

УДК 502/504+514.18

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.28

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ І ЛОКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРУВАННЯ ПОЛЮТАНТІВ У ПРИДОРОЖНЬОМУ ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ

О. Є. КОФАНОВ

Кафедра інженерної екології, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, УКРАЇНА
email: aleckof@protonmail.com

АНОТАЦІЯ Дослідження дорожніх умов та виявлення об'єктів підвищеного екотоксикологічного впливу з боку автотранспорту в м. Києві дало змогу за допомогою програмного комплексу MathCad створити просторові моделі та побудувати поля розсіювання емітентів відпрацьованих газів автомобілів (наприклад чадного газу CO), а також визначити умови розповсюдження забруднювачів до і після модифікації моторного палива дизельної складової транспортного потоку розробленими багатофункціональними присадками й добавками оксигенатного біокомпоненту. Розроблена та апробована методика короткострокового прогнозування забруднення придорожного міського повітряного простору основними поллютантами викидів автотранспортних засобів. За дискретно-інтерполяційного підходу враховано геометричні особливості лінійних джерел забруднення, уточнено локальні забруднення придорожного простору й прилеглих до автомагістралей територій. Визначено екологічний ефект від модифікації моторного дизельного палива розробленою багатофункціональною присадкою. Доведено, що при гіпотетичному застосуванні розробленої присадки ізоконцентрації токсикантів наближаються до гранично-допустимих значень на меншій відстані від лінійного джерела викиду (автомагістралі).

Ключові слова: автотранспорт; забруднення атмосферного повітря; поллютанти; придорожній повітряний простір; розсіювання домішок у повітрі.

MODELING OF DISPERSION AND LOCAL CONCENTRATION OF POLLUTANTS IN THE ROADSIDE AIRSPACE

O. KOFANOV

Environmental Engineering Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT It has been determined that air pollution in many cities, including Kyiv, is dangerous for humans and causes serious environmental problems and risks. In addition, the high number of diesel vehicles in the country requires an investigation of the impacts of their emissions on the environment and human health. The problem is also intensified by the fact that in recent years in Ukraine the tendency of the old vehicles usage with engines of ecological classes below Euro-3 can be observed. Therefore, the purpose of the study is to develop and implement spatial models of dispersion and localization of the main toxicants of exhaust gases near motorways (roadside territories).

So, the study of road conditions and the detection of objects of the increased ecotoxicological influence from the motor transport in Kyiv allowed to create spatial models and visualize dispersion fields of contaminants of exhaust vehicle gases (for example, carbon monoxide CO) by MathCad software system. It also allowed to determine distribution conditions of the pollutants before and after the modification of diesel motor fuel by the developed multifunctional additives and oxygenate biocomponent. The method of short-term forecasting of the roadside urban airspace pollution by the main pollutants of motor vehicle emissions has been developed and tested. By the discrete-interpolation approach, the geometric features of linear pollution sources were taken into account; the local pollution of roadside areas was specified. The environmental effect of the modification of the motor diesel fuel by the developed multifunctional additive has been determined.

Keywords: motor transport; atmosphere pollution; pollutants; roadside airspace; dispersion of impurities in the air.

Вступ

Транспортну магістраль можна розглядати і моделювати як лінійне джерело викидів, закономірності розповсюдження поллютантів поряд з яким залежать від висоти джерела викидів над рівнем поверхні, стратифікації атмосфери, швидкості вітру, вологості, умов руху та характеристик транспортного потоку (ТП), орографії підстилаючої поверхні, характеру й щільності міської забудови (МЗ) тощо [1–3].

Рослинність, особливо високі дерева, також

сильно впливають на зміну характеристик вітрового потоку й особливості розподілу поллютантів у приземному повітряному шарі. Відбувається часткове поглинання й внаслідок цього певне очищення повітря від шкідливих домішок. Водні об'єкти, розташовані на території міста, чинять вплив на кліматичні й метеорологічні умови території, частково абсорбуючи шкідливі речовини (ШР) та створюючи геохімічні бар'єри для їх подальшого розповсюдження.

Отже, задача моделювання руху повітряних мас та

прогнозування умов розсіювання ШР у міському повітряному середовищі ускладнена особливостями рельєфу місцевості, неоднорідністю МЗ, іншими важливими чинниками, які потрібно враховувати при розрахунках обсягів забруднень та визначенні полів концентрацій токсикантів, особливо на локальному рівні.

Актуальність проблеми

За оцінками фахівців, тільки 15,3 % населення України мешкає в умовах слабого забруднення атмосферного повітря, тоді як 52,8 % населення – в умовах значного забруднення, 24,3 % – сильного та 7,6 % – дуже сильного забруднення повітряного середовища [4; 5]. Встановлено, що забруднення повітря у багатьох містах є небезпечним для людини. Навіть столиця України, м. Київ, за даними Міністерства екології та природних ресурсів України [6], майже кожного року входить до списку міст з найбільшим ступенем забруднення повітря, а, отже, і до переліку міст з серйозними екологічними проблемами, ризиками підвищення захворюваності населення тощо.

Міською маршрутною мережею столиці щоденно перевозиться 1569 тис. пасажирів [7]. За 2016 р. пасажирськими автобусами (з урахуванням перевезень підприємцями малого бізнесу) перевезено 2024892,9 тис. пасажирів, причому майже 77,5 % цих перевезень здійснювалось на дизельному паливі (ДП). Серед легкових пасажирських автомобілів цей показник скорочується до 18,4 %, а перевезення, здійснені дизельним нелегковим спеціальним транспортом, становлять 54,6 % від загальної протяжності пробігу автотранспортних засобів (АТЗ).

Таким чином, висока частка застосування в економіці країни саме дизельного автотранспорту потребує досліджень щодо впливу їх викидів на довкілля й здоров'я людей. Проблема посилюється тим, що останніми роками в Україні встановилась тенденція експлуатації уживаних АТЗ з двигунами екологічних класів нижче за Євро-3. При цьому регламентований термін служби, наприклад, сажового фільтру чи каталітичного нейтралізатору сучасного АТЗ становить ~30–150 тис. км пробігу, а, отже, необхідність заміни комплектуючих виникає приблизно раз на рік. Зрозуміло, що не всі автокористувачі це роблять, особливо з огляду на те, що такий ремонт і заміна є досить дорогими, а технічні зміни, що стосуються відповідності АТЗ заявленим виробником екологічним нормам, офіційно не контролюються. І такий стан спостерігається не тільки в нашій країні, а й майже по всьому світу.

Постановка проблеми і аналіз попередніх досліджень

Серед учених, що розробляли моделі розсіювання ШР у повітряному середовищі відзначимо М. Є. Берлянда, І. Д. Лоеву, Д. А. Белікова, Ф. В. Коршенка, В. Г. Свинухова, а також

Є. М. Кіптенка і Т. В. Козленко. Великий внесок у довгострокові та короткострокові методи прогнозування стану міського атмосферного повітря зробили М. М. Беляєв, Е. А. Закарін і В. Ф. Крамар, С. Д. Кузниченко, Л. Д. Пляцук, А. В. Старченко, В. М. Шмандій та інші провідні вчені. Важливим методом дослідження розсіювання газоподібних домішок у повітрі є моделювання процесів атмосферної дифузії у аеродинамічних трубах (М. З. Згуровський).

О. С. Левицька та О. Ф. Прищепов, вивчаючи процеси розсіювання повітряного потоку в умовах МЗ, побудували модель руху забруднених повітряних мас, що враховує орографію підстилаючої поверхні [8], а Е. М. Парашук з колегами [9] визначили основні фактори, що найбільшою мірою впливають на режим розсіювання шкідливих домішок у міському атмосферному просторі. Це, по-перше, гідродинамічний фактор, обумовлений формуванням вихревих потоків поблизу будівель, а інший – фактор геометричний. Причому останній тісно пов'язаний із взаємодією ШР з поверхнею перешкод, що сприяє додатковому розсіюванню забруднювачів у напрямі, перпендикулярному середньому вітру, а також створює "тіньові" або "застійні" зони за будівлями.

О. О. Бакулічем з колегами запропоновано представляти архітектурно-планувальні фрагменти МЗ як сукупність елементарних фрагментів – вуличних каньйонів (ВК), що мають певні просторово-геометричні характеристики [10; 11]. При дослідженні умов руху повітряних мас ВК повздовж автомагістралі використовується спеціальна аеродинамічна характеристика – коефіцієнт ажурності МЗ, який дорівнює відношенню площі проекції розривів між будинками на лінію магістралі до загальної площі проекції фронту МЗ на цю лінію [10, с. 18]. Автори також враховують композицію забудови, яка характеризується середнім кутом повороту будинків до осі вулиці або магістралі [12].

Для дослідження впливу автомагістралі або її ділянки на якість міського атмосферного повітря А. В. Рузьким та В. В. Донченком розроблена методика інвентаризації викидів ЗР АТЗ, яка, по-перше, гармонізована з чинною міжнародною методикою інвентаризації ЗР ЕМЕР/CORINAIR, а, по-друге, надає можливість розраховувати викиди АТЗ з урахуванням особливостей національного автопарку [13; 14]. Відомо також декілька дисертаційних та інших досліджень, присвячених моделюванню й прогнозуванню рівня забруднення атмосфери великого міста (О. А. Рибаківа, Н. Г. Левашова, А. В. Ольчев, І. Ю. Шалигіна, І. Н. Кузнецова, Н. М. Резанова, С. А. Чернявський та ін.), промислових центрів (К. М. Антропов), території уздовж напруженої магістралі (М. М. Беляєв і Т. І. Русакова), у тому числі й за допомоги біомоніторингу, біоіндикації (А. Ф. Мейсуро́ва, А. А. Нотов, А. В. Несова) та ГІС-технологій. Деякі з учених спираються на описані вище методики, хоча більшість з них потребують потужного комп'ютерного забезпечення і

можуть бути реалізовані лише на базі великих наукових центрів.

Серед сучасних зарубіжних праць, у яких висвітлено результати досліджень щодо моделювання та оцінки стану придорожного повітряного простору, на особливу увагу заслуговують [15–19]. Результати досліджень щодо впливу забруднень на якість атмосферного повітря та здоров'я людей, а також щодо динаміки викидів поллютантів подано у [20–22].

Зауважимо, що у місті, як правило, виокремлюють декілька шарів повітряного простору з певними особливостями вітрового режиму. Зокрема нижній шар повітря знаходиться на висоті від поверхні землі і приблизно до дахів висотних будівель, тому швидкість вітру в ньому визначається характером і щільністю МЗ та може змінюватися як за величиною, так і за напрямком. При цьому вітрові потоки на бокових поверхнях забудови та над дахами мають дещо більшу швидкість, а перед будівлями створюються умови для гальмування потоків і формування внаслідок цього застійних зон. За будинками, як правило, відбувається дуже складний рух потоків, який залежить від типу і щільності МЗ та визначається коефіцієнтом ажурності.

Другий виокремлений шар повітряного середовища знаходиться на висоті від рівня дахів будівель і до висоти, де все ще спостерігається вплив МЗ, а третій шар розташований на висотах, де цей вплив майже не відчувається [23]. Об'єктом нашого дослідження є перший, нижній шар повітряного середовища, який ми у подальшому розподілимо на чотири підрівні залежно від сили впливу автомагістралі на навколишнє середовище та організм людини. Тобто межі досліджуваних підрівнів визначаються висотою подиху дорослої людини та дітей різного віку й зросту.

Зазначимо, що більшість з фундаментальних теоретичних моделей, що базуються на розв'язанні рівнянь атмосферної турбулентної дифузії (ТД), як правило, застосовуються сьогодні тільки для наукових цілей, оскільки потребують серйозного програмного забезпечення й великої кількості експериментального й розрахункового матеріалу. Навіть напівемпіричні моделі потребують чисельного розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Таким чином, незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених моделюванню та прогнозуванню якості й стану атмосферного повітря, до сьогодні все ще не існує загально визнаної моделі розповсюдження шкідливих домішок в атмосфері. Це спричинено як багатопараметричністю досліджуваного процесу, так і складністю явищ, що відбуваються в навколишньому середовищі. Моделі, що вважаються універсальними, призначені, як правило, для моніторингу повітряного середовища всього міста та не враховують геометричних особливостей автотранспортних шляхів, що створюють геохімічні бар'єри на шляху забруднених повітряних мас.

Мета роботи

Метою роботи є розробка та впровадження просторових моделей розсіювання й локалізації основних токсикантів відпрацьованих газів АТЗ поблизу автомагістральних та вуличних територій.

Викладення основного матеріалу

Рівень небезпеки забруднення атмосферного повітря для здоров'я людини визначають найбільшою величиною концентрації певного забруднювача, що розраховується за небезпечних метеорологічних умов – у найтепліший місяць року в місті та при небезпечній швидкості вітру. При дослідженні турбулентної дифузії зазвичай застосовують два основні підходи. Перший полягає у розв'язуванні рівняння ТД зі сталими коефіцієнтами на основі закону Фіка, а другий – у пошуку величин концентрації шкідливих домішок за формулами, отриманими статистичними методами (метод описаний Сеттоном, який застосовує закон розподілу Гауса для визначення полів концентрації домішок поблизу джерела забруднення [24]). Для стаціонарних джерел також застосовують гаусові моделі, які хоча й не враховують рельєф місцевості та властивості підстилаючої поверхні, але корегуються спеціальними емпіричними коефіцієнтами [25].

Найбільш адекватно процес розсіювання ШР у приземному шарі повітряного середовища описується диференціальним рівнянням ТД і потребує чисельних або аналітичних розв'язків рівняння [23; 26]. У нашому дослідженні для визначення геоекологічного стану приземного шару атмосферного повітря й прогнозування рівня екологічної небезпеки ділянок придорожніх територій міста, а також з метою мінімізації шкідливого впливу з боку автотранспорту на довкілля й здоров'я людей, окрім зазначених підходів, пропонується також застосовувати дискретні геометричні моделі, які надають змогу моделювати складні й стохастичні процеси, що відбуваються у досліджуваному шарі повітря, а також на поверхні придорожньої території [27].

Для аналізу динаміки забруднення придорожного простору поряд з напруженими магістралями м. Києва нами досліджувались транспортні потоки та розраховувались обсяги викидів ШР з ВГ автомобілів. Зокрема нашу увагу привернули вихлопи оксиду Карбону (II) дизельними моторами на експериментальній ділянці (рис. 1).

Для встановлення закономірностей розсіювання основних забруднювачів повітря у міському придорожному просторі від вихлопів дизельного автотранспорту нами побудовано просторові математичні моделі забруднень, створено алгоритм та розроблено комп'ютерні програми для розрахунку коефіцієнтів турбулентної дифузії газів і приземних концентрацій поллютантів. Для побудови моделей і програми було використано методіку, описану в роботі [28], яка полягає в тому, що в програмному комплексі

MathCad реалізується модель факельного наближення та розв'язуються рівняння для лінійного джерела як сукупності точкових джерел викидів, показані на рис. 2.

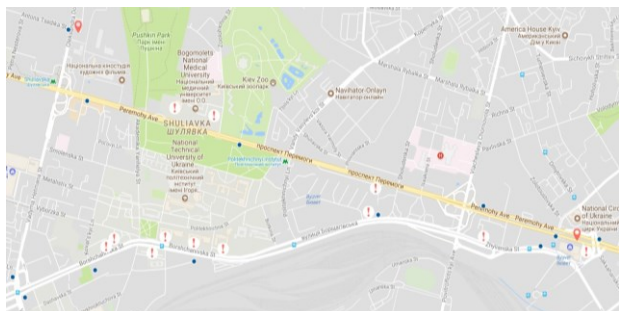


Рис. 1 – Карта експериментальної ділянки по вул. Борщагівській (м. Київ) та місця розташування постів спостережень за транспортними потоками

На рисунку прийнято такі позначення: M – потужність джерела викиду (маса ЗР, що викидається джерелом забруднення в одиницю часу), n – показник степені у формулі залежності швидкості вітру від висоти z ($u = u_1 z^n$); u_1 – коефіцієнт пропорційності у цій залежності; k_1 – коефіцієнт пропорційності у формулі залежності коефіцієнта ТД від висоти ($k = k_1 z$); ϕ_0 – стандартне відхилення для пульсацій напрямку вітру; H – висота автомагістралі над поверхнею землі; x – координата уздовж напрямку вітру; y – координата у поперечному напрямі.

$$Q(x, y) := \frac{M}{(1 + nf) \cdot k_1 \cdot \phi_0 \cdot x^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[u_1 \cdot \frac{h^{1+nf}}{k_1 \cdot (1 + nf)^2 \cdot x} - \frac{y^2}{2 \cdot \phi_0^2 \cdot x^2} \right]$$

$$a(x, y) := x \cdot \cos(\beta) + y \cdot \sin(\beta)$$

$$b(x, y) := y \cdot \cos(\beta) - x \cdot \sin(\beta)$$

$$Q_p(x, y) := \int_{L1}^{L2} Q(a(x, y) - L \cdot \sin(\beta), b(x, y) - L \cdot \cos(\beta)) dL$$

$$n := 20 \quad m := 20 \quad i := 1..n - 1$$

$$j := 0..m - 1 \quad x_i := 100 \cdot i \quad y_j := 100 \cdot j$$

$$Q_{A, i, j} := \frac{Q_p(x_i, y_j)}{PDK}$$

Рис. 2 – Формули для розрахунку за моделлю розсіювання домішки CO у повітряному міському середовищі поблизу напруженої автотранспортної магістралі [28]

Система координат орієнтована таким чином, щоб вісь OX співпадала з напрямком вітру, а вісь OY – з напрямком транспортного потоку. Отже, а і b – координати в цій перенапрявленій по вітру системі координат, які безпосередньо пов'язані з первісними координатами (рис. 2); L – відстань уздовж відрізка

автомагістралі.

Обговорення результатів

Важливим моментом інтерпретації результатів моделювання є побудова полів концентрацій забруднення придорожньої території певними поллютантами та її зонування за небезпечними для здоров'я людини рівнями. Наприклад, автором [29] встановлено, що рівень загазованості повітря на узбіччі дороги на висоті 40 см (відповідає рівню подиху маленьких дітей) у декілька разів перевищує забруднення на висоті 1,7 м (відповідає рівню подиху дорослого). Отже, рух пішоходів по тротуарах або очікування транспорту на зупинках поряд з дорогою, перехрестях чи перетинах може бути небезпечним.

На рис 3 показано результат моделювання забрудненя повітря чадним газом, що викидається в атмосферне повітря автотранспортними засобами. Для побудованих математичних моделей нами запропонована така градація оцінювання рівня забруднення придорожного повітряного простору:

- екологічно небезпечне, якщо кратність перевищення ГДК домішки становить від 8,0 ГДК та вище;
- високе, якщо це відношення від 4,4 до 8,0;
- середнє – кратність перевищення концентрації ШР від 1 до 4,4 ГДК;
- екологічно безпечний рівень, якщо немає перевищення ГДК.

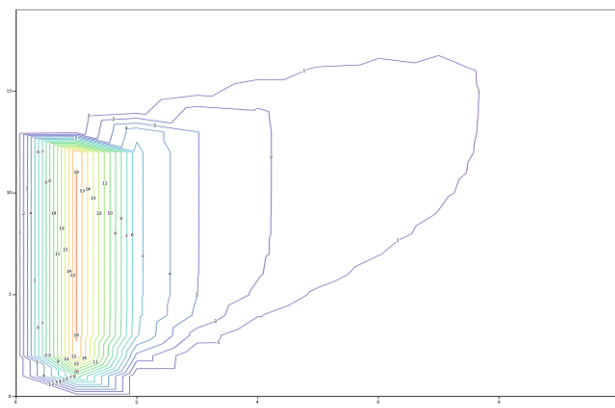


Рис. 3 – Результати моделювання полів розсіювання домішки CO за умов використання традиційного ДП

Градація відповідає державним санітарним правилам охорони атмосферного повітря міст від забруднення токсичними речовинами, а також враховує взаємозв'язок між окремими техногенними і природними, в тому числі й кліматичними та метеорологічними чинниками. Аналогічний розподіл безпечного стану атмосферного повітря у придорожному просторі запропонований і дослідниками В. О. Хабаровим та В. В. Верченком [30], які вважають:

- якщо концентрація, наприклад, оксиду Карбону (II) становить до 3 мг/м³, такий стан повітря є екологічно безпечним;

- при концентрації CO від 3–5 мг/м³ стан атмосферного повітря слабо небезпечний;
- якщо концентрація CO становитиме від 5–20 мг/м³, то стан повітря помірно небезпечний;
- при концентрації чадного газу від 20 мг/м³ та вище стан повітря стає екологічно небезпечним [31].

Проте їх градація не враховує комплексного забруднення території одночасно декількома ШР (для цього потрібно створювати іншу шкалу), а також геометричні особливості руху автотранспорту досліджуваними ділянками. Останню задачу можна вирішити впровадженням дискретно-інтерполяційного підходу до побудови геометричних моделей забруднення придорожного приповерхневого шару повітря. На рис. 4 показано результат моделювання гіпотетичного забруднення повітряного середовища на ділянці досліджуваного транспортного коридору при використанні розробленої нами багатофункціональної присадки до ДП.

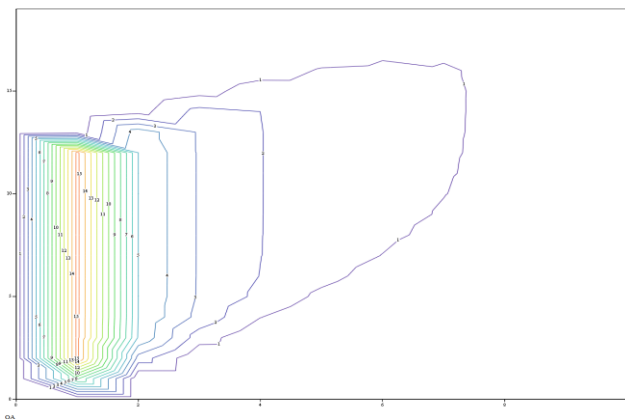


Рис. 4 – Результат моделювання полів розсіювання домішки CO за умов використання модифікованого присадкою ДП

Для прикладу як ШР обрано оксид Карбону (II), а всі геометричні координати прив'язано до додатку GoogleMap. Для побудови моделі визначено частку дизельного автотранспорту в транспортному потоці, що рухається досліджуваним транспортним коридором, та розраховано гіпотетичне скорочення викидів ЗР. Як можна побачити за полями розсіювання токсиканту, більш безпечний рівень забруднення буде досягнутий на меншій відстані від дороги.

Висновки

Таким чином, у роботі визначено об'єкти високого екоотоксикологічного впливу (на прикладі транспортних коридорів столиці України) та побудовано й візуалізовано математичні моделі полів розсіювання основних поллютантів навколишнього середовища, які є емітентами відпрацьованих газів автомобілів (зокрема, чадного газу CO). Визначено умови розповсюдження забруднювачів до і після модифікації палива дизельної складової транспортного потоку розробленою багатофункціональною присадкою з добавками біокомпоненту.

Список літератури

1. **Комаров, Ю. Я.** Технология очистки городских автомагистралей от вредных выбросов транспортных потоков / **Комаров Ю. Я., Федотов В. Н., Колесников С. В.** // *Экологические системы и приборы.* – 2004. – № 1. – С.21–24.
2. **Прищепов, О.Ф.** Оцінка стану забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю на автомагістралях міста Миколаєва / **Прищепов О.Ф., Левицька О.С.** // *Наукові праці: наук.-методич. журнал.* – т. 77. – Вип.64. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – С. 70–74.
3. **Марчук, Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / **Г. И. Марчук.** – М.: Наука. – 1982. – 320 с.
4. **Бучавий, Ю. В.** Прогнозування ризиків для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря викидами підприємств Дніпропетровської області: дис. ... канд. біол. наук: 14.03.11. Київ, 2017. 264 с.
5. Атмосферне повітря. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2013 році. – К.: Мін. екології та прир. ресур. України, 2015. – С. 17–31.
6. Міністерство екології та природних ресурсів України. URL: <https://menr.gov.ua>.
7. Програма економічного і соціального розвитку м. Києва на 2017 рік. – К.: Виконавчий орган Київської міської ради (Київська міська державна адміністрація), 2016. – 187 с.
8. **Левицькая, О. С.** Модель движения загрязненных воздушных масс с учетом орографии подстилающей поверхности. Безопасность деятельности человека. Продукты, которые вас убивают! / **О. С. Левицькая.** URL: <http://kk.convdocs.org/docs/index-193225.html>.
9. **Паращук, Е. М.** Результаты моделирования распространения выбросов автотранспорта на ограниченной территории города / **Паращук Е. М., Коваль В. Н., Прокопенко М. Н.** // *Экологические системы и приборы.* – 2007. – № 3. – С.56 – 59.
10. **Бакуліч, О. О.** Потенційна екологічна небезпека вуличних каньйонів міста / **Бакуліч О. О., Олійник Р. В., Самойленко Є. С.** // *Вісник Нац. транспортного ун-ту.* – Вип. 1 (31). – 2015. – С. 18–26.
11. **Wang, G.** Modelling urban traffic air pollution dispersion / **G. Wang, F. H. M. van den Bosch, M. Kuffer** // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* – 2008. – v. XXXVII. – Part B8.
12. **Santiago, J. L.** Modelling the air flow in symmetric and asymmetric street canyons. / **José Luis Santiago, Fernando Martín** // *International Journal of Environment and Pollution.* – 2005. – v. 25, № 1-4. – P. 145–154.
13. **Рузский, А. В.** Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух / **А. В. Рузский, В. В. Донченко, Ю. И. Кунин, В. А. Петрухин и др.** URL: <http://www.opengost.ru/iso/3174-raschetnaya-instrukciya-metodika-po-inventarizacii-vybrosov-zagryaznyayuschih-veschestv-avtotransportnymi-sredstvami-v-atmosfernyy-vozduh.html>.
14. **Донченко, В. В.** Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения / **В. В. Донченко, Ю. И. Кунин, А. В. Рузский, В. А. Виженский** // *Журнал автомобильных инженеров.* – 2014. – №3(86). – С. 44-51.

15. **Wang, A.** Characterizing near-road air pollution using local-scale emission and dispersion models and validation against in-situ measurements / **A. Wang, M. Fallah-Shorshani, J. Xu, M. Hatzopoulou** // *Atmospheric Environment*. – 2016. – № 142. – P. 452–464. – doi:10.1016/j.atmosenv.2016.08.020.
16. **Thunis, P.** Overview of current regional and local scale air quality modelling practices: Assessment and planning tools in the EU / **P. Thunis, A. Miranda, J. M. Baldasano, N. Blond et al.** // *Environmental Science & Policy*. – 2016. – № 65. – P. 13–21. – doi:10.1016/j.envsci.2016.03.013.
17. **Sayegh, A.** Understanding how roadside concentrations of NO_x are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees / **Sayegh, A., Tate, J. E., Ropkins, K.** // *Atmospheric Environment*. – 2016. – № 127. – P. 163–175. – doi:10.1016/j.atmosenv.2015.12.024.
18. **Cabaneros, S. M. S.** Hybrid Artificial Neural Network Models for Effective Prediction and Mitigation of Urban Roadside NO₂ Pollution / **Cabaneros, S. M. S., Calautit, J. K. S., Hughes, B. R.** // *Energy Procedia*. – 2017. – № 142. – P. 3524–3530. – doi:10.1016/j.egypro.2017.12.240.
19. **Lee, M.** Land use regression modelling of air pollution in high density high rise cities: A case study in Hong Kong / **M. Lee, M. Brauer, P. Wong, R. Tang et al.** // *Science of The Total Environment*. – 2017. – № 592. – P. 306–315. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.094
20. **Tong, Z.** Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building / **Z. Tong, Y. Chen, A. Malkawi, G. Adamkiewicz et al.** // *Environment International*. – 2016. – № 89–90. – P. 138–146. – doi:10.1016/j.envint.2016.01.016.
21. **Huang, G.** An integrated Bayesian model for estimating the long-term health effects of air pollution by fusing modelled and measured pollution data: A case study of nitrogen dioxide concentrations in Scotland / **Huang, G., Lee, D., Scott, M.** // *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*. – 2015. – № 14–15. – P. 63–74. – doi:10.1016/j.sste.2015.09.002.
22. **Wang, R.** Trend in Global Black Carbon Emissions from 1960 to 2007 / **R. Wang, S. Tao, H. Shen, Y. Huang et al.** // *Environmental Science & Technology*. – 2014. – № 48(12). – P. 6780–6787. – doi:10.1021/es5021422.
23. **Абрамовський, С. Р.** Атмосфера великих міст. / **Абрамовський С. Р., Карплюк В. І., Переметчик М. М.** . – Дніпропетровськ.: Наука і освіта, 2011. – 350 с.
24. **Берлянд, М. Е.** Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / **Берлянд М. Е.** – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 449 с.
25. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Общесоюзный нормативный документ (ОНД-86). – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
26. **Бучавий, Ю. В.** Алгоритм вычисления вертикальной турбулентной диффузии загрязнителей в атмосфере по метеорологическим данным / **Ю. В. Бучавий, В. Е. Колесник** // *Матер. міжнар. конф. "Формум гірників – 2011"*. – Д.: Держ. вищий навч. заклад "Національний гірничий університет", 2011. – С. 144 – 149.
27. **Кофанов, А. Е.** Геоэкологические аспекты моделирования локального загрязнения приземного атмосферного воздуха отработавшими газами автотранспортных средств / **А. Е. Кофанов, Ю. Р. Холковський** // *Горная механика и машиностроение*. – 2017. – № 4. – С. 20–33.
28. **Холоднов, В. А.** Системный анализ и принятия решений. Технология вычислений в системе компьютерной математики Mathcad: учебное пособие / **В. А. Холоднов, В. П. Дьяконов, В. В. Фонарь та ін.** – Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ), 2013. – 154 с.
29. **Коломієць, С. В.** Аналіз проблеми впливу вихлопних газів автомобіля на здоров'я дітей / **С. В. Коломієць** // *Збірка тез XII Міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених "Екологія. Людина. Суспільство"* (13–17 травня 2009 р., м. Київ). – К.: НТУУ "КПІ". – С. 245.
30. **Хабаров, В. О.** Гнучка мобільна комп'ютеризована система екологічного моніторингу наземних транспортних систем / **В. В. Хабаров, В. О. Верченко** // *Автомобільний транспорт*. – 2009. – № 25.
31. **Кузьмин, Д. М.** Технология и методы интеллектуального мониторинга автотранспортных потоков и состояния автомобильных дорог: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.01. М.: МАДИ, 2008. – 21 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Komarov, Yu. Ya. et al.** Tekhnologiya Ochistki Gorodskikh Avtomagistralей Ot Vrednykh Vybrosov Transportnykh Potokov [Technology Of Cleaning Urban Highways From Harmful Emissions Of Traffic Flows]. *Ekologicheskie Sistemy I Pribory [Ecological Systems And Devices]*, no. 1, 2004, pp. 21–24.
2. **Pryshchepov, O. F., and O. S. Levyt'ska.** Otsinka Stanu Zabrudnennia Atmosfernoho Povitria Oksydom Vuhletsiu Na Avtomahistraliakh Mista Mykolaieva [Assessment Of Air Pollution By Carbon Monoxide At The Mykolaiv Motorways]. *Naukovi Pratsi: Nauk.-Metodych. Zhurnal Tekhnohenna Bezpeka [Scientific Works: Scientific And Methodological Journal Technological Safety]*, vol 77, no. 64, 2008, pp. 70–74.
3. **Marchuk, G. I.** *Matematicheskoe Modelirovanie V Probleme Okruzhayushchey Sredy [Mathematical Modeling Of The Environmental Problems]*. Nauka [Science], 1982, p. 320.
4. **Buchavyy, Yu. V.** Prohnozuvannia Ryzhykiv Dlia Zdorovia Naseleння Vid Zabrudnennia Atmosfernoho Povitria Vykydamy Pidpryemstv Dnipropetrovskoi Oblasti. Shpyuk National Medical Academy Of Postgraduate Education: dis. ... cand. Biol. Nauk 14.03.11 [Forecasting Of The Population Health Risks From Air Pollution Caused By Emissions From Enterprises Of The Dnipropetrovsk Region. PhD. Biol. Sci. Diss.]. Kiev, 2017, 264 p.
5. Min. ekolohii ta pryг. resur. Ukrainy [Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine]. *Atmosferne Povitria. Natsionalna Dopovid Pro Stan Navkolyshnoho Pryrodnoho Seredovyshcha V Ukraini U 2013 Rotsi [Atmospheric Air. National Report On The State Of The Environment In Ukraine In 2013]*. Kyiv, 2015, pp. 17–31.
6. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Available at : <https://menr.gov.ua>.
7. Vykonavchyi orhan Kyivskoi miskoi rady (Kyivska miska derzhavna administratsiia) [Kyiv city state administration]. *Prohrama Ekonomichnoho I Sotsialnoho Rozvytku M. Kyieva Na 2017 Rik [Program Of Economic And Social Development For Kyiv In 2017]*. Kyiv, 2016, p. 187.
8. **Levitskaya, O. S.** *Model' Dvizheniya Zagryaznennykh Vozdushnykh Mas S Uchetom Orografii Podstilyayushchey Poverkhnosti. Bezopasnost' Deyatel'nosti Cheloveka Produkty, Kotorye Vas Ubivayut! [The Motion Model Of Polluted Air Masses That Takes Into Account The Orography Of The Underlying Surface. Safety Of Human Activities Products That Can Kill You!]*. Available at: <http://kk.convdocs.org/docs/index-193225.html>.
9. **Parashchuk, E.M. et al.** Rezul'taty Modelirovaniya

- Rasprostraneniya Vybrosov Avtotransporta Na Ogranichennoy Territorii Goroda [Results Of The Modeling Of Distribution Of Motor Vehicle Emissions In A City Limited Area]. *Ekologicheskie Sistemy I Pribory [Ecological Systems And Devices]*, 2007, no. 3, pp. 56–59.
10. **Bakulich, O. O. et al.** Potentsiina Ekolohichna Nebezpeka Vulychnykh Kanioniv Mista [Potential Ecological Danger Of The City Canyons]. *Visnyk Nats. Transportnoho Un-Tu [Bulletin Of The National Transport University]*, 2015, vol 1, no. 31, pp. 18–26.
 11. **Wang, G. et al.** Modelling Urban Traffic Air Pollution Dispersion. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, XXXVII, 2008.
 12. **Santiago, J. L., and F. Martín.** Modelling The Air Flow In Symmetric And Asymmetric Street Canyons. *International Journal Of Environment And Pollution*, 2005, vol 25, no. 1-4, pp. 145–154.
 13. **Ruzskiy, A. V. et al.** *Raschetnaya Instruksiya (Metodika) Po Inventarizatsii Vybrosov Zagryaznyayushchikh Veshchestv Avtotransportnyimi Sredstvami V Atmosfernyy Vozdukh [Instruction (Methodology) For The Inventory Of Vehicle Pollutants Emissions Into The Atmosphere]*. Available at: <http://www.opengost.ru/iso/3174-raschetnaya-instrukciya-metodika-po-inventarizatsii-vybrosov-zagryaznyayuschih-veschestv-avtotransportnyimi-sredstvami-v-atmosfernyy-vozdudh.html>. Accessed 11 Nov. 2017.
 14. **Donchenko, V. V. et al.** Metody Rascheta Vybrosov Ot Avtotransporta I Rezul'taty Ikh Primeneniya [Methods For Calculating Vehicle Emissions And The Results Of Their Application]. *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov [Journal Of Automobile Engineers]*, 2014, vol 3, no. 86, pp. 44–51.
 15. **Wang, An, et al.** “Characterizing Near-road Air Pollution Using Local-Scale Emission and Dispersion Models and Validation against in-Situ Measurements.” *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 142, pp. 452–64, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.08.020.
 16. **Thunis, P., et al.** “Overview of Current Regional and Local Scale Air Quality Modelling Practices: Assessment and Planning Tools in the EU.” *Environmental Science & Policy*, 2016, vol. 65, pp. 13–21, doi:10.1016/j.envsci.2016.03.013.
 17. **Sayegh, Arwa, et al.** “Understanding How Roadside Concentrations of NO_x Are Influenced by the Background Levels, Traffic Density, and Meteorological Conditions Using Boosted Regression Trees.” *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 127, pp. 163–75, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.12.024.
 18. **Cabaneros, Sheen Mclean S., et al.** “Hybrid Artificial Neural Network Models for Effective Prediction and Mitigation of Urban Roadside NO₂ Pollution.” *Energy Procedia*, 2017, vol. 142, pp. 3524–30, doi:10.1016/j.egypro.2017.12.240.
 19. **Lee, Martha, et al.** “Land Use Regression Modelling of Air Pollution in High Density High Rise Cities: A Case Study in Hong Kong.” *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 592, pp. 306–15, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.094.
 20. **Tong, Zheming, et al.** “Quantifying the Impact of Traffic-Related Air Pollution on the Indoor Air Quality of a Naturally Ventilated Building.” *Environment International*, 2016, vol. 89–90, pp. 138–46, doi:10.1016/j.envint.2016.01.016.
 21. **Huang, Guowen, et al.** “An Integrated Bayesian Model for Estimating the Long-Term Health Effects of Air Pollution by Fusing Modelled and Measured Pollution Data: A Case Study of Nitrogen Dioxide Concentrations in Scotland.” *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 2015, vol. 14–15, pp. 63–74, doi:10.1016/j.sste.2015.09.002.
 22. **Wang, R., et al.** “Trend in Global Black Carbon Emissions from 1960 to 2007.” *Environmental Science & Technology*, 2014, vol. 48, no. 12, pp. 6780–87, doi:10.1021/es5021422.
 23. **Abramovskiy, Ye. R. et al.** *Atmosfera Velykykh Mist [Atmosphere Of Big Cities]*. 2nd ed., Nauka I Osvita [Science And Education], 2011, p. 350.
 24. **Berlyand, M.E.** *Sovremennye Problemy Atmosfernoy Diffuzii I Zagryazneniya Atmosfery [Modern Problems Of Atmospheric Diffusion And Pollution]*. Gidrometeoizdat, 1975, p. 449.
 25. Gidrometeoizdat. *Metodika Rascheta Kotsentratsiy V Atmosfernom Vozdukke Vrednykh Veshchestv, Soderzhashchikhsya V Vybrosoakh Predpriyatiy. Obshchesoynuznyy Normativnyy Dokument (OND-86) [Method Of Calculation Of The Concentrations Of Harmful Substances In The Atmosphere From Industrial Emissions. Normative Document (OND-86)]*. Gidrometeoizdat, 1987, p. 93.
 26. **Buchaviy, Yu. V., and V. E. Kolesnik.** Algoritm Vychisleniya Vertikal'noy Turbulentnoy Diffuzii Zagryazniteley V Atmosfere Po Meteorologicheskim Dannym [Algorithm For Calculation Of Vertical Turbulent Diffusion Of Pollutants In The Atmosphere By Meteorological Data]. Derzhavnyi Vyshchiy Navchalnyi Zaklad Natsionalnyi Hirnychiy Universytet [State Higher Educational Institution National Mining University], *Materialy Mizhnarodnoi Konferentsii Formum Girnikiv – 2011 [Materials Of The International Conference Miners Forum – 2011]*, 2011, pp. 144–149.
 27. **Kofanov, O., and Yu. Kholkovskiy.** Geoekologicheskie Aspekty Modelirovaniya Lokal'nogo Zagryazneniya Prizemnogo Atmosfernogo Vozdukh Otrabotavshimi Gazami Avtotransportnykh Sredstv [Geocological Aspects Of Modeling Of Local Pollution Of Surface Atmospheric Air By Exhaust Gases Of Motor Vehicles]. *Gornaya Mekhanika I Mashinostroenie [Mining Mechanical Engineering And Machine-Building]*, 2017, no. 4, pp. 20–33.
 28. **Kholodnov, V.A. et al.** *Sistemnyy Analiz I Prinyatiya Resheniy. Tekhnologiya Vychisleniy V Sisteme Komp'yuternoy Matematiki Mathcad [System Analysis And Decision-Making. Computational Technology In The Computer Mathematics System Mathcad]*. Spbgiti (TU), 2013, p. 154.
 29. **Kolomiets, S. V.** Analiz Problemy Vplyvu Vykhopnykh Haziv Avtomobilia Na Zdorovia Ditei [Analysis Of The Problem Of The Impact Of Exhaust Gases On Children's Health]. NTUU KPI, *XII Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. Stud., Aspirantiv Ta Molodykh Vchenykh Ekolohiia. Liudyna. Suspilstvo [XII International Scientific And Practical Conference Of Students, Postgraduates And Young Scientists Ecology. Humans. Society]*, 2009, p. 245.
 30. **Khabarov, V. V., and V. O. Verchenko.** Hnuchka Mobilna Kompiuteryzovana Systema Ekolohichnoho Monitorynhu Nazemnyi Transportnykh System [Flexible Mobile Computerized System Of Ecological Monitoring Of Ground Transport Systems]. *Avtomobilnyi Transport [Automobile Transport]*, no. 25, 2009.
 31. **Kuzmin, D.M.** Tekhnologiya I Metody Intelktualnogo Monitoringa Avtotransportnykh Potokov I Sostoianiiia Avtomobilnykh Dorog: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya cand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 [Technology And Methods Of Intelligent Monitoring Of Motor Transport Flows And Highways State. Summary. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.22.01]. MADI, 2008. 21 p.

Відомості про авторів (About authors)

Кофанов Олексій Євгенович – аспірант кафедри інженерної екології; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: aleckof@protonmail.com.

Oleksii Kofanov – Ph.D. student, Environmental Engineering Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: aleckof@protonmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кофанов, О. Є. Моделирование розсіювання і локального концентрування поллютантів у придорожному повітряному просторі / **О. Є. Кофанов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 190-197. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.28.

Please cite this article as:

Kofanov, O. Modeling of dispersion and local concentration of pollutants in the roadside airspace. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **9** (1285), 190-197, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.28.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кофанов, А. Е. Моделирование рассеивания и локального концентрирования поллютантов в придорожной воздушной среде / **А. Е. Кофанов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 190-197. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.28.

АННОТАЦИЯ Исследование дорожных условий и обнаружение объектов повышенного экотоксикологического влияния со стороны автотранспорта в г. Киеве позволило с помощью программного комплекса MathCad создать пространственные модели и построить поля рассеивания эмиссентов отработавших газов автомобилей (на примере угарного газа CO), а также определить условия распространения загрязнителей до и после модификации моторного топлива дизельной составляющей автотранспортного потока разработанными многофункциональными присадками и добавками оксигенатного биокомпонента. Разработана и апробирована методика краткосрочного прогнозирования загрязнения придорожного городского воздушного пространства основными поллютантами выбросов автотранспортных средств. Согласно дискретно-интерполяционному подходу учтены геометрические особенности линейных источников загрязнения, уточнены локальные загрязнения придорожного пространства и прилегающих к автомагистралям территорий. Определен экологический эффект от модификации моторного дизельного топлива разработанной многофункциональной присадкой. Доказано, что при гипотетическом применении присадки изоконцентрации токсикантов приближаются к предельно допустимым значениям на меньшем расстоянии от линейного источника выброса (автомагистрали).

Ключевые слова: автотранспорт; загрязнение атмосферного воздуха; поллютанты; придорожное воздушное пространство; рассеивание примесей в воздухе.

Надійшла (received) 1.03.2018