

УДК 504.064.2

## Конвективна модель розповсюдження емісії викидів на автотранспортному шляхопроводі при нейтральних метеоумовах

О. С. Волошкіна<sup>1</sup>, В. В. Трофімович<sup>2</sup>, І. В. Клімова<sup>3</sup>, Р. В. Сіпаков<sup>4</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com)  
orcid.org/0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [iklimova@i.ua](mailto:iklimova@i.ua)

<sup>4</sup>асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [shyshyna.mo@knuba.edu.ua](mailto:shyshyna.mo@knuba.edu.ua)

<sup>5</sup>к.т.н., докторант. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, [tkachenkknuba@gmail.com](mailto:tkachenkknuba@gmail.com),  
ORCID 0000-0003-2105-5951

*Анотація. Аналіз ступеня забруднення атмосферного повітря на урбанізованих територіях виявив його залежність від зростання кількості особистих автотранспортних засобів, які працюють на традиційному паливі. У роботі доведено можливість застосування теорії конвективної струмини для оцінки та прогнозу забруднення атмосферного повітря мегаполісів залежно від метеоумов та кількості автомобілів, які перебувають одночасно в «заторах» та «тиснях» на автомобільному шляхопроводі. Для розрахунку параметрів конвективної струмини використовуємо інтегральний метод Л. Ейлера. На підставі розглянутих основних шляхів розповсюдження емісій в атмосфері, окреслено умови виникнення нейтрального стану. Авторами представлено методу розрахунку кількості викидів вуглеводнів від автомобільного транспорту, що є підставою для визначення вторинного забруднення формальдегідом атмосферного повітря території мегаполісів внаслідок фотохімічних перетворень. Представлені дослідження дозволяють виділити частку викидів парникових газів від автомобільного транспорту в розрізі загальних викидів мегаполіса. На підставі даної моделі розроблений калькулятор розрахунку концентрації забруднення від автотранспорту. Калькулятор дозволяє використовувати спеціально синтезовані зовнішні впливи з подальшим обробленням результатів спостережень та з наступним аналізом наслідків. Ефективність використання запропонованої математичної моделі може бути збільшена, якщо поєднати її зі застосуванням "зелених конструкцій". Запропонований у роботі підхід стане в нагоді при пошуку оптимальних управлінських рішень на муніципальному рівні та формування екологічної політики міста.*

*Ключові слова: забруднення атмосферного повітря, теорія конвективної струмини, математична модель, викиди вуглеводнів.*

**Вступ.** Підвищена залежність від особистого транспорту визначає його основним джерелом забруднення повітря в ряді мегаполісів. Особливо це стосується країн, які розвиваються [1]. У цих країнах спостерігається пряма залежність між зростанням добробуту населення та кількістю особистого транспорту. За прогнозами Програми ООН щодо населених пунктів, кількість такого транспорту має збільшуватися. До 2050 року кількість транспорту має підвищитися до 2,6 млрд., тобто на 50 % порівняно з 2011 роком.

Для з'ясування ролі транспортних викидів мегаполісів у забрудненні атмосфери в умовах глобальних кліматичних змін необхідно здійснювати масштабні дослідження із залученням даних регіонального та муніципального моніторингу. Необхідні міждисциплінарні інтегровані інструменти оцінки для оптимізації заходів щодо зменшення впливу мегаполісів на здоров'я людей та клімат [2].

У цій роботі автори оцінюють взаємний вплив підвищення температурних умов мегаполіса та ступеня забруднення атмосферного повітря від автотранспорту.

Оцінка ступеня забруднення атмосферного повітря, яка характеризує формування техногенних теплових потоків при нейтральних умовах атмосфери здійснюється шляхом створення математичної моделі.

**Актуальність дослідження.** У практичних дослідженнях важко належним чином обґрунтувати та забезпечити необхідною оперативною інформацією органи прийняття управлінських рішень для оцінки та прогнозу виникнення смогових ситуацій з урахуванням відповідних метеоумов у місцях великого скупчення автотранспорту. Крім того, для забезпечення сталого розвитку мегаполісу необхідний контроль викидів парникових газів від пересувних джерел. Тому актуальними на даний час є дослідження щодо створення моделі забруднення атмосферного повітря та, відповідно, фотохімічних перетворень саме над автотранспортними шляхопроводами.

**Останні дослідження та публікації.** Дослідженням особливостей формування міської кліматичної системи присвячена велика кількість робіт, починаючи з кінця ХХ століття [3,4,5,6].

Одним з важливих факторів формування

міського клімату є антропогенні потоки теплоти над тепловими плямами в місті, які підвищують температуру та утворюють так звані «острови тепла» та «міські камінні труби». І хоча останнім часом спостерігається тенденція до розташування індустріальних підприємств у передмістях, показники техногенних потоків теплоти не зменшуються, що пояснюється наступними факторами, що впливають один на один:

- характером забудови міської території, яка визначає провітрювання та поглинання сонячної енергії з поверхні території;

- збільшенням кількості автомобільного транспорту, який працює на бензиновому паливі (останнім часом «затори» та «тисняви» на великих перехрестях та шляхопроводах стають звичайним явищем для великого транспортного міста та вносять суттєвий вклад у формування техногенних теплових потоків з викидами теплоти від вихлопних газів);

- регіональні прояви глобальних кліматичних процесів та локальні кліматичні ефекти.

Питання підвищення забруднення залежно від температури міського середовища досить детально розглядалося рядом авторів на основі аналізу багаторічних моніторингових даних. Інші автори застосовували підходи, які ґрунтуються на законах хімічної кінетики [7, 8, 9, 10 та ін.].

Всі автори доводять залежність компонентів забруднення атмосферного повітря та фотохімічних процесів від температури повітря, і це не підлягає сумніву. Але відомі на даний час методики моделювання як просторового розподілу забруднення, так і моделі атмосферної дифузії не можуть бути уніфіковані, оскільки існують суттєві відмінності великих мегаполісів, що розглядалися, їхнього мікроклімату, соціально-економічних умов розвитку – і це потребує врахування у моделі великої кількості факторів. Крім цього, сучасні методики оцінки та прогнозу дають змогу реалізувати чисельно забруднення атмосферного повітря урбосистем від стаціонарних або пересувних джерел разом, без належної оцінки кожного джерела окремо. Нині найбільш відомими та поширеними й ефективними вважаються методики, що засновані на реалізації математичних моделей, які базуються на рівняннях математичної фізики з залученням статистичних моделей [11,12]. Як правило, такі прогнози можуть бути застосовані тільки для окремих територій, що розглядаються, із притаманними їм природно-кліматичними особливостями місцевості та рі-

внем розвитку соціально-екологічних структур. Можливості цих відомих моделей дозволяють отримувати тільки відносні оцінки «внеску» окремих джерел (в т.ч. автотранспорту) у загальному забрудненні міської атмосфери (у відсотковому відношенні).

Але в практичних дослідженнях важко належним чином обґрунтувати та забезпечити необхідною оперативною інформацією органи прийняття управлінських рішень для оцінки та прогнозу виникнення смогових ситуацій з урахуванням відповідних метеоумов у місцях великого скупчення автотранспорту. Крім того, для забезпечення сталого розвитку мегаполісу необхідний контроль викидів парникових газів від пересувних джерел. Тому актуальними на даний час є дослідження щодо створення моделі забруднення атмосферного повітря та, відповідно, фотохімічних перетворень саме над автотранспортними шляхопроводами.

Невід'ємною складовою такої оцінки є розрахунковий блок, який дозволив би визначати концентрації викидів вуглеводнів від автомобільних двигунів для оцінки ступеня подальшого перетворення цих викидів у формальдегід, який, як відомо, є індикатором появи фотохімічного смогу від автотранспорту в багатьох мегаполісах. Реалізація такої моделі дозволить робити оцінку та прогноз у задачах інвентаризації парникових газів великих транспортних міст, а також здійснювати оцінку ризику для здоров'я населення, яке перебуває в зоні впливу автомобільних шляхопроводів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного дослідження є оцінка викидів вуглеводнів над автотранспортними шляхопроводами в міському середовищі на підставі створення математичної моделі формування купола забруднення на перехресті залежно від кількості працюючих двигунів та температури атмосферного повітря.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до визначення забруднення атмосферного повітря мегаполісів над автотранспортними шляхопроводами.

- розробити математичну модель, яка дозволяє визначити формування купола забруднення на перехресті при сталих метеоумовах;

- провести апробацію отриманої моделі в залежності від кількості працюючих двигунів та температурних умов.

**Матеріали дослідження.** Основні шляхи розповсюдження емісій в атмосфері формуються при комбінуванні різних метеоумов.

Провідні фактори розповсюдження: середній вітер, турбулентність атмосфери в межах планетарного примежового шару (орієнтовно до висоти 1000 м) і вертикальне розподілення температури (адиабатичне, інверсійне і шарувате різноманітне). Досить спрощено можуть бути названі три головних стани: нестабільний (несприятливий), стабільний (підстилення під інверсійний шар) і нейтральний (конусоподібна нахилена або майже вертикальна струмина). В усіх випадках результати моніторингу атмосфери повинні містити інформацію про зв'язок якості, потужності, кінематичних і геометричних характеристик джерел з показниками забруднення приземного шару і пошкодженням біосфери.

Існує науковий досвід вивчення процесів турбулентної дифузії, починаючи від робіт Г. І. Тейлора, В. Шмидта, А. М. Колмогорова, Д. Л. Лайтмана і включаючи роботи М. Є. Берлянда і В. М. Ельтермана [13, 14, 15 та ін.]. Теоретичні та інструментальні дослідження останніх завершилися створенням на базі К-теорії методики інженерного розрахунку забруднення атмосфери [16]. Методика передбачає визначення концентрації емісії на шляху розвитку струмини на трьох ділянках: перекиду, задимлення (точка падіння на земну поверхню) і поступового зниження концентрації. Первинні забруднювальні речовини не перетворюються на вторинні. Концентрації порівнюються з нормативами екологічної безпеки (система ГДК).

При нейтральних метеоумовах і відсутності хмарного покриву в теплий період створюються умови для атмосферних реакцій і утворення фотохімічного смогу. Компоненти смогу: пари азотної кислоти, пероксиацетилнітрат, формальдегід і озон. Явище смогу вивчалось на основі моніторингових досліджень. З чотирьох компонентів у різних країнах обирають озон (США), пероксиацетилнітрат (Австралія), формальдегід (Україна). Для формальдегіду первинними емітантами є вуглеводні, два види з яких мають природне походження – метан і ізопрен. Третій вид уособлює емісію автомобільних двигунів. Природна емісія формує фоновий рівень концентрацій формальдегіду, але етилен дає змінну складову і залежить від кількості автомобільних засобів, які одночасно перебувають на шляхопроводі.

На рис. 1 представлена схема формування конвективної струмини над авторозв'язкою. В схемі конвективної струмини:  $K$  – секундна кількість руху, Н, яка проходить через переріз, який віддалений на відстані  $Y$ , м, від джерела

теплоти. Приймаємо  $dK = -dAr$ , Н, для елементарного шару завтовшки  $dY$ , м,  $V_K$  – швидкість теплого повітря, м/с,  $A_r$  – архімедова сила, Н,  $D$  – початковий умовний діаметр, м;  $H = 2..3D$  – висота ділянки формування, м.

З використанням критерію Річардсона  $Ri$  розрізняють стабільні  $Ri > 1$ , нестабільні  $Ri < 1$  і нейтральні при  $Ri \approx 1$  умови атмосфери.

Згідно з визначенням  $Ri$  нейтральність настає при врівноваженості факторів дестабілізації і стабілізації атмосфери. Нейтральність стає більш вираженою при зменшенні середнього вітру. Спливання гальмується при поступовому зменшенні різниці густини струмини й навколишнього повітря. Сукупність окреслених явищ обумовлює формування «капельюшка гриба» на кінцевій висоті струмини. Процес формування «капельюшка» буде більш вираженим коли він потрапить в зустрічний «зверху - вниз» процес антициклонічної діяльності при певних синоптичних умовах.

Математична модель є моделлю динамічною та визначає основні параметри забрудненого купола теплого повітря, який формується над автотранспортним шляхопроводом або перехрестям. При його формуванні застосовувалася авторами теорія конвективної струмини з теплої поверхні.

Для розрахунку параметрів конвективної струмини використовуємо інтегральний метод Л. Ейлера. Даний підхід полягає в тому, що зміна кількості вхідних та вихідних рухів потоку в окреслений об'єм дорівнює сумі імпульсів об'ємних активних і реактивних сил.

Виділений циліндричний об'єм обмежується перерізом I-I, що є поверхнею тепловіддачі і концентрування об'єктів емісії (кількість одиниць автотранспорту). Діаметр  $D$ , м, призначається відповідно до розмірів транспортно-го вузла. Переріз II-II відповідає межі ділянки формування і основної ділянки конвективної струмини. Діаметр верхньої межі виділеного об'єму орієнтовно дорівнює діаметру  $D$ , м. Бічна поверхня циліндрична, для якої всі вектори підтікання повітря для формування конвективної струмини перпендикулярні вертикальній осі системи. Кількість теплоти за площею перехрестя або шляхопроводу  $S$ , м<sup>2</sup>, з умовним діаметром  $D$ , м, визначається залежністю:

$$Q_s = (\pi D^2 / 4) \cdot (R_a + R_c + R_t), \text{ МДж}, \quad (1)$$

де  $R_a$ ,  $R_c$  та  $R_t$  – відповідно, розсіяна й пряма радіації місцевості, що розглядається для заданого календарного місяця, та теплота яка

виділяється від автомобільних викидів на транспортному перехресті, МДж/м<sup>2</sup>.

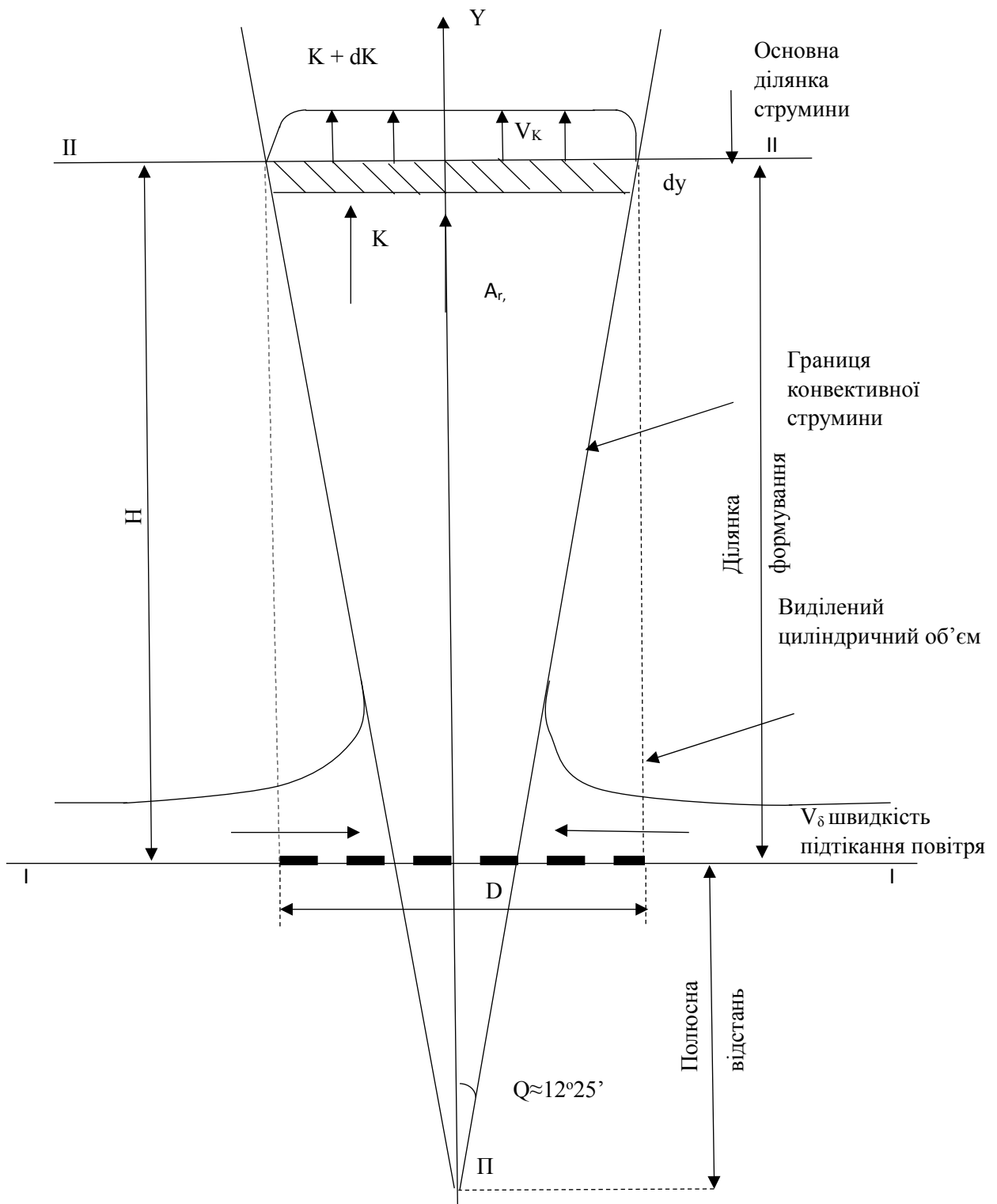


Рис. 1. Схема вільної конвективної струмини над нагрітою поверхнею шляхопроводу при нейтральних метеоумовах.

Теплоту від автомобілів знаходимо відповідно за залежністю:

$$Q_a = q_a \cdot N \cdot 40000, \text{ МДж}, \quad (2)$$

де  $q_a$  – середня витрата палива для одного автомобіля на 1 м шляху, л,  $N$  – кількість автомобілів, що визначається за кількістю смуг:

$$N = \frac{n \cdot L'}{\ell_{\text{авт}} + L}; \quad (3)$$

$\ell_{\text{авт}}$  – довжина автомобіля, м;  $n$  – кількість автомобільних смуг на шляхопроводі,  $L'$  – довжина однієї смуги, м, 40000 МДж/л – теплота, що розсіюється в навколишнє середовище на кожен літр бензину. У часи максимального завантаження (часи пік), робимо припущення щодо інтервалу між автомобілями  $L = 20$  м. Тоді на 1 км шляху в часи пік припадає 40 автомобілів:

За джерелом [17] можна знайти типовий склад вихлопних газів (вуглеводні  $\text{CH}_{1,85}$ ) за типом двигуна. Так, для сучасного автомобільного двигуна ця величина становить 7,5 г/(кВт·год).

При розрахунках середньої кількості викидів від автотранспорту приймаємо середню потужність одного автомобіля 100 кВт та рівномірний заїзд і виїзд з транспортного вузла автомобілів зі швидкістю 60 км/год.

Різницю між середньою температурою повітря на поверхні транспортного вузла та найвужчому перерізі теплової струмини, що підіймається вгору, а також середню швидкість повітря знаходимо за формулами конвективної теплопередачі:

$$\Delta t_{\text{уср}} = \frac{41 \cdot Q_s^{2/3}}{(y - y_0)^{5/3}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

$$V_{\kappa} = 0,56 \left( \frac{Q_s}{y - y_0} \right)^{0,33}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

де  $y - y_0$  – відстань від поверхні землі до найвужчого перерізу струмини конвективної теплоти, яке підіймається вгору, м.

Згідно з теорією конвективної струмини, формули (4) і (5) справедливі за умови  $y = 5D$ , однак для попередньої оцінки вони дають задовільні результати при  $y > y_0 = 2D$ .

Слід також мати на увазі, що наведені

формули застосовуються для конвективної струмини над прямокутним джерелом теплоти при співвідношенні сторін менш як 20, або над джерелом з співвідношенням сторін близькому до одиниці. У випадку шляхопроводу приймаємо умовний діаметр струмини, який окреслює площу, яка розглядається і відповідає даним вимогам.

Концентрація вуглеводнів від заданої кількості автотранспорту  $C_{\text{CH}}$  знаходиться в найвужчому перерізі забрудненої струмини.

#### Обговорення результатів дослідження.

У середовищі Excel 2016 запрограмовано зручний калькулятор розрахунку концентрацій забруднення від автотранспорту (рис. 3). У м. Києві на підставі розробленого за даною методикою калькулятора забруднення атмосферного повітря розраховані автомобільні перехрестя та автошляхопроводи. Розрахунки для найбільш забруднених шляхопроводів м. Києва показали, що концентрація в найвужчому перерізі забрудненого струмини, як правило, не перевищує 1 мг/м<sup>3</sup> та при зіставленні з даними моніторингових досліджень дає задовільні результати, похибка яких не перевищують 5% [9].

На рис. 2 представлено фрагмент розрахунку для липня місяця з середньої температурою 20,4 °С, коли на шляхопроводі знаходиться «в тисняві» одночасно 300 транспортних засобів з карбюраторними двигунами та графік залежності викидів вуглеводнів від кількості автомобілів на шляхопроводі. Ця залежність дозволяє прогнозувати внесок збільшення кількості особистого транспорту міста в розрізі глобальних кліматичних змін.

#### Можливості подальшого використання отриманих результатів.

Слід також відмітити необхідність подальших досліджень щодо розгляду інших шляхів емісій у питаннях забруднення атмосфери. Також необхідний подальший розвиток питань оцінки й прогнозу появи фотохімічного смогу над автотранспортними шляхопроводами залежно від основних впливових факторів цього процесу, і, в першу чергу, від температурних умов. Дані дослідження можуть бути використані при прийнятті оптимальних управлінських рішень на муніципальному рівні для ряду науково-практичних задач міста, а саме:

- оцінка викидів парникових газів від автотранспортних засобів;
- вплив даних викидів міста в розрізі глобальних кліматичних змін;
- оцінка ступеня екологічної безпеки міського середовища та ризику для здоров'я населення,

особливо на межі житлової забудови;

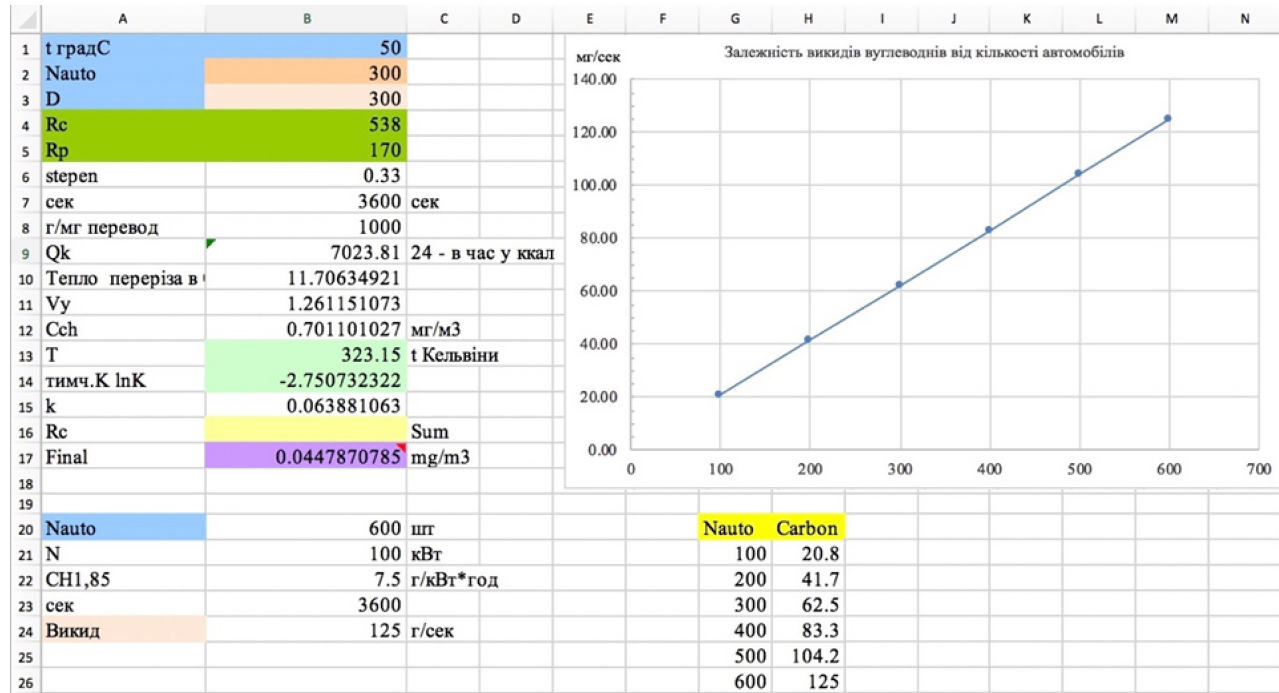


Рис. 3. Калькулятор залежності викидів вуглеводнів від кількості автотранспорту на шляхопроводі

– розробка нормативної бази та технологічних рішень щодо заходів пом'якшення наслідків кліматичних змін та поліпшення якості повітря;  
 – розробка планів та концепцій соціально-економічного розвитку міста.

Ефективність використання запропонованої математичної моделі може бути збільшена в поєднанні зі застосуванням "зелених конструкцій". Природним біологічним фільтром, який регулює забруднення повітря, є рослини. Вегетативні органи рослин сприяють осадженню пилоподібних частинок, поглинанню парникових газів, насиченню повітря киснем і фітонцидами. Завдяки випарному охолодженню рослини здатні знижувати температуру повітря для зменшення "ефекту теплового острова" урбоценозів.

У зв'язку з розростанням урбоценозів по горизонталі та вертикалі, кількість повноцінних зелених зон різко скорочується. Особливо страждають центральні міські райони з ущільненою забудовою і інтенсивним транспортним рухом. Вирішити дану проблему можливо за допомогою технологій "зелених конструкцій", під якими ми розуміємо архітектурно-будівельні елементи, поєднані з живими рослинами: покрівельне озеленення, фасадні зелені блоки, вертикальне озеленення, екопарковки, зелені схили. Біомаса цих технологій здатна активно секвеструвати CO<sub>2</sub>.

Нами розроблена методологія розрахунку накопичення біомаси "зеленими конструкція-

ми" і секвестрації нею CO<sub>2</sub> [18]. У перспективі планується проведення додаткових досліджень у даному напрямку.

**Висновки.** Огляд результатів моніторингових досліджень дозволив виявити закономірні процеси розподілення на урбанізованих територіях забруднювачів атмосферного повітря. Для великих транспортних міст найбільш потужним виявився формальдегід. Це викликало необхідність виділити фотохімічні перетворення та визначити структуру можливих варіантів перенесень. Формування як переважного фактора формальдегіду мало необхідні умови: наявність попередників (летючих вуглеводнів різного походження), температури атмосфери річний хід температур і температури теплового періоду), сонячного випромінювання (періоди ясних і хмарних днів).

Для створення передумов підвищення рівня екологічної безпеки навколо транспортних розв'язок м. Києва, запропонована математична модель оцінки стану атмосферного повітря над місцями великого скупчення автотранспорту. Кількість викидів вуглеводнів від автотранспортних засобів, яке отримано згідно з запропонованою моделлю, дозволяє врахувати ризики виникнення фотохімічного смогу при різних комбінаціях метеоумов місцевості (коли на природні процеси в атмосфері накладаються антропогенні емісії), а також оцінити частку викидів від автотранспорту в загальному об'ємі парникових газів міста. Результати досліджень

апробовані на основних автомобільних шляхопроводах м. Києва. Отриманий задовільний результат зіставлення даних розрахунків з моніторинговими дослідженнями в м. Києві дає підстави рекомендувати даний підхід для оцінки та прогнозу рівня екологічної безпеки атмосферного повітря на автомобільних шляхо-

проводах при формуванні екологічної політики міста. Одним з напрямків поліпшення екологічної безпеки міст є використання «зелених конструкцій», поєднаних з рослинами. Вони здатні секвеструвати CO<sub>2</sub> та знижувати температуру за рахунок «охолоджувального ефекту» рослин.

### Література

1. Города и изменение климата: Глобальный доклад о населенных пунктах 2011года / Программа ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат). Елект. доступ: <http://www.unhabitat.org/grhs/2011>.
2. Megacities and climate change- A brief overview / Gerd, A., Folberth, Timothy, M., Butler, William, J., Collins, Steven, T., Rumbold // Environment Pollution. – 2015. – №203. – с. 235-242.
3. Richard C. Flagan. Fundamentals of air pollution engineering / Richard C. Flagan, John H. Seinfeld. – California Institute of Technology, by Prentice-Hall, Inc. A Division of Simon & Schuster, Printed in the United States of America, 1988. – 542 p.
4. John H. Atmospheric chemistry and physics / John H., Seinfeld Spiros, N. Pandis. – A Wiley-Interscience Publication, Printed in the USA, QC879.6. S45,1997. – 1356 p.
5. Howard Brigman. Global air pollution, problems for the 1990s. / Howard Brigman. – CBS Publishers & Distributors, 1992. – 261 p.
6. Monitoring of atmospheric air. Problems of modeling and forecasting / V. V. Trofimovich, O. S. Voloshkina, M. M. Fandikova, I. V. Klimova, N. E. Zhuravska // Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management" / KNUBA, ITGIP NANU. – 2012. – № 10. – pp. 102-120.
7. Polishchuk S. Z. Estimation of the influence of meteorological factors on the state of atmospheric air pollution in the city of Dnipropetrovsk (on the example of formaldehyde) / Polishchuk S. Z., Dotsenko L. V., Demidenko A. S. // Construction, materials science, machine building: Starodubsky Readings. – 2015. – P.266-270.
8. Pryschevov O. F. Peculiarities of the dispersion of harmful substances of airborne vehicle emissions in the city / Pryschevov O. F., Levytska O. S. // Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University. Sir Technogenic safety. – 2009. – iss. 98. – pp.139-146.
9. Sipakov R. V Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv / Sipakov R. V., Trofimovich V. V., Voloshkina O. S., Bereznitskaya Y. O. // Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management" / KNUBA, ITGIP NANU. – 2018. – № 25. – pp. 44-51.
10. Aloyan A. E. Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere / Aloyan A. E. – Moscow: Nauka, 2008. – 415 p.
11. Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors / T. S. Selegay, N. N. Filonenko, V. A. Shlychkov, A. A. Lezhenin, T. N. Lenkovskaya // Optics of the Atmosphere and the Ocean. – 2013. – № 25(5). – pp. 422-426.
12. Андропов К. М. Пространственное распределение выбросов автотранспорта в крупных промышленных городах / К. М. Андропов // Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий». – 2011. – с. 11-17.
13. Эльтерман В. М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях / В. М. Эльтерман. – Москва: Химия, 1985. – 160 с.
14. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб.пособие для вузов / В. Н. Талиев. – Москва: Стойиздат, 1979. – С.295.
15. Berlyand M. E. Manual on the control of atmospheric pollution / M. E. Berlyand, G.I. Sidorenko. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. – 448 p.
16. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет. – Ленинград. Гидрометеоздат, 1986. – 90 с.
17. Atmosphere protection from industrial pollutions: ed. S. Kalvert and G. M. Inglund. – Moscow, 1988. – 760 p.
18. Ткаченко Т. М. Роль «зелених конструкцій» у зменшенні екологічного відбитку урбоценозів / Т.М. Ткаченко, О. С. Волошкіна // 5-й Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: збірник матеріалів. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – С. 31.

### References

1. *Goroda i izmenenie klimata: Globalnyi doklad o naseleennykh punktakh 2011goda. Programma OON po naseleennykh punktakh (OON-Khabitat)*. <http://www.unhabitat.org/grhs/2011>.
2. Gerd, A., Folberth, Timothy, M., Butler, William, J., Collins, Steven, T., Rumbold "Megacities and climate change-A brief overview." *Environment Pollution*, no. 203, 2015.
3. Richard C. Flagan, John H. Seinfeld. *Fundamentals of air pollution engineering*. California Institute of Technology, by Prentice-Hall, Inc. A Division of Simon & Schuster, Printed in the United States of America, 1988.
4. John H., Seinfeld Spiros, N. Pandis. *Atmospheric chemistry and physics*. A Wiley-Interscience Publication, Printed in the USA, QC879.6. S45,1997.
5. Howard Brigman. *Global air pollution, problems for the 1990s*. CBS Publishers & Distributors, 1992.
6. V. V. Trofimovich, O. S. Voloshkina, M. M. Fandikova, I. V. Klimova, N, E. Zhuravska. "Monitoring of atmospheric air. Problems of modeling and forecasting." *Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management"*, no. 10, KNUBA, ITGIP NANU, 2012, pp. 102-120.
7. Polishchuk S. Z., Dotsenko L. V., Demidenko A. S. "Estimation of the influence of meteorological factors on the state of atmospheric air pollution in the city of Dnipropetrovsk (on the example of formaldehyde)." *Construction, materials science, machine building: Starodubsky Readings*, 2015, pp. 266-270.
8. Pryshepov O. F., Levytska O. S. "Peculiarities of the dispersion of harmful substances of airborne vehicle emissions in the city." *Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University. Ser Technogenic safety*, iss. 98, 2009, pp.139-146.
9. Sipakov R. V., Trofimovich V. V., Voloshkina O. S., Bereznitskaya Y. O. "Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv." *Prob. Scientific works "Ecological safety and nature management"* no. 25, KNUBA, ITGIP NANU, 2018, pp. 44-51.
10. Aloyan A. E. *Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere*. Nauka, 2008.
11. Selegay T. S., Filonenko N. N., Shlychkov V. A., Lezhenin A. A., Lenkovskaya T. N. "Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors." *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, no. 25(5), 2013, pp. 422-426.
12. Andropov K. M. "Prostranstvennoe raspredelenie vybrosov avtotransporta v krupnykh promyshlennykh gorodakh." *Sbornik trudov III Vserossiiskoi naychno-prakticheskoi konferentsii «Aktualnye voprosy Vserossiiskoi naychno-prakticheskoi konferentsii «Aktualnye voprosy razvitiia sovremennoi nauki, tekhniki u tekhnologii»*, 2011.
13. Elterman V. M. *Okhrana vozduшной sredy na khimicheskikh i neftekhimicheskikh predpriiatiakh*. Khimiia, 1985.
14. Taliev V. N. *Aerodinamika ventiliatsii: Ucheb.posobie dlia vuzov*. Stroizdat, 1979.
15. Berlyand M. E., Sidorenko G. I. *Manual on the control of atmospheric pollution*, Gidrometeoizdat, 1979.
16. *Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет*. Гидрометеиздат, 1986.
17. *Atmosphere protection from industrial pollutions: ed. S. Kalvert and G. M. Inglund*, 1988.
18. Tkachenko T. M., Voloshkina O. S. "Rol «zelenykh konstruksii» u zmenshenni ekolohichnoho vidbytku urbotsenoziv." *5 Mizhnarodnii konhres "Zakhyst navkolyshnoho seredodyscha. Enerhooshchadnist. Zbalansovane prirodokoristuвання"*: zbirnyk materialiv, 2018. – p. 31.



УДК 504.064.2

## Конвективная модель распространения эмиссии выбросов на автотранспортном путепроводе при нейтральных метеоусловиях

О. С. Волошкина<sup>1</sup>, В. В. Трофимович<sup>2</sup>, И. В. Климова<sup>3</sup>, Р. В. Сипаков<sup>4</sup>, Т. М. Ткаченко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

<sup>4</sup>к.т.н., докторант. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина,  
[tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com), ORCID 0000-0003-2105-5951

*Аннотация. Анализ степени загрязнения атмосферного воздуха в городских районах определил её зависимость от растущего количества личных автотранспортных средств, работающих на традиционном топливе. В работе доказана возможность применения теории конвективной струи для оценки и прогноза загрязнения атмосферного воздуха мегаполисов в зависимости от метеоусловий и количества автомобилей, находящихся одновременно в «пробках» и «пробках» на автомобильном путепроводе. Для расчёта параметров конвективной струи используем интегральный метод Л. Эйлера. На основании рассмотренных основных путей распространения эмиссий в атмосфере, определены условия возникновения нейтрального состояния. Авторами представлена методика расчета количества выбросов углеводородов от автомобильного транспорта, является основанием для определения вторичного загрязнения формальдегидом атмосферного воздуха территорий мегаполисов в результате фотохимических превращений. Представленные исследования позволяют выделить долю выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в разрезе общих выбросов мегаполиса. На основании данной модели разработан калькулятор расчёта концентраций загрязнения от автотранспорта. Калькулятор позволяет использовать специально синтезированные внешние воздействия с последующей обработкой результатов наблюдений и с последующим анализом последствий. Эффективность использования предложенной математической модели может быть увеличена в сочетании с применением «зеленых конструкций». Предложенный в работе подход пригодится при поиске оптимальных управленческих решений на муниципальном уровне и формирования экологической политики города.*

*Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, теория конвективной струи, математическая модель, выбросы углеводородов.*

UDC 504.064.2

## Convective Model of Emission Distribution on the Road Overpass Under Neutral Weather Conditions

O. S. Voloshkina<sup>1</sup>, V. V. Trofimovich<sup>2</sup>, I. V. Klimova<sup>3</sup>, R. W. Sipakov<sup>4</sup>, T. M. Tkachenko<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [e.voloshki@gmail.com](mailto:e.voloshki@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-8398-0352

<sup>2</sup>PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [v.trofimovich@gmail.com](mailto:v.trofimovich@gmail.com)

<sup>3</sup>Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>Ph.D., doctoral student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com),  
ORCID 0000-0003-2105-5951

*Abstract. An analysis of the degree of atmospheric air pollution in urban areas showed its dependence on a growing number of personal vehicles operating on traditional fuels. This work proves the possibility of applying the theory of a convective jet for estimating and forecasting atmospheric air pollution in megacities, depending on weather conditions and the number of cars that are simultaneously in traffic jams in a car overpass. We use the integral Euler method to calculate the parameters of a convective jet. The conditions for the appearance of neutral ways are determined and based on the considered main ways of distribution of emissions in the atmosphere. The method for calculating the amount of hydrocarbon emissions from road transport was used to determine the secondary pollution by formaldehyde of atmospheric air into the territories of megalopolises as a result of photochemical transformations. The presented studies allow to single out the share of greenhouse gas emissions from road transport in the context of total emissions in a megacity. A method for calculation of concentrations of pollution from motor vehicles based on this model has been developed. This method allows the use of specially synthesized external influences with the subsequent processing of the results of observations and subsequent analysis of the consequences. The effectiveness of the proposed mathematical model can be increased in combination with the use of "green structures". This method is suitable for finding optimal management decisions at the municipal level and the formation of the environmental policy of the city.*

*Keywords: air pollution, theory of convective jet, mathematical model, hydrocarbon emissions.*

Надійшла до редакції / Received 11.09.2018