

ОСОБЛИВОСТІ РОЗСІЮВАННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ У ПОВІТРІ В УМОВАХ МІСТА

У статті досліджено значення явища турбулентності для розсіювання домішок у повітрі. Виявлено вплив руху транспорту на формування турбулентних потоків. Визначено вплив орографії підстилаючої поверхні на розподіл повітряних потоків. Розроблено та обґрунтовано метод для зниження концентрації забруднюючих речовин на автомагістралі.

Ключові слова: турбулентність, швидкість вітру, підстилаюча поверхня, шкідливі речовини, транспорт, забруднене повітря.

В статье исследовано значение явления турбулентности для рассеивания примесей в воздухе. Обнаружено влияние движения транспорта на формирование турбулентных потоков. Определено влияние орографии подстилающей поверхности на распределение воздушных потоков. Разработано и обосновано метод по снижению концентрации вредных веществ на автомагистралях.

Ключевые слова: турбулентность, скорость ветра, подстилающая поверхность, вредные вещества, транспорт, загрязненный воздух.

The paper provides the value of the phenomenon of turbulence for dispersion of admixtures in air. It certain the influence of orography of laying surface on distributing of currents of air. Influence of motion of transport on turbulent streams is exposed. It is developed and grounded a method for the decline of concentration of contaminating matters on a motorway.

Keywords: turbulence, speed of wind, laying surface, harmful matters, transport, air pollution.

1. Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Сьогодні гостро стоїть проблема перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі та особливостей їх розсіювання на автомобільних дорогах населених пунктів України в цілому та міста Миколаєва зокрема. Оскільки ступінь забруднення атмосферного повітря автомобільними викидами на локальних територіях залежить від можливості переносу забруднюючих речовин, рівня їх хімічної активності, метеорологічних умов розповсюдження в даній місцевості, характеристик підстилаючої поверхні. В обмеженому просторі може відбуватися значна кількість хімічних реакцій із різними швидкостями реакцій, різними залежностями коефіцієнтів турбулентної дифузії від властивостей підстилаючих поверхонь, наявністю визначених гідрометеорологічних процесів. Звідси складнощі достовірного моделювання процесів розповсюдження автомобільних викидів в атмосфері. Рівень приземної концентрації шкідливих речовин в атмосфері від рухомих об'єктів транспорту

при однаковій масі викиду може суттєво змінюватися в атмосфері в залежності від таких природно-кліматичних факторів, а саме: характеристика циркуляційного режиму; термічна стійкість атмосфери; атмосферний тиск, вологість повітря, температурний режим; температурні інверсії, їх повторюваність та тривалість; швидкість вітру, повторюваність застоїв повітря та слабких вітрів (0-1 м/с); тривалість туманів, рельєф місцевості, геологічна будова та гідрогеологія району; ґрунтово-рослинні умови; фонові значення показників забруднення природних компонентів атмосфери тощо. В природному середовищі постійно змінюється температура повітря, швидкість, сила і напрямок вітру, тому розповсюдження забруднень відбувається в постійно нових умовах [6].

Отже, розсіювання шкідливих речовин у повітрі в умовах міста є складним та змінним у часі і просторі процесом. Тому дослідження взаємозв'язку та взаємозалежності факторів (природна турбулентність, швидкість вітру, орографія підстилаючої поверхні, рух транспорту), що впливають на цей процес, дозволить розробити метод, що створює умови для покращення розсіювання шкідливих речовин.

2. Аналіз джерел, постановка мети дослідження

У результаті аналізу наукових джерел виявлено, що значна кількість науковців та провідних учених займаються різного виду моделюванням та прогнозуванням процесів розповсюдження домішок у повітрі [1, 2, 3, 8, 9]. Значна увага у дослідженнях приділяється такому явищу, як атмосферна турбулентність та умовам, що її породжують.

Вплив рельєфу і типу місцевості на процеси розсіювання забруднення в атмосфері детально досліджено в праці [3]. Умови на поверхні землі і її топографічні особливості породжують поля турбулентності, модифікують вертикальні та горизонтальні вітри і змінюють розподіл температур та вологості в приземному шарі. Всі ці фактори впливають на процеси переносу і дифузії забруднюючих речовин.

У роботах [8, 3] підкреслюється, що атмосферна турбулентність слугує механізмом перемішування і зниження концентрацій газових, пилових забруднюючих речовин під час перенесень середнім вітром.

Складне формулювання турбулентного розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері розглядається деякими дослідниками [3] як необхідна умова забезпечення достовірних чисельних результатів. Єдиним можливим методом дослідження проявів турбулентності під час розсіювання домішок у повітрі являється численне моделювання на базі різного роду моделей турбулентності.

Розвиток методів прогнозу забруднення повітря базується на результатах теоретичного і експериментального вивчення закономірностей розповсюдження домішок від їх джерел. Таке вивчення визначається, головним чином, у двох напрямках [2]. Один із них заключається в розробці теорії атмосферної дифузії, який являється більш універсальним, оскільки дозволяє дослідити розповсюдження домішок від джерел різного типу при різних характеристиках середовища. Він дає можливість використати параметри турбулентного обміну, що застосовуються в метеорологічних задачах тепло- і вологообміну в атмосфері. Другий напрямок пов'язаний, в основному, з емпірико-статистичним аналізом розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

Оскільки турбулентність – одне із найменш відомих, але найбільш важливих явищ в атмосфері, що сприяє розсіюванню шкідливих домішок, тому основною метою даної роботи є обґрунтування методу зменшення концентрації шкідливих газів викидів у повітрі на автомагістралях, використовуючи природу явища турбулентності.

Матеріал дослідження

Для атмосфери властиво турбулентний стан. Турбулентна дифузія в атмосфері – неупорядковане переміщення повітря з домішками, що перебувають у ньому. Дифузія домішок і обмін теплом, кількістю руху, вологою, обумовлені турбулентністю, значно інтенсивніше, ніж

обумовлені молекулярними процесами. У зв'язку із цим розсіювання домішок в атмосфері визначається як турбулентна дифузія. Інтенсивність турбулентності характеризується коефіцієнтами турбулентного обміну у вертикальному й горизонтальному напрямках, що залежить від швидкості вітру й розподілу температури повітря по висоті.

Процес поширення транспортних забруднень в атмосфері відбувається по закону, який описує для деякої точки біля поверхні землі зміну градієнта концентрації домішки c в часі та просторі з урахуванням турбулентної дифузії повітряних мас [6].

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)}{\partial z}, \quad (1)$$

де $D_{x,y,z}$ – коефіцієнти турбулентної дифузії в напрямку x, y, z .

Швидкість вітру сприяє переносу й розсіюванню домішок, оскільки з підсиленням вітру зростає інтенсивність перемішування повітряних шарів. У разі сильного вітру початкове підіймання домішки зменшується, але спостерігається зростання швидкості переносу домішки на значну відстань. Нестійкість напрямку вітру сприяє підсиленню розсіювання по горизонталі, а концентрації біля землі зменшуються.

До горизонтального переносу повітря приєднуються і вертикальні складові. Вони звичайно малі в порівнянні з горизонтальним переносом, порядку сантиметрів або десятих часток сантиметра в секунду. Тільки в особливих умовах, при так званій конвекції (виникає при ясній погоді, малих (до 4 м/с) швидкостях вітру, приблизно через 2 год після сходу сонця і руйнується приблизно за 2-2,5 год до заходу сонця. При конвекції нижні шари нагріваються сильніше, ніж верхні, і це сприяє швидкому розсіюванню забрудненої хімічною речовиною хмари і зменшенню її уражаючої дії [7]) у невеликих ділянках атмосфери вертикальні складові швидкості руху повітря можуть досягати декількох метрів у секунду. Вітер завжди має турбулентність. Це значить, що окремі кількості повітря в потоці вітру переміщуються не по рівнобіжних шляхах. У повітрі виникають численні вихори, що безладно рухаються, і струмені різних розмірів. Окремі кількості повітря, що захоплюються цими вихорами і струменями, так звані елементи турбулентності, рухаються в усіх напрямках, у тому числі і перпендикулярно до загального або середнього напрямку вітру і навіть проти нього. Ці елементи турбулентності – не молекули, а великі об'єми повітря, лінійні розміри, яких вимірюють сантиметрами, метрами, десятками метрів. Таким чином, на загальний перенос повітря у визначеному напрямку і з визначеною швидкістю накладається система хаотичних, безладних рухів окремих елементів турбулентності по складних траєкторіях, що переплітаються.

Більш висока температура біля поверхні землі вдень примушує повітря підніматися вгору, що викликає додаткову турбулентність. Вночі температура біля поверхні землі нижча, тому турбулентність зменшується і розсіювання відпрацьованих газів зменшується [6].

Здатність земної поверхні поглинати чи випромінювати тепло впливає на вертикальний розподіл температури в приземному шарі атмосфери і призводить до температурної інверсії [6] (виникає при ясній погоді, малій (до 4 м/с) швидкості вітру, у вечірній час, приблизно за 1 год до заходу сонця. При інверсії нижні шари повітря холодніші за верхні, що перешкоджає розсіюванню його по висоті й утворює найбільш сприятливі умови для збереження високих концентрацій забрудненого повітря [7]).

Навіть за відсутності перепон спостерігається утворення турбулентних завихрень (рис. 1).

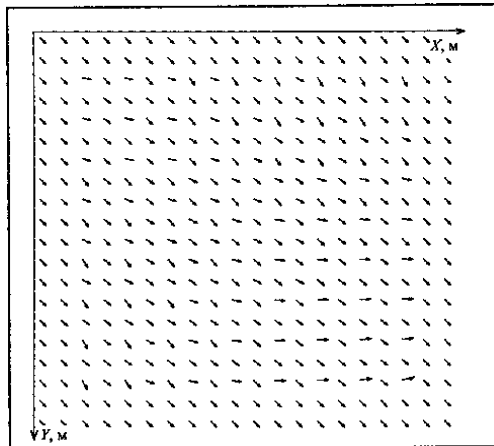


Рис. 1. Динаміка атмосфери приземного шару без врахування орографії підстилаючої поверхні

Це пояснюється тим, що для потоків з $Re \gg 10^3$ зазвичай спостерігається втрата стійкості і перехід від ламінарного режиму потоку до турбулентного, що виражається в утворенні турбулентних завихрень, що також через деякий час втрачають стійкість і утворюють нові вихрі, але уже менших масштабів.

А в умовах неоднорідності рельєфу, визначальний вплив на режим розсіювання домішки мають два основних фактори.

Перший із них – гідродинамічний, обумовлений виникненням в околиці будинків вихрових структур.

Другий фактор – геометричний, пов'язаний із безпосередньою взаємодією часток домішки з поверхнею перешкод, у результаті чого виникають, наприклад, умови для додаткового розсіювання домішки в поперечному середньому вітрі напрямку, а також тіньові зони за будинками [8].

Взагалі, доведено, що при обтіканні повітряним потоком тіла будь-якої форми перед ним і за ним утворюються застійні зони або області. Звичайно, ці зони називають зонами аеродинамічного сліду. Схема усереднених ліній потоку, що формуються при обтіканні пластини турбулентним повітряним потоком представлена на рис. 2 [4].

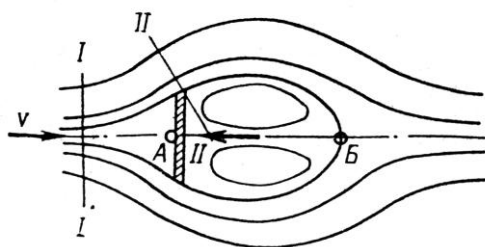


Рис. 2. Обтікання пластини турбулентним потоком повітря (I-I та II-II – переріз у не обуреному та «стиснутому» потоці відповідно)

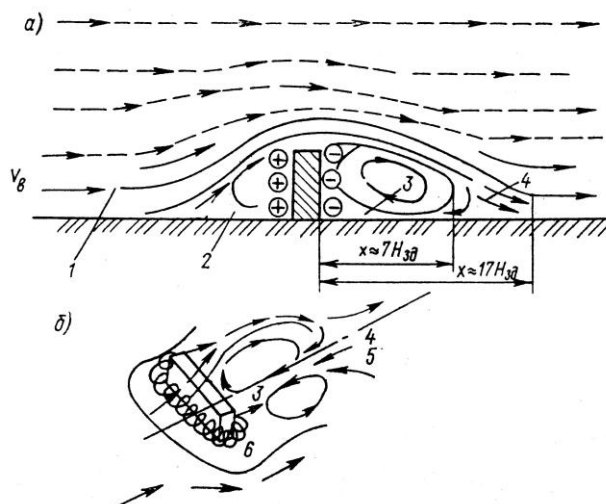
У точці А потік повітря повністю гальмується (тобто швидкість повітря тут дорівнює нулю), а біля неї спостерігається розділення течії і ущільнення ліній потоку. За пластиною в результаті дії сил в'язкості утворюється область вихрової течії, у якій потік гальмується, енергія його настільки знижується, що напрямок його руху може змінюватися на протилежний. Точка Б лежить на межі зони загальмованого потоку – зони аеродинамічного сліду. Через розходження в енергетичних рівнях набігаючого й загальмованого потоків на межі аеродинамічного сліду постійно відбувається виникнення вихрів, тому визначити її можна тільки досить умовно.

При обтіканні потоком повітря окремо стоячого будинку (рис. 3, а і б) на відстані п'яти-восьми калібрів (середніх розмірів фасаду) від навітряної сторони приземні шари повітря

гальмуються, частина кінетичної енергії вітрового потоку переходить у потенціальну, у результаті чого статичний тиск $p_{ст.}$ перед будинком збільшується. Максимальної величини $p_{ст.}$ очевидно досягне на поверхні навітряного фасаду. Набігаючий потік повітря утворює біля будинку вихрову зону, форма якої буде ніби доповнювати форму будинку, зменшуючи тим самим втрати енергії потенціального (не збудженого) потоку.

Будинок обтікається зверху й з боків, тому в цих місцях спостерігається деяке підтягнення основного потоку й збільшення його швидкості в порівнянні зі швидкістю вітру. Із цієї причини повітря із завітряної сторони будинку постійно ежектуюється основним потоком, а тиск на завітряній стороні знижується.

Поповнення ежектуючого повітря відбувається за рахунок приземних шарів, які загальмовані, можуть змінювати напрямок, робити вихровий рух і проникати з області підвищеного тиску $p_{ст.}$ (область підпору) у зону розрядження. На завітряній стороні також існує застійна зона (зона аеродинамічного сліду). Довжина цього сліду приймається із умови, щоб швидкість потоку в ньому становила не менш 95 % від швидкості не збудженого потоку на тій же висоті від поверхні землі, тобто $x/x_0 \geq 0,95$. Для будинку у формі паралелепіпеда зона аеродинамічного сліду орієнтовно простягається до $x \approx 17 H_b$ (H_b – висота будинку). У середині області аеродинамічного сліду існує циркуляційна зона (або зона аеродинамічної тіні), у межах якої біля поверхні спостерігаються зворотні потоки повітря. При розсіюванні шкідливих речовин на невеликій висоті над будинком максимальна їхня концентрація спостерігається саме в зоні аеродинамічної тіні.



**Рис. 3. Схема обтікання будинку повітряним потоком:
а – в розрізі; б – в аксонометрії:**

1 – область не збудженого потоку; 2 – зона надлишкового статичного тиску; 3 – зона розрядження і вихрового руху повітря (зона аеродинамічної тіні); 4 – зона аеродинамічного сліду; 5 – зворотні потоки повітря, що входять в зону аеродинамічного сліду; 6 – вихрові потоки повітря, що проникають в зону розрядження із зони підпору

Дослідження в аеродинамічних трубах показали [3, 10], що при стабільних умовах слід потоку повітря, що обтікає об'єкт забудови, зберігає інформацію про нього далеко вниз по потоці. Потужність потоку сліду повільно росте за рахунок введення в нього навколишніх мас повітря, і його розмір збільшується в 30 разів стосовно висоти обтікаючого будинку.

Протяжність аеродинамічного сліду, тіні й статичний тиск на зовнішні поверхні огорожень залежать від співвідношення висоти й ширини будинку, відстані до сусідніх будинків і напрямку вітру.

Модель руху повітря з урахуванням міської забудови показана на рис. 4 [8]. Моделювання даного процесу з урахуванням орографії підстилаючої поверхні ще більше підкреслює неоднорідність поширення повітряних потоків та створення циркуляційних зон.

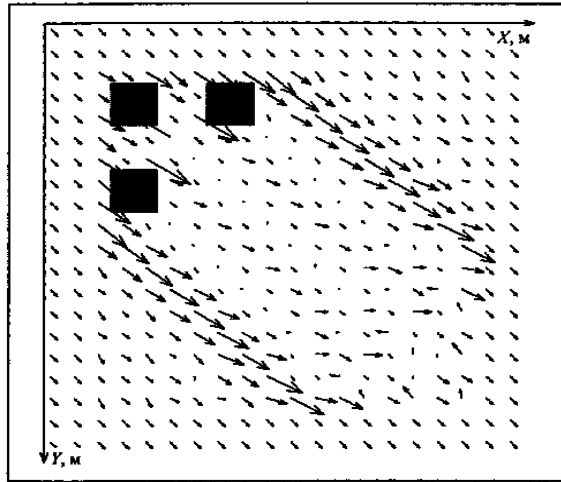


Рис. 4. Динаміка атмосфери приземного шару з урахуванням орографії підстилаючої поверхні

Особливо важливе врахування орографії поверхні (забудови) при розрахунку розсіювання домішок від наземних або низько розташованих (нижче ніж дахи будівель) джерел, що формують поле забруднення з локальними мінімумами і максимумами концентрації, обумовленими композицією двох вказаних факторів. Саме такими джерелами являються потоки автомобільного транспорту. На автомагістралях з інтенсивним автомобільним рухом продукти вихлопних газів окремих автомобілів додаються, утворюючи наземну хмару домішок. Тому як вказано в роботах [5, 10], транспортний потік може розглядатися як лінійне джерело викидів, закономірність поширення забруднюючих речовин якого залежить від висоти джерела над рівнем землі, стратифікації і швидкості вітру, умов дифузії домішок у зоні магістралі. І сам ефект впливу наземного транспорту можна моделювати наземним лінійним джерелом, окреслення якого співпадає з контуром автомагістралі.

Крім того, аеродинамічні дослідження показали [9], що під час руху автомобілів також утворюється вихрова система (рис. 5), яка складається з чотирьох основних елементів. Потік повітря, що сходить з верху автомобіля або із задньої кришки багажника, загинається вниз і закручується в бік заднього торця, утворюючи приєднаний вихор *A*. Вихор *B* утворюється аналогічно в результаті дії потоку повітря, що проходить під автомобілем і загинається вгору. Зазвичай центральна вісь верхнього вихору *A* розміщується далі в потоці, ніж вісь нижнього вихору *B*. Біля місць сполучення бокових сторін кузова з заднім торцем утворюються горизонтальні вихори *B*; ці вихори приєднанні до кузова і переміщуються разом з ним. У всіх автомобілів з кузовом седан утворюється піднімальна сила, під дією якої виникають вільні вихори *Г* у вигляді спіралей, що простягаються вниз по потоці, що йде за автомобілем.

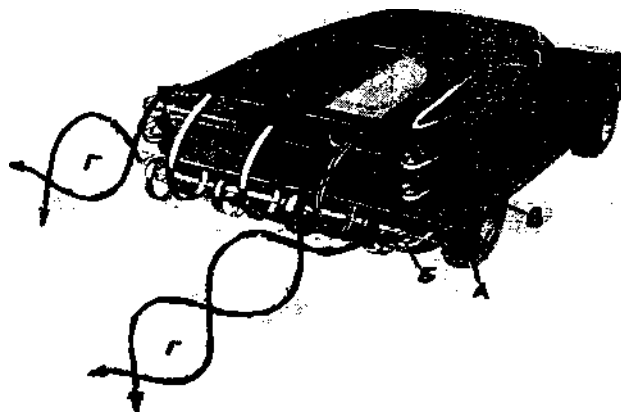


Рис. 5. Система вихорів, що утворюються за автомобілем, який рухається

Хоч інтенсивність цих вихорів у різних автомобілів різна, але ці вихори часто можна спостерігати при русі автомобіля під час туману чи дощу.

На основі даних законів та явищ авторами розроблено і запропоновано метод та запатентовано корисну модель (патент № 29435) для зниження концентрації забруднюючих речовин на автомагістралі (рис. 6).

В основі конструкції знаходиться шумозахисний екран, що також використовується для затримання шкідливих речовин у повітрі в межах автомагістралі за територією міста. Даний екран ми пропонуємо виконати у вигляді окремих секцій спеціально вигнутої форми 1, встановлених під кутом (35-50°) на відстані, що забезпечує перекривання попередньої секції наступною для збереження шумозахисної функції. Розміри секцій можуть змінюватись в залежності від умов та середовища, в якому вони будуть встановлені. Наприклад за межами міст, на автотрасах висота їх може досягати до 3 м, в умовах міста – нижчі в півтора, два рази.

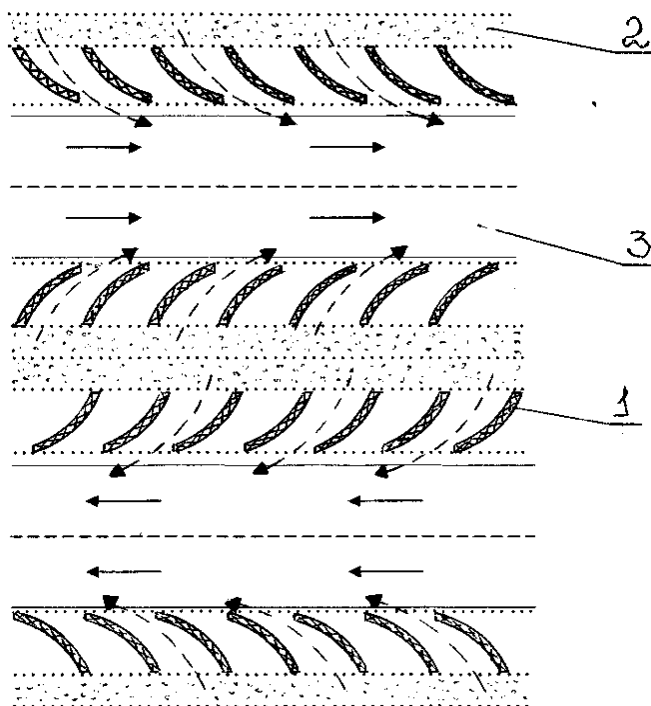


Рис. 6. Споруда для зниження концентрації вихлопних газів на автомагістралі

- > – рух повітря, викликаний автотранспортом
- - - - -> – повітря, що підсмоктується на автомагістралі

Секції екрану слугують перепоною на шляху потоку повітря, що направлений з придорожньої території 2 на автомагістраль 3. Огинаючи їх потік стає інтенсивнішим, збільшується його швидкість і саме на дорозі виникають циркуляційні зони.

Вихори *B*, що утворюються під час руху автомобіля, сприяють підсмоктуванню повітря через простір між секціями запропонованої споруди. Таким чином відбувається підсмоктування чистого повітря з придорожньої території за рахунок переміщення (потіку) повітря, що стимулюється рухом транспорту. За рахунок вільних вихорів *Г*, що утворюються за автомобілем, циркуляційних зон, що формуються за секціями екрану зі сторони автомагістралі та природної динаміки атмосфери у вигляді турбулентних завихрень відбувається перемішування повітря. Так чисте повітря з придорожньої території змішується із забрудненим вихлопними газами повітрям і розбавляє останнє. За рахунок цього відбувається зниження концентрації забруднюючих речовин у повітрі на автомагістралях.

Висновки

Авторами досліджено явище турбулентності і виявлено його значення для розсіювання домішок на об'єктах складної геометричної конфігурації.

Визначено закономірності та природу впливу руху транспорту на утворення турбулентних потоків.

Доведено той факт, що орографія підстилаючої поверхні має суттєвий вплив на розподіл повітряних потоків, які являються носіями забруднюючих речовин. Проаналізовано модель руху повітряних потоків з урахуванням міської забудови, на основі чого розроблено метод для зниження концентрації забруднюючих речовин на автомагістралі.

Запропонована корисна модель дозволить покращити екологічну ситуацію на автомагістралях як на території міста так і за його межами.

В подальших дослідженнях чільне місце буде відведене прогнозуванню ступеня забруднення повітряного середовища біля автомагістралей та якості повітряного середовища на вулицях за умов введення розробленої корисної моделі в експлуатацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беляев Н.Н., Коренюк Е.Д., Хрущ В.К. Методы экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы/ – Днепропетровск: Наука и образование. – 2002. – 192 с.
2. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1985.
3. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев В.Н. и др. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде – К.: Наукова думка, 1997.
4. Иванов О.П., Машченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы. – Л.: Машиностроение, 1986. – 280с.
5. Комаров Ю.Я., Федотов В.Н., Колесников С.В. Технология очистки городских автомагистралей от вредных выбросов транспортных потоков в// Экологические системы и приборы. – 2004. – № 11. – С. 21-24.
6. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. – М.: Высшая школа, 2001. – 273 с.
7. Мала гірнича енциклопедія: В 3-х т. / За ред. В. С. Білецького. – Донецьк: «Донбас», 2004.
8. Парашук Е.М., Коваль В.Н., Прокопенко М.Н. Результаты моделирования распространения выбросов автотранспорта на ограниченной территории города // Экологические системы и приборы. – № 3. – 2007. – С. 56-59.
9. Прингхэм Х.Е., Баумен У.Д. Компания «Форд мотор». Исследования в аэродинамической трубе истечения отработавших газов //Аэродинамика автомобиля: Сборник статей / Пер. с англ. Ф.Н. Шклярчука / Под ред. Чл.-кор.АН СССР Э.И. Григолюка. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
10. Прищепов О.Ф., Левицька О.С. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю на автомагістралях міста Миколаєва // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Т. 77. Вип. 64. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – С. 70-74.

Рецензенти: д.т.н., професор Дихта Л.М.,
к.т.н., доцент Сирота О.А.

© Прищепов О.Ф., Левицька О.С., 2009

Стаття надійшла до редколегії 15.05.09