від транспортного потоку в одному напрямку на ділянці магістралі:

$$Q_{CH} = 2,78 \cdot 10^{-5} [1,57 - 0,08(T-1985)] (q^{-CO} N_{\text{Л}} + q^{-CO} N_{\text{В}}), \quad (33)$$

де q^{-CO} - “умовний” пробіговий викид CO автомобілем розрахункового типу без врахування PR_j^{CO} .

Викиди окислів азоту NO_x , мг/ (мс):

$$Q_{NO} = 2,78 \cdot 10^{-4} (q^{-NO} N_{\text{Л}} + q^{-NO} N_{\text{В}}), \quad (34)$$

$$q_L^{NO} = 2,3 + 0,1 (v_L-34) - 0,05 (T-1985), \quad (35)$$

$$q_B^{NO} = 8 + 0,17 (v_B-34) - 0,15 (T-1985), \quad (36)$$

де N_L та N_B - фактична інтенсивність руху L та B в одному напрямку, авт/год; V_L та V_B - швидкість усталеного руху L та B автомобілів, км/год.

V. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ЕКОСИСТЕМ ПРИДОРОЖНЬОГО ПРОСТОРУ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Ступінь впливу шкідливих викидів транспортного потоку на навколишнє середовище визначається рівнем їх приземних концентрацій в атмосферному повітрі.

Існують різні підходи до вирішення задачі розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері та моделюванні полів забруднення, зокрема: аналітичне вирішення рівняння турбулентної дифузії, чисельне моделювання турбулентних течій, Лагранжеві моделі, Гаусові моделі, статистичні моделі, моделі міських каньйонів: STREET (Johnson et al., USA, 1973); Canyon Plum Box Model (Yamartino et al., 1986); Operational Street Pollution Model (Berkowicz, 1996). На сьогоднішній день немає загальноприйнятої моделі розсіювання забруднюючих речовин через її складність. [2,3]

Для визначення рівня забруднення в містах існує клас полуемпіричних моделей, заснованих на апіорній параметризації умов перенесення та розсіювання забруднюючих речовин. Серед цих моделей найбільш відомими є: California Line Sours Dispersion Model (CALINE-4) та Danish Operational Street Pollution Model (OSPM). Модель CALINE-4 створена Каліфорнійським департаментом транспорту, заснована на гаусовій моделі факела. Клас стійкості приземного шару атмосфери визначається за допомогою модифікованих кривих Паскуїла-Гіфорда. Дана модель потребує невеликої кількості вхідної інформації, що забезпечує її простоту і

широке використання. Разом з тим, результати моделювання можна вважати лише наближеними, так як дана модель не враховує особливості міської забудови, рельєф місцевості, метеорологічні характеристики.

Модель OSPM орієнтована на визначення концентрації забруднюючих речовин від транспортних потоків у вуличних каньонах з врахуванням метеорологічних умов, геометричних характеристик вуличних каньонів: різні конфігурації вулиць, ширини, висоти, щільності забудов, також в моделі враховується механічна турбулентність, створена рухом транспортних засобів. Основним недоліком OSPM є неможливість врахування деформації вітрового потоку в залежності від конфігурації забудов.

Визначення концентрації забруднюючих речовин у вуличних каньонах від транспортних потоків пропонується проводити на основі методології моделі Operational Street Pollution Model. Модель заснована на гаусівському типу розсіювання забруднюючих речовин в поєднанні з характеристиками вулично-дорожньої мережі міст.

Моделювання полів забруднення в містах є досить складною задачею, оскільки структура міської забудови є неоднорідною. Тому, доцільно представляти архітектурно-планувальний фрагмент міської забудови сукупністю елементарних вуличних каньонів з відповідними просторово-геометричними характеристиками.

Вуличний каньйон є типовим архітектурно-планувальним елементом міста, який являє собою елементарну ділянку з забудовами уздовж проїзної частини вулиці між найближчими перехрестями. Простір між забудовами – це елементарна екосистема рівень забруднення якої визначає рівень екологічної безпеки даного каньйону. Вуличні каньйони міста мають різні просторово геометричні характеристики: ширина, довжина, просторова орієнтація каньйону, суцільність та композиція забудови (середньозважена висота забудов, щільність забудов, середній кут повороту будинків до осі вулиці). Також виділяють симетричні та асиметричні вуличні каньйони. [4]

Аналіз вуличних каньонів Печерського району м. Києва дозволив сформулювати п'ять однорідних груп в яких ідентифіковано найбільш типові вуличні каньйони на основі їх просторово-геометричних показників (табл.5). Вулично-дорожня мережа Печерського району м.Києва налічувала 377 елементарних каньонів, для яких емпірично були встановлені просторово-геометричні характеристики. [4]

Таблиця 5 – Типові вуличні каньйони Печерського району м. Києва

	Типові вуличні каньйони
Потенційно безпечні каньйони	вул. Грушевського; буд. 9, 32 (кластер 1.1)
	вул. Звіринецька; буд. 82, 73 (кластер 1.2)
Потенційно небезпечні каньйони	вул. Ольгінська; буд. 3, 6 (кластер 2.1)
	вул. Інститутська; буд. 15, 20/8 (кластер 2.2)
	вул. Мазепи; буд. 11,12 (кластер 2.3)

У вуличному каньйоні виділяють наступні зони: навітряна сторона, для якої характерний мінімальний рівень забруднення, що обумовлено надходженням чистого повітря; внутрішня частина та підвітряна сторона, для якої спостерігається максимальний рівень забруднення. При моделюванні рівня забруднення розрізняють швидкість і напрямок вітру на рівні даху забудов, що визначається глобальним перенесенням повітряних мас та швидкість вітру на рівні вулиці. Також виділяється зона рециркуляції, яка характеризується надходженням забруднюючих речовин з іншої частини вуличного каньйону та визначається довжиною турбулентного вихору, геометричними показниками каньйону. (рис.3)

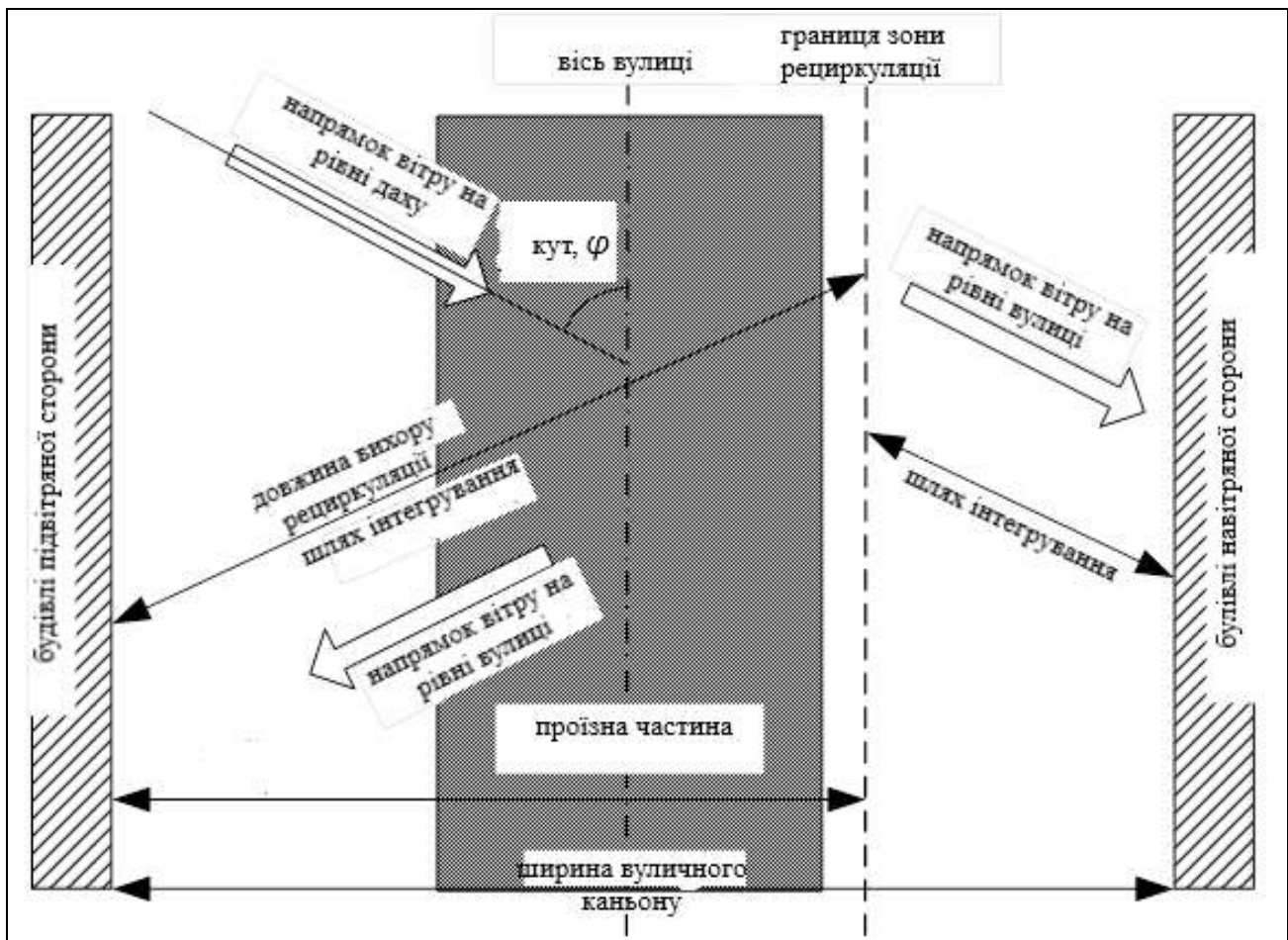


Рисунок 3 – Основні параметри вуличного каньону

Концентрація забруднюючих речовин визначається в межах вуличного каньону і дорівнює сумі концентрації прямого розсіювання поллютантів, концентрації спричиненою рециркуляцією повітря у вуличному каньоні та міською фоновою концентрацією.

$$C = C_{\text{п}} + C_{\text{р}} + C_{\text{ф}} \quad (37)$$

Концентрація прямого розсіювання забруднюючих речовин від транспортного потоку дорівнює:

$$C_{\text{п}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int \frac{L \cdot Q dx}{U_{\text{в}} W \sigma_z(x)} \quad (38)$$

де L – довжина вуличного каньйону, м;

Q – інтенсивність викидів забруднюючих речовин від “ефективного” транспортного потоку, мг/м³с;

U_B – швидкість вітру на рівні вулиці, м/с;

W – ширина вуличного каньйону, м;

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

Швидкість вітру на рівні вулиці визначається наступним чином:

$$U_B = U_D \frac{\ln(h_0/z_0)}{\ln(H/z_0)} (1 - 0.2p \sin \varphi) \quad (39)$$

де U_D – швидкість вітру на рівні даху, м/с;

z_0 – ефективний розмір нерівності, м, $z_0=0,6$;

h_0 – ефективна висота шлейфу після руху автомобіля, м, $h_0=2$;

H – середня висота забудов вуличного каньйону (з навітряної та підвітряної сторони каньйону), м;

p – відношення висоти забудов з підвітряної сторони до середньої висоти забудов вуличного каньйону;

φ – кут напрямку вітру на рівні даху по відношенню до осі вулиці, рад;

Параметр вертикальної дисперсії забруднюючих речовин на відстані x від джерела викиду визначається за наступною формулою:

$$\sigma_z(x) = \sigma_w \frac{x}{U_B} + h_0 \quad (40)$$

де σ_w – вертикальна дисперсія турбулентності, м/с;

x – відстань від джерела до розрахункової точки, м

$$\sigma_w = \sqrt{(0.1U_B)^2 + \sigma_{w0}^2} \quad (41)$$

де σ_{w0} – дисперсія турбулентності, викликана рухом транспортних засобів, м/с;

$$\sigma_{W0} = 0.3 \sqrt{\frac{NVS}{W}} \quad (42)$$

де N – інтенсивність руху транспортного потоку, авт/с;

V – середня швидкість руху транспортного потоку, м/с;

S – середня площа, яку займає транспортний засіб, м²;

Таким чином концентрація забруднюючих речовин від прямого розсіювання при перпендикулярному напрямку вітру до осі вулиці визначається:

$$C_{\Pi} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{L \cdot Q}{W \sigma_W} \ln \left(1 + \frac{W \sigma_W}{h_0 U_B} \right) \quad (43)$$

Розрахунок концентрації забруднюючих речовин в зоні рециркуляції вуличного каньйону проводиться в залежності від довжини турбулентного вихору:

$$l_B = 2rH_{\text{підв.}} \quad (44)$$

де r – показник, що залежить від швидкості вітру (для швидкостей вітру < 2 м/с $r = U_d/2$, в інших випадках $r = 1$)

Концентрація від рециркуляції забруднюючих речовин в межах вуличного каньйону визначається наступним чином:

$$C_P = \frac{Q \cdot l_r}{W \cdot (\omega_t \cdot l_t + \omega_s \cdot l_s)} \quad (45)$$

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

ω_t, ω_s – швидкість розсіювання забруднюючих речовин відповідно через верхню та бокову частину вуличного каньйону, м/с.

$$\omega_t = \sqrt{(0,1U_d)^2 + (0,4\sigma_{W0})^2} \quad (46)$$

$$\omega_s = \sqrt{U_B^2 + \sigma_{w0}^2} \quad (47)$$

На основі даної моделі виконана оцінка концентрації забруднюючих речовин у вуличних каньонах Печерського району м. Києва з врахуванням добової динаміки інтенсивності транспортних потоків.[5] Інтенсивність викидів оцінювалась на основі концепції “ефективного транспортного потоку”, тобто модельного потоку, техногенна ефект-дія якого на навколишнє середовище еквівалентна дії реального транспортного потоку, що містить аналогічну кількість транспортних засобів. «Ефективний» транспортний потік, являється статистичною сукупністю «ефективних» транспортних засобів відповідних категорій. [6]

Отже, на основі моделі міських вуличних каньонів (OSPM) визначається добова динаміка концентрації основних забруднюючих речовин у вуличних каньонах транспортних систем міст, що дозволяє оперативно прогнозувати рівень забруднення екосистем придорожнього простору та своєчасно, шляхом управління параметрами транспортного потоку, попереджати критичні ситуації в проектах управління екологічним станом мегаполісу.

VI. ОЦІНКА РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Рівень екологічної безпеки визначається шляхом порівняння рівня забруднення екосистем придорожнього простору з гранично допустимою концентрацією токсичних речовин (ГДК).

Гранично допустимою концентрацією токсичної речовини (ГДК) прийнято вважати максимальну концентрацію домішки, віднесена до певного часу усереднення, що при періодичному впливі чи на протязі всього життя людини не чинить шкідливої дії на організм людини і на навколишнє середовище в цілому. ГДК деяких токсичних компонентів наведені в таблиці 6.

При екологічній оцінці стану примагістральної території необхідно враховувати наявність в атмосферному повітрі одразу

декількох токсичних речовин. В цьому випадку розглядається відносна сумарна концентрація, тобто сума відношень концентрацій токсичних речовин, що розглядаються до їх ГДК.

Таблиця 6 – Гранично-допустимі концентрації токсичних речовин

Речовини	ГДК, мг/м ³		
	разові	середньодобові	в робочій зоні
окис <i>NO</i>	0,6	0,06	30
окис <i>NO</i> ₂	0,45	0,04	2
Свинець (<i>Pb</i>):	-	0,0003	0,02
нітрат <i>Pb (NO</i> ₃) ₂	-	0,0003	0,01
Сірка (<i>S</i>):	-	-	6
Окис сірки <i>SO</i> ₂	0,5	0,05	10
Вуглець (<i>C</i>):	0,15	0,05	4
окис <i>CO</i>	5	3	20
Бензапірен (<i>C</i> ₂₀ <i>H</i> ₁₂)	-	0,000001	0,00015
Бутан (<i>C</i> ₄ <i>H</i> ₁₀)	200	-	300
Пропан (<i>C</i> ₃ <i>H</i> ₈)	-	-	1800

Екологічний стан вважається сприятливим, якщо відносна сумарна концентрація не перевищує 1.

$$\sum_{i=1}^I \frac{C_i}{ГДК_i} \leq 1, \quad (48)$$

Для приведення різноманітних токсичних речовин до порівняного вигляду, обирається базовий токсичний компонент, за яким здійснюється коригування інших. У вигляді базового приймається окис вуглецю *CO*.

Отже формула (1.48) може бути також записана у вигляді:

$$\sum_{i=1}^I C_i K_{np1i} \leq ГДК_{CO} \quad , \quad (49)$$

де K_{np1i} - коефіцієнт приведення, рівний $K_{np1i} = ГДК_{CO} / ГДК_i$

При визначенні збитків від забруднення атмосфери токсичними речовинами використовують коефіцієнт приведення до окису вуглецю, але з урахуванням додаткових факторів:

$$K_{np2} = a_i \cdot \alpha_i \cdot \delta_i \cdot \lambda \cdot \beta \quad , \quad (50)$$

де a_i - показник відносної небезпеки присутності домішки в повітрі:

$$a_i = \left[\frac{ГДК_{CO}^{(C)} ГДК_{CO}^{(P)}}{ГДК_i^{(C)} ГДК_i^{(P)}} \right]^{0,5} = \left[\frac{60}{ГДК_i^{(C)} ГДК_i^{(P)}} \right]^{0,5} \quad , \quad (51)$$

де $ГДК_i^{(C)}$ - середньодобова ГДК, мг/м;

$ГДК_i^{(P)}$ - гранично допустима концентрація токсичних речовин у повітрі робочої зони, мг/м.

α_i - поправочний коефіцієнт, що враховує імовірність надходження токсичної речовини в організм людини, $1 \div 5$;

δ_i - поправочний коефіцієнт, що враховує можливість впливу на інші живі організми, окрім людини, $1 \div 2$;

λ - коефіцієнт, що враховує імовірність повторного викиду домішки в атмосферу після її осідання на поверхні землі, $1 \div 1,2$;

β - коефіцієнт, що враховує утворення повторних шкідливих речовин ще більш небезпечних, ніж вихідні, $1 \div 5$.

Значення коефіцієнту приведення $K_{пр2}$ для різноманітних речовин:

Окис вуглецю _____	1,0
Сірчистий ангідрид _____	22,0
Окиси азоту _____	41,1
Вуглеводні _____	3,16
Фенол _____	310,0
Двоокис кремнію _____	83,2
Сажа _____	41,5
Сполуки свинцю _____	22400,0

Поряд з ГДК, що є узвичаєним критерієм якості стану навколишнього середовища, існує показник токсичності автомобіля - гранично допустимий викид (ГДВ).

Гранично допустимий викид (ГДВ) - кількість токсичних речовин, що викидаються в одиницю часу разом з відпрацьованими газами автомобілів, що в сумі з викидами від інших джерел міста (промислових підприємств, котельних і т.д.) не створює концентрації токсичних речовин в атмосферному повітрі, що перевищують її ГДК.

В тих випадках, коли підтримка ГДК окремих речовин в повітрі не уявляється можливим, по узгодженню з Міністерством охорони здоров'я України та Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України встановлюються тимчасово узгоджені викиди.

Тимчасово узгодженим викидом від автомобільного транспорту є такий викид, при якому концентрація токсичних компонентів від автомобілів та інших джерел викиду досягає певного значення (більше ГДК), але що не може бути знижена в даний період часу з технічним чи економічним причин.

Обґрунтування тимчасово узгоджених викидів робиться по кільком періодам з послідовним зниженням розрахункової концентрації токсичних речовин в атмосферному повітрі та доведенням її до ГДК.

Дані про стан загазованості повітря зазвичай збираються з використанням стаціонарних пунктів чи рухомих лабораторій і містяться в Санепідемстанції міста (СЕС) або гідрометобсерваторії.

Для виявлення найбільш несприятливих ділянок міських територій проводиться аналіз існуючих даних. За територіальну одиницю прийнятий транспортно-планувальний підрайон (ТПП), що включає ділянку магістралі з житловою забудовою та громадськими установами. Розмір ТПП повинен складати 2-4 км. На підставі аналізу виявляють найбільш забруднені ТПП, в яких аналізують завантаження магістралей, характер прилеглої забудови та її призначення. Внаслідок проведеної оцінки складають маршрути руху рухомої лабораторії по ТПП для вияву найбільш несприятливих ділянок магістралей. По одержаним даним спостережень ранжують “небезпечні” ділянки мережі по мірі їх загазованості та відзначають на плані міста.

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря у містах є автомобільний транспорт, енергетика (теплові електростанції та котельні) і промисловість. Згідно з цим при оцінці можливого і допустимого рівня загазованості повітря необхідно виділяти частку забруднень кожного джерела.

Допустима загазованість атмосферного повітря від автомобільного транспорту визначається як:

$$\Delta C_{\text{тр}} < C_{\text{ГДК}} - C_{\text{ст}}, \quad (52)$$

де $C_{\text{тр}}$ - допустима концентрація токсичної речовини в повітрі від транспортного потоку, мг /м;

$C_{\text{ГДК}}$ - гранично допустима концентрація цієї речовини у повітрі;

$C_{\text{ст}}$ - концентрація цієї токсичної речовини в приземному шарі повітря від стаціонарних джерел.

У випадках, коли в зоні міста, що розглядається, рівень загазованості атмосферного повітря від викидів промислових

підприємств перевищує допустимий рівень, можлива загазованість від автомобільного транспорту визначається, як:

$$C_{\text{тр}} = C_{\text{ту}} - C_{\text{ст}}, \quad (53)$$

де $C_{\text{ту}}$ - тимчасово узгоджена концентрація токсичної речовини у повітрі, мг /м.

Зниження концентрації токсичних речовин від транспортних потоків та дотримання безпечного екологічного простору може бути досягнуто: будівництвом інженерних споруд по захисту навколишнього середовища; композиційними прийомами забудівлі: зонуванням приміагістральної смуги, будівництвом біля магістралей торгівельно-побутових чи соціально-культурних закладів та підприємств; проектуванням смуг зелених насаджень; заходами з організації дорожнього руху.

Найбільш ефективними та оперативними заходами в умовах міста, що дозволяють, шляхом управління параметрами транспортного потоку, попереджати критичні рівні забруднення довкілля і, тим самим, управляти екологічним станом мегаполісу, є заходи з організації дорожнього руху.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мержиєвська Л.П., "Екологія та автомобільний транспорт", Навчальний посібник, Київ, Арістей, 2006. С. 292
- [2] Ketzler M, Jensen S.S, Brandt J and all. Evaluation of the street pollution model OSPM. *Civil Environmental Engineering* 2012, S1.
- [3] Berkowicz R. OSPM – a parameterized street pollution model / *Kluwer Academ. Publishers. Netherlands. Environmental Monitoring and assessment.* – 2000. – Vol. 65. – P. 341-359.
- [4] Бакуліч О.О., Олійник Р.В., Самойленко Є.С. Потенційна екологічна небезпека вуличних каньйонів міста. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки».* Науково-технічний збірник. 2015. Випуск 1 (31). С. 12-19. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/31_1_tech_2015/018-026.pdf
- [5] 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>
- [6] Бакуліч О.О., Самойленко Є.С. Модель складу транспортного потоку міста. *Економіка та управління на транспорті.* Науковий журнал. НТУ, 2016, вип. 3. С.3-9. <http://publications.ntu.edu.ua/eut/2016-03/003-009.pdf>
- [7] Брайловский Н.О. Моделирование транспортных систем / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский – Москва, *Транспорт*, 1978, с.125
- [8] Абрамова Л.С., Бакуліч О.О. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: навч. посіб. Харків, 2014, с. 184.
- [9] Полищук В.П. Організація дорожнього руху: підручник /за ред. проф. Полищука В.П. *Київ, Вища школа*, 2011, с. 425
- [10] Бакуліч О.О., Заяц О.В., Астаніна Н.В., Севост'янова А.В., Кіс І.Р. Екологічний менеджмент : навч. посіб. / за ред. проф. О.О.Бакуліч, Київ, 2020, с. 120.