

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ
«ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Л.С. Шелудченко

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ
ГЕОЕКОСИСТЕМ З АВТОТРАНСПОРТНИМИ
МЕРЕЖАМИ**

Кам'янець-Подільський, 2022

УДК 504.06 : 625.72 : 629.3
ББК 28.081
Ш 44

Рекомендовано до друку вченою радою Закладу вищої освіти
«Подільський державний університет»
(протокол № 17 від 30 грудня 2021р.)

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Н.В. Внукова – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Л.М. Архипова - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри туризму Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Т.М. Приліпко – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри харчових технологій виробництва й стандартизації харчової продукції Закладу вищої освіти «Подільський державний університет»;

В.М. Шмандій – доктор технічних наук, професор кафедри екології і біотехнологій Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського;

О.В. Харламова – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри екології і біотехнологій Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського

Шелудченко Л.С.

**Теоретичні основи та методи забезпечення екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з автотранспортними мережами: монографія – Київ: В-во , 2022
ISBN**

У монографії висвітлюються сучасні проблеми із забезпечення екологічної безпеки територій з щільною автотранспортною мережею. Зокрема комплексно досліджені та відображені узагальнені результати власних теоретичних та експериментальних наукових досліджень, які розраховані на широке коло науковців, дослідників, викладачів та здобувачів вищої освіти у напрямку екологічної безпеки та транспортних технологій

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА

I. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ

ПРОБЛЕМ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ.....

7

1.1. Сучасні тенденції та перспективи розвитку автотранспортного комплексу в Україні та світі.....	8
1.2. Характерні особливості динаміки та структури складу автотранспортних потоків.....	16
1.3. Вплив автодорожньої мережі на екологічну рівновагу природно-техногенних геоекосистем.....	19
1.4. Транспортно-екологічна раціоналізація структури автотранспортного комплексу.....	27
1.5. Динаміка міграційних процесів та депонування викидів забруднюючих речовин, які продукуються потоками автотранспортних засобів.....	31
1.6. Аналіз методів захисту природно-техногенних геоекосистем від впливу автотранспортного комплексу.....	38
1.7. Управління екологічною безпекою територій з щільною мережею автомобільних доріг.....	51

II. СТРУКТУРА, СКЛАД ТА ОБСЯГИ ВИКИДІВ

ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН, ЯКІ ПРОДУКОВАНІ ПОТОКАМИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....

56

2.1. Викиди мінерального пилу та пилових аерозолів.....	56
2.1.1. Процеси дезінтеграції мінеральних речовин при експлуатації автомобільних доріг.....	57
2.1.2. Аналітичне моделювання обсягів диспергування мінеральних речовин автотранспортним потоком при руйнуванні автодорожнього покриття.....	69
2.1.3. Обсяги викидів диспергованих мінеральних речовин, які утворюються в результаті абразивне зношування конструкції автомобільних доріг.....	79
2.2. Структура та обсяги газових викидів, які здійснюються потоками транспортних засобів.....	86
2.3. Обсяги викидів сажі потоками автотранспортних засобів, які обладнано дизельними двигунами.....	96
2.4. Узагальнення матеріального балансу викидів, які продукуються автотранспортними потоками.....	101
2.5. Висновки за розділом II.....	104

III. ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ І ДЕПОНУВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ В МЕЖАХ СМУГИ ВІДВЕДЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ.....

116

3.1. Дифузія аерозольних викидів автотранспортних потоків.....	106
--	-----

3.2. Динаміка аерозолів газо-пилової хмари викиду в турбулентних роторах.....	114
3.3. Динаміка ламінарно-турбулентних повітряних потоків в межах смуг відведення автомобільних доріг.....	116
3.4. Основні чинники формування мікроклімату в зоні смуги відведення автомобільної дороги.....	124
3.5. Сепарація аерозолів газо-пилової хмари викидів та депонування викидів, які продукуються автотранспортними потоками.....	131
3.6. Результати експериментальної ідентифікації динаміки ламінарно-турбулентних повітряних потоків аерозолів.....	141
3.7. Розроблення інформаційної моделі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги.....	148
3.8. Висновки за розділом III.....	153
 IV. ЕКОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ АВТОТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ.....	156
4.1. Функціональні ознаки автотранспортного потоку.....	156
4.2. Еколого-технологічна оптимізація опорного каркасу автодорожньої мережі.....	161
4.3. Екологічна оптимізація динаміки автотранспортних потоків на ділянках автомобільних доріг з особливими умовами руху....	173
4.3.1. Синхронізація колективного руху автотранспортних потоків у вузлах автотранспортної мережі.....	173
4.3.2. Синхронізація колективного руху автотранспортних потоків на ділянках серпантину (у шпильках) автомобільних доріг.....	178
4.4. Автодорожня мережа, як термодинамічна система.....	181
4.5. Дотримання екологічної безпеки ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автотранспортною мережею.....	186
4.6. Основні принципи управління проектами природно-техногенних геоекосистем з розвиненою автотранспортною мережею.....	190
4.7. Еколого-економічне оцінювання проектів будівництва та реконструкції автодорожніх мереж.....	194
4.8. Висновки за розділом IV.....	199
ВИСНОВКИ.....	201
ЛІТЕРАТУРА.....	204

ПЕРЕДМОВА

За результатами проведених комплексних теоретичних та експериментальних досліджень у монографії запропоновані та обґрунтовані нові наукові положення, висновки, рекомендації, які дозволять підвищити рівень екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з високою щільністю автодорожньої мережі з інтенсивними автотранспортними потоками, шляхом управління міграцією та депонуванням газо-пилових аерозолів.

Основні результати теоретичних досліджень та науково-технічні пропозиції підтверджують свою практичну цінність впровадженням у виробництво, які закріплені відповідними актами, та засвідчені патентами України на корисні моделі.

Загалом у роботі проведений аналіз попередніх досліджень та сучасних тенденцій в Україні та світі, щодо питання формування екологічної небезпеки в зоні впливу автодорожньої мережі. Встановлено основні чинники негативного впливу мережі автомобільних доріг на екологічну рівновагу природно-техногенних геоекосистем, які полягають у відчуженні територій, розчленуванні природних ландшафтів, дестабілізації природно-територіальних комплексів, забрудненні придорожніх ландшафтів, які в сукупності призводять до їх незворотної трансформації.

На цій основі визначено, що міграція забруднюючих речовин, які продукуються автотранспортними потоками, за межі смуги відведення автомобільної дороги є важливою проблемою, яка в достатній мірі не вирішена. Доведено, що динаміка таких неконтрольованих міграцій визначається категорією автомобільної дороги, яка встановлює інтенсивність автотранспортних засобів, їх транспортно-експлуатаційні показники тощо. В свою чергу, поширення забруднюючих речовин залежить від характерних особливостей природних ландшафтів та наявності штучних об'єктів захисту придорожніх територій. Визначено, що екологічна раціоналізація ландшафтно-територіальної організації природно-техногенної геоекосистеми є пріоритетним рішенням, щодо можливості управління екологічною безпекою території із розвинутою автодорожньою мережею.

Встановлено, що варіабельність умов руху транспортних засобів функціонально прив'язані до автодорожньої мережі та до ландшафтно-територіальних умов конкретної природно-техногенної геоекосистеми, які в подальшому полягають у зміні

режиму руху автотранспортних засобів, роботі двигунів внутрішнього згорання, витрат пального, і, як наслідок, до специфічних для кожної конкретної ділянки, функціональних характеристик викидів шкідливих речовин, умов їх подальшої міграції та депонування.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що до основних факторів впливу відносяться також конструкційні особливості, технічний рівень та експлуатаційний стан автомобільної дороги. Окрім того, транспортна здатність автодороги, яка визначається способом організації руху, забезпечує як достатню безпеку кожного з його учасників, так і в свою чергу, визначає рівень техногенної та екологічної безпеки автотранспортного комплексу в цілому.

Автором обґрунтовані твердження, що ландшафтну організацію природно-техногенної екосистеми (ПТС) з розвинутою автодорожньою мережею слід розглядати як деякий мозаїчний комплекс, який складається з окремих ландшафтно-територіальних басейнів із єдністю спільних ландшафтних ознак, кожен із них топологічно має характеризуватись головними осями і їх геометричним центром та обмежуватися деякими домінантами басейнового фрагменту. Таким чином, підвищення рівня автотранспортної ємності ПТС необхідно здійснювати шляхом створення штучних об'єктів ландшафту, які в свою чергу будуть підсилювати геоморфологічні ознаки ландшафтно-територіального басейну автомобільної дороги.

На підставі висновків підтверджено, що рівень екологічної безпеки території з щільною мережею автомобільних доріг носить комплексний характер, для розв'язання якого необхідний пошук нових ефективних методів конструювання всіх

I. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується інтенсивністю загострення ряду глобальних проблем [6, 20, 23, 75, 84, 161], без детального аналізу яких неможливо спрогнозувати реальні тенденції їх майбутності [4, 5, 42]. До таких основних проблем слід віднести кардинальні питання, які стосуються розвитку продуктивних сил та якості, серед яких питання екологічної безпеки об'єктів навколишнього середовища займають особливе місце [8, 13, 25, 28, 85, 168, 169, 189]. Швидка трансформація сучасного суспільства та його перехід від постіндустріального до інформаційно-комунікаційного суспільства [1, 7, 43, 60, 119, 139] зумовлює інтенсивний розвиток всіх без винятку засобів комунікацій [26, 44, 64, 137]. Невід'ємною складовою комунікаційних технологій є транспортні системи, в структурі яких автомобільний транспорт посідає одне з визначальних місць [178]. Збільшення обсягів пасажирських і вантажних перевезень, інтенсифікація автотранспортних потоків призводить до розвитку всієї інфраструктури автотранспортного комплексу в цілому [229, 261, 285]. Центральним об'єктом цієї інфраструктури є мережа автомобільних доріг, яка має забезпечувати екологічну та техногенну безпеку, економічну доцільність, технічну надійність та мобільність функціонування всього автотранспортного комплексу [8, 12, 81, 91, 107, 113, 167, 290, 291, 293].

Концепція реформування системи державного управління автомобільними дорогами загального користування в Україні (розпорядження №432-р Кабінету міністрів України від 31.03.2015 р.) передбачає, що "... забезпечення розвитку мережі автомобільних доріг та поліпшення їх транспортно-експлуатаційного стану є необхідною умовою для подальшого соціально-економічного розвитку держави і суспільства. Середньорічне підвищення рівня інтенсивності дорожнього руху на основних магістральних автомобільних дорогах ... досягає 20%. У складі транспортних потоків зростає частка великовагових та великогабаритних транспортних засобів, що призводить до швидкого руйнування автомобільних доріг..." [94, 286, 287].

Мережа автомобільних доріг, як невід’ємна техногенна складова сучасних природно-техногенних геоекосистем, є одним з визначальних чинників екологічної небезпеки та порушення рівноваги природно-територіальних комплексів [94, 95, 99, 100, 140, 157, 161]. Так зокрема, Законом України “Про оцінку впливу на довкілля” до першої категорії видів планової діяльності та об’єктів, які можуть мати значний вплив на довкілля і підлягають подальшій оцінці віднесено “...будівництво автомобільних доріг загального користування державного та місцевого значення, що мають чотири чи більше смуги руху, або реконструкція та/або розширення наявних смуг руху до чотирьох і більше, за умови їхньої безперервної протяжності 10 кілометрів і більше; автомобільних доріг першої категорії” [76, 89, 285].

1.1. Сучасні тенденції та перспективи розвитку автотранспортного комплексу в Україні та світі

Динаміка зростання в другій половині XX ст. об’ємів світового автомобільно парку (рис1.1) зумовила тенденцію до інтенсифікації будівництва мережі автомобільних доріг [126]. Загалом протяжність автомобільних доріг у світі (за даними *CIA World Factbook*) наближається до 65 млн км, з яких понад 10 % протяжності припадає на США. До п’ятірки країн з найрозвиненішою мережею автомобільних доріг у Європі входять Франція, Іспанія, Німеччина, Італія та Швеція (без урахування якості покриття, ширини проїжджої частини та інших важливих показників якості автомобільної дороги). Україна за протяжністю автомобільних доріг (близько 169,5 тис. км) (додаток Р) посідає 30 місце серед 191 країни світу і характеризується відносно рівномірною щільністю автодорожньої мережі по окремих регіонах країни. При цьому щільність автомобільних доріг в Україні в 6,6 рази менша ніж у Франції (0,28 та 1,84 км/км² – відповідно). Довжина швидкісних автомагістралей в Україні становить лише 0,28 тис. км, в той час, як у Німеччині – 12,5 тис. км, а у Франції – 7,1 тис. км.

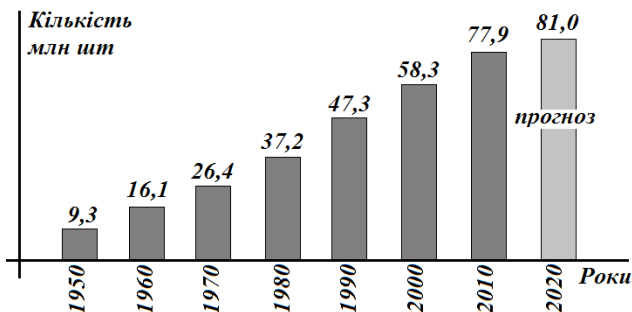


Рис. 1.1. Динаміка світового виробництва автотранспортних засобів

Транспортно-експлуатаційні характеристики автомобільної дороги, які визначаються такими ознаками як її ресурс, міцність і довговічність, трибологічні властивості дорожнього покриття, швидкість розвитку тріщин тощо, зумовлюють рівень екологічної безпеки не лише безпосередньо самої автомобільної дороги, але і всієї природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею вцілому [177, 211, 224, 228, 233, 248]. Дійсно, якщо проаналізувати структуру балансових викидів [92, 219, 222], які продукуються автотранспортними потоками, то очевидно, що практично весь обсяг викидів мінерального пилу зумовлений процесами дезінтегрування конструкційних матеріалів автодороги, а обсяги газових викидів щільно корелюють з стабільністю режиму роботи двигунів сукупності автотранспортних засобів, який в свою чергу визначається в основному транспортно-експлуатаційною якістю автомобільної дороги [46, 53, 59]. Таким чином, рівень екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з розвинутою автокомунікаційною інфраструктурою визначається, в першу чергу, конструкційною надійністю і технологічною “культурою” при будівництві (реконструкції) автомобільних доріг.

Найпомітнішого прогресу в галузі проектування (у Х'юстонському і Техаському університетах) та будівництва автомобільних доріг досягнуто в наш час в США. Всі автомобільні дороги в США можна поділити на декілька груп, які в свою чергу поділяють на певні класи [281]. Найбільш значимими є автодороги *Interstate Highways* (позначаються індексом *I*) та *US Highways* (позначаються – *US*). До менш значимих автодоріг відносять

дороги: *State Highways (TX)*, *Farm to Market (FM)*, *Road (Rd)*, *Avenue (Ave)*, *Junction (Jct)* тощо [281]. Головними конструкційними та технологічними особливостями автомобільних доріг США є [288]:

- всі автомобільні дороги групи I та US виготовляються виключно з бетонів високих марок;
- для зменшення величини “просідання” багат шарової конструкції автодороги під впливом варіювання вологості (особливо в пісках та глинах), кожний шар конструкції оброблюють 35-ти відсотковим розчином хлориду кальцію (CaCl_2), що на 80-85% підвищує експлуатаційні властивості автодороги в порівнянні з простою трамбівкою;
- після цього вкладається 5-7 сантиметровий шар асфальту, який не лише забезпечує рівну поверхню для укладення бетону, але і є надійною гідроізоляцією, яка запобігає потраплянню води в конструкцію автодороги через термічні шви бетонних стиків;
- над асфальтовою стяжкою на висоті $> 1/2$ товщини бетонного полотна автодороги виконують монтаж арматури (рис.1.2) з межею міцності сталевого прутка не менше ніж 415 МПа, яка не лише підвищує характеристики міцності полотна автодороги при згині, але і запобігає контактному руйнуванню (виникненню каверн) бетонної поверхні;
- після монтажу арматури виконується заливка бетонного полотна автомобільної дороги;
- здійснюється зароблення температурних швів бетонного полотна за допомогою асфальту (рис.1.3).

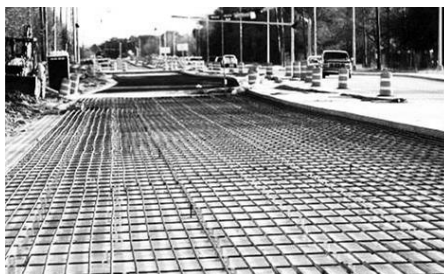


Рис.1.2. Арматування бетонного полотна автомобільної дороги (інтернет ресурс <https://censor.net.ua/r257965>)



Рис.1.3. Температурний шов бетонного полотна автомобільної дороги, який заповнено асфальтовим наповнювачем (інтернет-ресурс <https://censor.net.ua/r257965>)

Після завершення будівництва автомобільна дорога протягом наступних 28 днів не підлягає експлуатації і лише після цього терміну по ній дозволяють рух автотранспортних засобів. Гарантійний експлуатаційний термін такої автодороги становить 25 років. Потрібно відзначити, що в Далласі та Х'юстоні є ділянки автомобільних доріг, які було здано в експлуатацію ще в 1960 році і які експлуатуються без капітального ремонту і реконструкції до нинішнього часу. Ці ділянки автомобільних доріг використовуються не лише для моніторингу, але і для різноманітних наукових досліджень в галузі дорожнього будівництва.

Останнім часом досвід будівництва автомобільних доріг в США поширюється в Європі, Азії та Австралії [268,283,288].

Значна частина автомобільних доріг Німеччини була побудована в першій половині XX століття і розрахована на рух колон важкої військової техніки [268]. Саме тому ці автомобільні дороги до нашого часу витримують інтенсивні трафіки великовантажних транспортних засобів. На відміну від США для будівництва дорожнього одягу на автодорогах Німеччини застосовують не лише бетон, але і асфальт, хоча конструкційно профіль автомобільної дороги принципово не відрізняється від конструкції автодоріг в США. Необхідно також відзначити, що в Німеччині зовсім не застосовуються технології ямкового ремонту автодоріг, за необхідності здійснюється повна заміна відразу всієї пошкодженої ділянки автомобільної дороги [264, 267, 288].

В ряді країн, таких як Великобританія, Фінляндія, Швеція, Об'єднані Арабські Емірати, Австралія та інші при будівництві автомобільних доріг значна увага приділяється кліматичним особливостям регіону, відповідно до чого і здійснюється коригування конструкції та технологій будівництва мережі автодоріг [51, 267, 283].

Значний досвід у проектуванні та будівництві автомобільних доріг набуто у Франції, Канаді, Японії, Китаї та в ряді інших країн. Так зокрема, завдяки впровадженню у будівництво автомобільних шляхів сучасних технологій в Китаї забезпечено небувалу швидкість будівництва в 750 метрів автодороги за годину [264]. При цьому автомобільна дорога побудована з такою швидкістю за своїми транспортно-експлуатаційними характеристиками і якістю не поступається кращим автобанам США та Європи.

В Україні основним нормативним документом, який регламентує вимоги до транспортно-експлуатаційних властивостей автомобільних доріг є Державні будівельні норми України ДБН В.2.3-4:2007 “Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво” [77]. Цей документ встановлює вимоги на проектування та будівництво нових і реконструкцію існуючих автомобільних доріг загального користування, зокрема щодо технічної класифікації автодоріг за розрахунковою перспективною інтенсивністю та швидкістю руху автотранспортних потоків, габаритами автотранспортних засобів та навантаженням на автодорогу, генеральною схемою планування території України та окремих регіонів, основними конструкційними властивостями, безпекою дорожнього руху та вимоги щодо розробки матеріалів ОВД. Документ визначає також і технічні норми на проектування основних елементів автомобільних доріг, зокрема на параметри поперечного профілю автодоріг та кількість смуг руху, вимоги до земляного полотна з урахуванням погодно-кліматичних факторів, природних умов регіону та інженерно-геологічних умов будівництва, вимоги до конструкційних матеріалів і конструкції дорожнього одягу автомобільної дороги, споруд автодорожнього сервісу тощо [85, 157].

Типові конструкційні елементи поперечних профілів дорожніх конструкцій з удосконаленим капітальним покриттям дорожнього одягу, які використовуються при будівництві автомобільних доріг категорій 1-а, 1-б, 2, 3 наведено на рис.1.4, а

на рис.1.5 наведено типову конструкцію поперечного профілю автомобільної дороги, яка є характерною для автодоріг України [80, 83, 100, 126, 94].

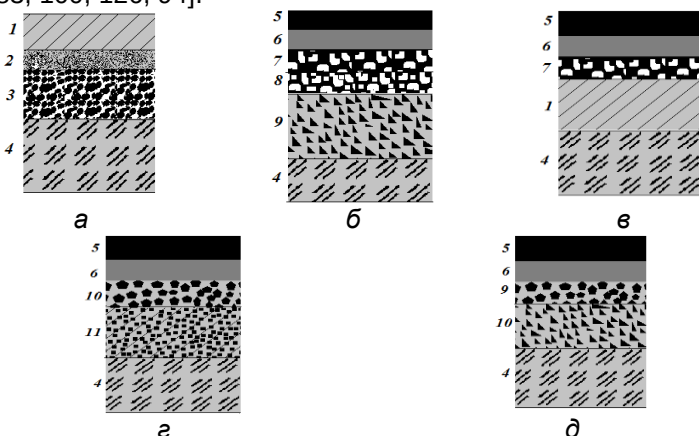


Рис. 1.4. Удосконалені капітальні покриття автомобільних доріг: а) цементно-бетонні покриття; б) асфальтобетонні покриття на гравійній основі; в) тришарові асфальтобетонні покриття на бетонній основі (найбільш розповсюджені в містах); г) асфальтобетонне покриття на основі із щебня, обробленого в установці органічними зв'язуючими, і ґрунту, скріпленім бітумом та цементобетоном; д) асфальтобетонне покриття на основі гравію; 1 – цементобетон; 2 – прошарок із піску, обробленого органічними зв'язуючими матеріалами; 3 – шар із щебеню; 4 – додатковий морозостійкий шар основи із піску, гравію чи інших морозостійких камінних матеріалів даної місцевості (товщина встановлюється розрахунковим шляхом); 5 – середньозернистий, дрібнозернистий або піщаний асфальтобетон; 6 – крупнозернистий пористий асфальтобетон; 7 – щебінь, оброблений органічним зв'язуючим методом просочення; 8 – щебінь, оброблений в установці органічними зв'язуючими; 9 – гравійна суміш; 10 – гравійна суміш з додаванням щебеню, оброблена зв'язуючими в установці; 11 – ґрунт, укріплений добавками неорганічних зв'язуючих.

В якості конструкційного матеріалу верхніх шарів дорожнього покриття на дорогах України застосовуються, як

правило за незначним виключенням, гарячі щільні дрібнозернисті асфальтобетони I-ої та II-ої марок для автодоріг категорій 1-а, 1-б, 2 та 3, а для автодоріг категорій 3 та 4 – кам'яні подрібнені матеріали, а також підібрані матеріали з промислових відходів, оброблені в'язучими методом змішування в установці або на дорозі, а також з просочування та улаштуванням поверхневої обробки [104, 126].

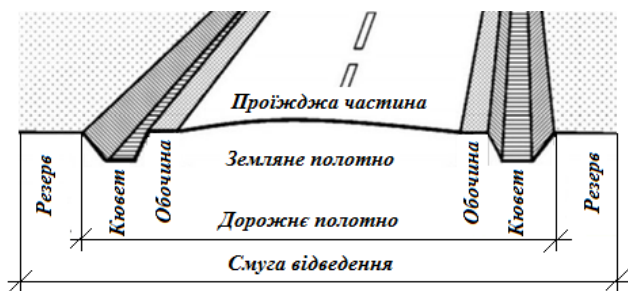


Рис. 1.5. Типовий поперечний профіль автомобільної дороги

В деяких випадках у незначних обсягах в якості конструкційного матеріалу для будівництва верхніх шарів автодорожнього покриття використовують цементобетон з портландцементу, який має відповідає вимогам ДСТУ Б.В. 2.7-46: 2010 “Цементи загального будівельного призначення. Технічні умови” [80]. В конструкції полотна автомобільної дороги не передбачається армування їх покриттів навіть у випадках будівництва автодоріг категорій 1-а та 1-б з інтенсивністю руху автотранспортних засобів понад 10000 авт./добу. Потрібно однак зазначити, що останнім часом на деяких ділянках автомобільних доріг в Україні при проведенні їх капітальних ремонтів почали застосовувати армування верхніх шарів конструкції автодороги за допомогою вертикально-комірчастих армованих структур (рис.1.6), які виготовлено з полімерних матеріалів або композиційних ґраток з склокомпозитних сіток марки СКС відповідно до “Рекомендації по застосуванню ґраток композитних при влаштуванні асфальтобетонних шарів дорожнього одягу РВ.2.7-31911658-823:2013” [162].

Наведений вище порівняльний аналіз характерних конструкційних ознак та відмінностей у технологіях будівництва автомобільних доріг в Україні та в країнах-лідерах у галузі

автодорожнього будівництва свідчить про те, що автодороги, які побудовані в Україні відповідно до ДБН В.2.3-4:2007, за своїми характеристиками конструкційної міцності, надійністю, трибологічними властивостями щодо абразійної міцності, за фретінг-втомою, пітинговим зношуванням тощо значно поступаються кращим світовим аналогам.

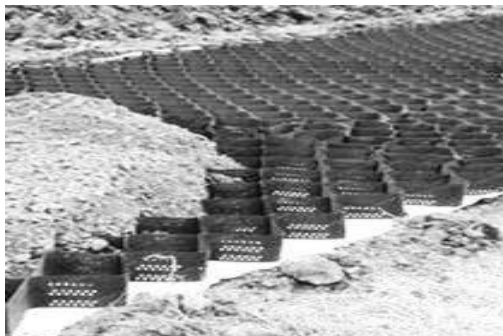


Рис.1.6. Армування верхніх шарів автомобільної дороги полімерними вертикально-комірчастими конструкціями

Цей факт засвідчує і такий показник експлуатаційної надійності автомобільної дороги як гарантійний термін роботи. Якщо в індустріально розвинених країнах гарантійні терміни експлуатації автомобільної дороги до першого капітального ремонту коливаються в межах 20-30 років, то в Україні цей показник не перевищує 4-5 років, що і становить значну небезпеку.

Механічні властивості дорожньо-будівельних матеріалів визначаються емпіричними методами шляхом безпосередніх прямих лабораторних випробувань підготовлених зразків на відповідних випробувальних машинах і стендах [72]. При цьому, головна увага навіть при проведенні поглиблених випробувань, приділяється випробуванням на стискання, згин, зчеплення при зсуві в умовах статичного прикладення навантажень до зразків конструкційного матеріалу [70, 86]. З об'єктивних причин (здебільшого через відсутність випробувального обладнання) не проводяться дослідження механіки контактного руйнування матеріалів автодорожніх покриттів, дослідження в умовах динамічних навантажень на малоциклову (багатоциклову) втому, динамічну в'язкість конструкційних матеріалів, не досліджуються

процеси утворення та розвитку каверн і тріщин, фретінг-втоми та пітингового зношування тощо [171, 172, 210].

Необхідно однак зазначити, що за даними ДержДорНДІ вартість будівництва 1 км автомобільної дороги значно менша ніж в інших провідних країнах світу. Так, орієнтовна нормативна вартість 1 км автодороги категорій 1-а, 1-б в прив'язці до цін 2016 року становить 70-100 млн. грн., реконструкції – 40-80 млн. грн., капітального ремонту 20-30 млн. грн., поточного (середнього) ремонту – 8-12 млн. грн. В той же час в США будівництво 1 км автомобільної дороги групи I або US коштує близько 10 млн. доларів, у Канаді – 11 млн. доларів, а в країнах Європи – від 10,5 до 14,5 млн. євро. Отже, зменшення капітальних вкладень в конструкцію автомобільної дороги та витрат на реалізацію технології її будівництва в 3-5 разів призводить до зменшення експлуатаційного ресурсу автодороги в 5-7 разів, що в свою чергу зумовлює додаткові витрати на здійснення капітальних і поточних ремонтів.

Погіршення транспортно-експлуатаційних властивостей конструкцій автомобільних доріг, відсутність поглиблених наукових даних щодо процесів контактного руйнування матеріалів автодорожніх покриттів, їх тріщиностійкості, фретінг-втоми, пітингового зношування тощо в умовах динамічних навантажень, зумовлює процеси інтенсивного дезінтегрування конструкційних матеріалів автодоріг [224], наслідком чого є збільшення обсягів викидів мінерального пилу, який продукується автотранспортними потоками, розбалансування узгоджених параметрів колективного руху автотранспортних потоків, нестабільність режимів роботи двигунів автотранспортних засобів, що як наслідок, призводить до посилення техногенного впливу на природно-техногенні геоекосистеми з розвиненими автодорожніми мережами [249,281, 282]

1.2. Характерні особливості динаміки та структури складу автотранспортних потоків

В загальному розуміння автотранспортним потоком є, впорядкований автодорожньою мережею рух автотранспортних засобів, який характеризується зокрема такими ознаками як: інтенсивність [1/с], швидкість [м/с], щільність [1/м], а також специфічними параметрами, які визначають особливі характеристики потоків автотранспортних засобів, їх взаємний

вплив і перерозподіл в просторі і часі [243, 244]. Однак, з точки зору формалізації наведеного вище означення автотранспортним потоком можна вважати лише таку множину автотранспортних засобів, яка функціонально за певним визначеним значущим аргументом (аргументами) є неперервною функцією за деякою траєкторією, яку окреслено трасою автомобільної дороги. В загальному випадку неперервність функції $f(x)$ визначається такими трьома умовами [240]:

- функція $f(x)$ має бути обов'язково визначена в точці x_0 ;
- існує границя $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$;
- $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

Якщо хоча б одна умова, з трьох вищенаведених умов неперервності функції, порушується в будь-якій точці, то функція $f(x)$ має в даній точці розрив. При цьому, розрив функції $f(x)$ може бути як усувним (завдяки операції до визначення функції до неперервної), так і неусувним розривом, зокрема так звана точка розриву “стрибок”, яка виникає для $f(x)$ у випадку якщо

$$\lim_{x \rightarrow (a-0)} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow (a+0)} f(x).$$

З точки зору аналізу інтенсивності впливу автотранспортних потоків на екологічну рівновагу природно-техногенної геоекосистеми, за умов наявності в цій системі деякої мережі автомобільних доріг, є структура, склад та обсяги газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортними засобами цих потоків і функціонально залежать від інтенсивності q [1/с] та щільності ρ [1/м] автотранспортного потоку [135]. Отже, нижньою границею, яка визначає колективний рух автотранспортних засобів як автотранспортного потоку, є деяка площа в координатній системі $q \sim \rho \sim f(q, \rho)$, яка визначає мінімальні значення q та ρ , за яких функція $f(q, \rho)$ набуває ознак неперервності.

Загальна частка газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортним комплексом, в структурі викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря діяльністю основних галузей світового суспільного господарства на даний час становить понад 15 % (рис.1.7) [19, 27, 116, 300].

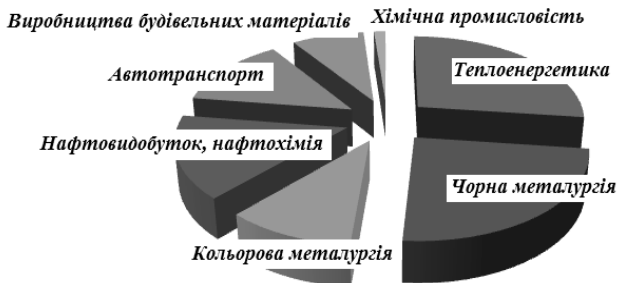


Рис.1.7. Структура викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря основними галузями господарського комплексу

Рух автотранспортних засобів у складі щільних автотранспортних потоків в межах автодорожньої мережі природно-техногенної геоекосистеми суттєво відрізняється від руху одиночного автотранспортного засобу при відсутності динамічно змінюваних перешкод руху [145]. Інтенсивні транспортні потоки спричиняють потужні впливи на рівень забруднення природно-техногенних геоекосистем. Основними чинниками впливу є склад, інтенсивність, щільність, швидкість і прискорення руху автотранспортного потоку, технічний рівень та експлуатаційний стан автотранспортних засобів, обсяги та структура вантажів та пасажиропотоків [234, 237, 242, 293].

Для розрахункового оцінювання питомих газо-пилових викидів (по окремих інгредієнтах: CO_2 , CO , CH , N_xO_y , аерозолі з твердих мінеральних частинок та сажі, ароматичні та поліциклічні вуглеводні приведені до $C_{20}H_{12}$ тощо), які продукуються автотранспортними потоками, а також питомих витрат палива автотранспортним потоком в цілому широко застосовуються рівняння регресії (найчастіше третього порядку) у вигляді [158, 179, 296]:

$$Y_i = A_4 \cdot q_{an}^3 + A_3 \cdot q_{an}^2 + A_2 \cdot q_{an} + A_1 \quad (1.1)$$

де Y_i [кг] – питома маса певного інгредієнту забруднюючого викиду, або питомі витрати палива автотранспортним потоком;

A_i – емпіричні коефіцієнти

q_{an} [1/с] – інтенсивність автотранспортного потоку.

При цьому:

$$A_i = f(S_i, S_j) \quad (1.2)$$

де S_i , S_j – частка автотранспортних засобів, які обладнано дизельними двигунами та частка автотранспортних засобів для перевезення пасажирів у загальній кількості автотранспортних засобів, відповідно [92, 297, 298]

Таким чином, якщо відомі інтенсивності руху та структура і склад автотранспортних потоків на будь-якій ділянці автомобільної дороги, або на автодорожній мережі цілому, викиди шкідливих (токсичних) речовин, маса використаного кисню та витрати палива можуть бути визначені розрахунковим методом з використанням наведеного вище рівняння регресії [74, 78, 179, 190].

Разом з тим розрахунковий метод визначення балансу викидів, які продукуються автотранспортними потоками, не повною мірою враховує такі важливі транспортно-експлуатаційні ознаки автодорожньої мережі як геоморфологічний характер траси автомобільної дороги, її технічний стан, транспортну ємність території та погодно-кліматичні умови (дорожньо-кліматичне зонування) природно-техногенної геоекосистеми, експлуатаційний стан автотранспортних засобів в складі автотранспортних потоків та ряд інших важливих показників, які суттєво впливають на рівень техногенної трансформації та екологічну безпеку природно-територіального комплексу [45, 46, 49, 55, 56, 73, 189]

1.3. Вплив автодорожньої мережі на екологічну рівновагу природно-техногенних геоекосистем

В загальній структурі світових транспортно-комунікаційних мереж (таблиця 1.1) частка мережі автомобільних доріг становить понад 66 %. Внаслідок будівництва автодорожніх мереж відбувається техногенна трансформація природно-територіальних комплексів. Виникає нова ландшафтно-територіальна структура, яка віртуально може бути змодельованою у вигляді опорного каркасу територіальної структури організації виробництва, розселення та комунікацій. Прогнозування змін морфологічних властивостей та динаміки територіальної структури природно-техногенних геоекосистем на

етапі розроблення проектів будівництва (реконструкції) автотранспортних мереж вимагає застосування надійних методів оптимізації цих властивостей (в тому числі і забезпечення фіксованих рівнів екологічної безпеки) [5,10, 13, 15, 16, 48,51, 66].

Однією з визначальних складових частин опорного каркасу територіальної структури організації виробництва, розселення та комунікацій є опорний каркас автотранспортної мережі природно-техногенної геоекосистеми [203]. Опорний каркас автотранспортної мережі регіону при застосуванні до його аналізу (оптимізації) формально-феноменологічних методів має розглядатись як деякий зважений граф [220, 230] цієї мережі, в якому ребрами (дугами) графу є ділянки автомобільних доріг, а вершинами – вузли цих ділянок. Формально-феноменологічні методи аналізу дозволяють застосовувати для оптимізації структури зважених графів прийоми фізико-динамічних аналогів при моделюванні властивостей реальних структур [202]. Приклад оптимізації деякої агломерації за методом фізико-динамічної аналогії опорного каркасу транспортно-комунікаційної системи з плоскою стержньовою фермою наведено на рис.1.8.

В даному випадку структура ребер (дуг) графу транспортної мережі представлена пружними стержнями плоскої ферми, а напрямки розвитку природно-територіального комплексу, як певні прояви антропогенного (техногенного) впливу визначено, як деякі одномоментні зовнішні сили прикладені до структури опорного каркасу у вигляді функцій Хевісайда $H(t)$ [220].

Тим самим, аналіз динаміки опорного каркасу (графу) транспортної мережі віртуально може бути зведений до аналізу динаміки силових факторів в конструкції плоскої стержньової ферми, яку навантажено силами $H(t)$. Визначення зусиль S_i в стержнях моделі-аналогу (плоскій стержньовій рамі) опорного каркасу природно-техногенної геоекосистеми можна реалізувати або за методом перерізів (методом Ріттера), або за методом вирізання вузлів.

На стадії проектування (реконструкції) автодорожньої мережі доцільним є порівняння декількох альтернативних варіантів опорного каркасу структурної організації території з точки зору досягнення максимально можливого рівня екологічної безпеки природно-територіального комплексу [209]. Метод, який розглядається, дозволяє реалізувати таке порівняння варіантів проекту (наприклад, рис.1.8-в та рис.1.8-д). Як інший варіант пропонуваного вище методу віртуального моделювання динаміки

опорного каркасу природно-техногенної геоекосистеми з розвиненою автотранспортною мережею, може бути реалізований також метод моделювання за принципом електродинамічних аналогій [203].

Сутність цього методу зводиться до аналізу струмів в електричному контурі, який імітує сукупність структурних елементів опорного каркасу (вершин та ребер графу автотранспортної мережі) природно-техногенної геоекосистеми (рис.1.9). В цьому випадку одним з варіантів електродинамічної моделі опорного каркасу автотранспортної системи, яку наведено на рис.1.8-а, є електричний контур наведений на рис.1.9-а. Вузли контуру A , B , C , N (рис.1.9-б) є відповідними до точок A , B , C , N опорного каркасу (графу) автотранспортної мережі (рис.1.8-б), а електричні опори R_{AC} , R_{CB} , R_{CN} , R_{EC} , R_{BE} , R_{NE} , імітують відповідні елементи стержньової структури опорного каркасу (графу) природно-техногенної геоекосистеми [180, 212].

Аналіз електродинамічної моделі опорного каркасу природно-техногенної геоекосистеми може бути здійснено як аналітично (рис.1.9-а) на підставі другого закону Кірхгофа [181], так і за допомогою фізичного експерименту, для чого в реальний електричний контур необхідно ввести один або більше регульований опір наприклад, R_{EC}^{var} на рис.1.9-б.

Пропоновані методики модельного аналізу динаміки територіальних структур (мережі автомобільних доріг) природно-техногенних геоекосистем під впливом антропогенної (техногенної) їх складової за допомогою віртуальних моделей-симуляторів опорного каркасу автотранспортного комплексу дозволяють на етапі проектування природно-техногенної геоекосистеми оптимізувати процеси трансформації ландшафтів природно-територіальних комплексів та забезпечити максимально можливий рівень їх екологічної безпеки.

Узагальнене поняття про граничну насиченість природно-техногенної геоекосистеми автотранспортними засобами та автодорожньою інфраструктурою складають на підставі оцінювання транспортної ємності території. Транспортна ємність території – це здатність ландшафту природно-територіального комплексу забезпечувати транспортні потреби (в площах для розташування стаціонарних і рухомих об'єктах автотранспортного комплексу, природних об'єктів території та рекреаційних ресурсів) без порушення екологічної рівноваги [204, 208].

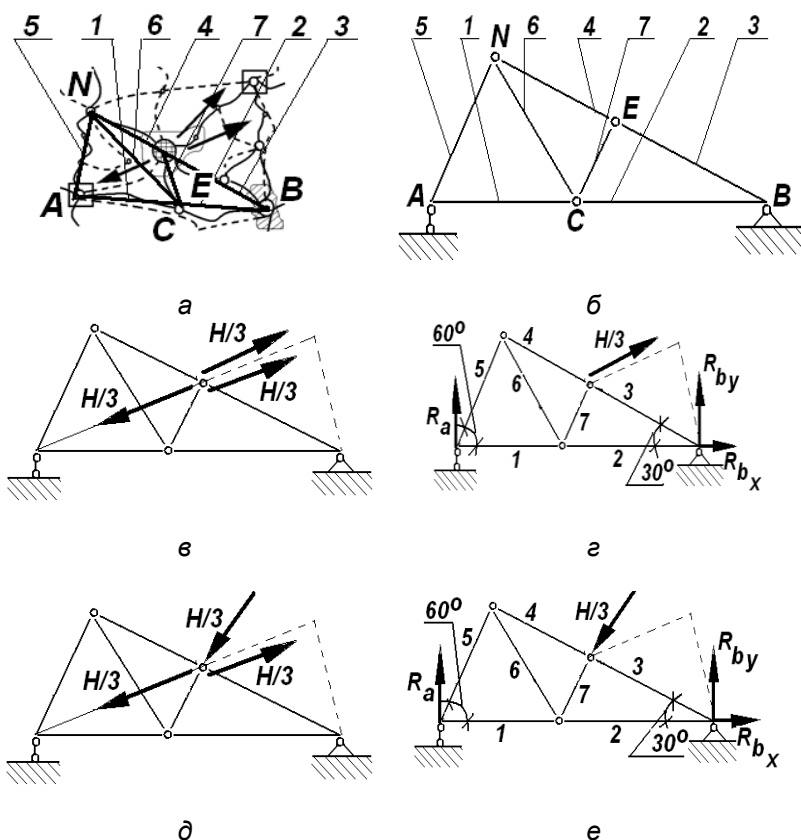


Рис.1.8. Віртуальне моделювання опорного каркасу транспортної системи:

а – структурна організація транспортної системи; б – віртуальна модель графу транспортних магістралей; в – фізико-динамічна модель зовнішніх впливів на граф опорного каркасу; г – розрахункова схема моделі-симулятора структури транспортної мережі; д, е – альтернативний варіант моделі та відповідна розрахункова схема опорного каркасу транспортних магістралей регіону; 1, 2, ..., 7 – елементи стержньової структури опорного каркасу; А, В, С, N, E – вузли стержньової моделі опорного каркасу.

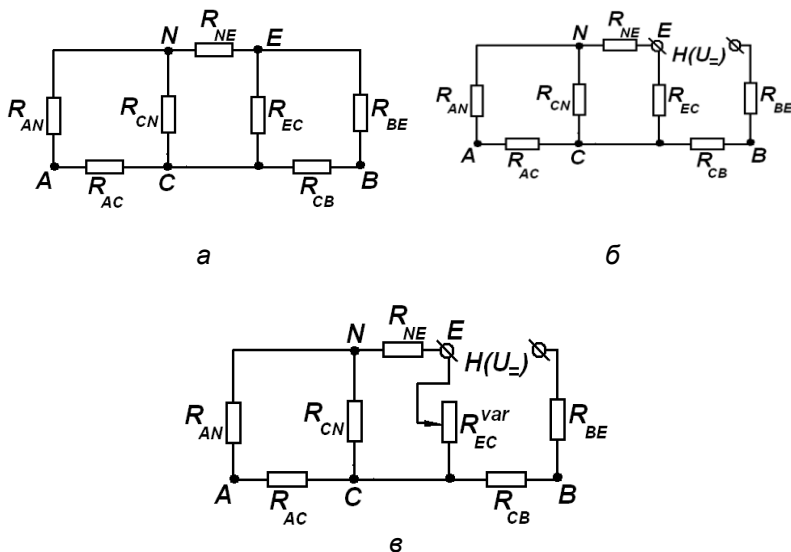


Рис.1.9. Електродинамічна модель-аналог опорного каркасу структурної організації транспортної мережі природно-техногенної геоекосистеми:
 а – теоретичний електричний контур; б – електрична схема контуру для аналітичного дослідження моделі; в – електрична схема контуру для проведення фізичного експерименту

Транспортна ємність D_{max} виражається у вигляді максимально допустимої щільності автодорожньої мережі та автотранспортної інфраструктури в межах природно-територіального комплексу як [126, 209]:

$$\begin{cases} D_1^T = \frac{Y_a \cdot \Pi_H \cdot S_a}{S_T} \leq [D_{max}] \\ D_{max} = \frac{Y_a^{max} \cdot \Pi_H^{max} \cdot S_a}{S_T} \end{cases} \quad (1.3)$$

де Y_a – рівень автомобілізації регіону, авт./люд.;
 Π_H – щільність населення, люд./км²;

- S_a – приведена (з урахуванням об'єктів транспортної інфраструктури) площа території для одиниці рухомого складу автотранспортних засобів, м²/авт.;
- S_T – загальна площа території природно-територіального комплексу, км²;
- Y_a^{max} – максимальний (за умовою забезпечення транспортних потреб регіону) рівень автомобілізації, авт./люд. (варіює в межах 0,45-0,5 авт./люд.);
- Π_H^{max} – щільність населення, які забезпечують сприятливі умови проживання, люд./км², приймають 30-50 люд./км².

За результатами експертних оцінок [3, 5, 8] автотранспортна ємність великих мегаполісів значно перевищує показник D_{max} (іноді більше ніж в 10-15 разів) [126]. В результаті на території міських агломерацій спостерігається інтенсивна деградація природних екосистем, особливо поблизу автомагістралей [270, 271, 272].

Здатність природно-техногенної геоекосистеми підтримувати властивості природно-територіального комплексу в межах деякої екологічно безпечної амплітуди визначається репродуктивною здатністю території по таких основних показниках як: відновлення атмосферного кисню, репродукція поверхневих водних ресурсів, ґрунтово-рослинного покриву, відновлення деревно-чагарникових насаджень.

Репродуктивна здатність Π_K території природно-техногенного комплексу за показником відновлення атмосферного кисню визначається через біологічне продукування органічної речовини рослинних спільнот за формулою [19, 21, 23, 28, 30, 43]:

$$\Pi_K = \sum_{i=1}^n C_i \cdot S_T \cdot K_1 \quad (1.4)$$

де C_i – щорічне продукування органічної речовини i -ю рослинною спільнотою, т/га (обирається таким, що дорівнює: для мішаного лісу – 10-15, оранки – 5-6, зелених зон населених пунктів – 0,8-1,0);

K_1 – коефіцієнт переходу органічної речовини в кисень (за фотосинтезуючими ознаками).

Репродуктивна здатність Π_B території природно-техногенної геоекосистеми за водно-поверхневими ресурсами розраховується в залежності від модуля стоку місцевості,

рельєфних характеристик та кліматичних ознак за формулою [43, 126]:

$$\Pi_B = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \lambda \cdot K_2 \quad (1.5)$$

де S_i – площа території, яка охоплюється ділянками з відомими модулями поверхневого стоку, га;

λ – модуль поверхневого стоку i -ї ділянки поверхні, л/м²;

K_2 – коефіцієнт нерівномірності модулів поверхневого стоку (варіює в межах $K_2=0,1-1,0$).

Репродуктивну здатність Π_n ґрунтово-рослинного покриву визначають опосередковано через показники еродованості та розораності ґрунтів, їх засоленості та біохімічної активності, за формулою [31]:

$$\Pi_n = 100 \cdot K_e \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{B} \quad (1.6)$$

де K_e – коефіцієнт еродованості ґрунтів (обирається в межах 0,1-1,0 [71]);

S_i – площа i -ї ділянки території з індивідуальними характеристиками, га;

B – період (час) перетворення ґрунтово-рослинного покриву, років (обирається в межах – 25-30).

Репродуктивна здатність Π_p рослинних угруповань дорівнює [126, 190]:

$$\Pi_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot S_i \quad (1.7)$$

де C_i – щорічне продукування органічної речовини i -ю рослинною спільнотою, т/га;

S_i – площа i -ї ділянки території з індивідуальними характеристиками деревно-чагарникових угруповань, га.

За обчисленими значеннями (Π_k , Π_b , Π_n , Π_p) репродуктивної здатності території природно-територіального комплексу через узагальнений індекс I_p репродукції можна встановити граничні масштаби транспортного розвитку природно-техногенної геоекосистеми відповідно кожного з компонентів (1.4), (1.5), (1.6), (1.7).

Індексом репродукції (I_p) є відношення показників репродуктивної здатності території природно-територіального комплексу до показників фактичного та перспективного споживання основних біотичних та абіотичних компонентів екосфери в результаті автотранспортної діяльності [126, 163, 164, 166, 168, 169].

Якщо $I_p \rightarrow 1$, має місце збалансований, умовно екологічно безпечний стан природно-техногенної геоекосистеми. Якщо ж $I_p \ll 1$, то це свідчить про високу ймовірність екологічно небезпечного стану регіону і вимагає необхідності реалізації комплексу заходів з поновлення екологічної рівноваги природно-техногенної геоекосистеми у зв'язку з перспективою розвитку автотранспортного комплексу території. Необхідно прагнути до того, аби умова $I_p \rightarrow 1$ виконувалась для кожної з розглянутих вище компонентів (Π_k , Π_b , Π_n , Π_p).

Індекс репродукції (I_p) природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею значною мірою зумовлений також і кліматичними умовами конкретного природно-територіального комплексу. Відповідно до державних будівельних норм ДБН В.2.3-4:2007 "Споруди транспорту. Автомобільні дороги" [77] дорожньо-кліматичне районування території України за погодно-кліматичними ознаками передбачає поділ на чотири зони: північну (У-I), центральну (У-II), південну (У-III) та гірську (У-IV), а за кліматичними умовами експлуатації автодорожніх асфальто-бетонних покриттів – на сім зон: А-1 – А-7.

Таким чином, структура автодорожньої мережі природно-техногенної геоекосистеми в поєднанні з кліматичними умовами природно-територіального комплексу зумовлює основні вимоги до транспортно-екологічної оптимізації автотранспортного комплексу, еколого-раціональної структури парку автотранспортних засобів та їх експлуатаційних властивостей [79].

1.4. Транспортно-екологічна раціоналізація структури автотранспортного комплексу

Основним нормативним документом в Україні, який регламентує вимоги до екологічної безпеки автодорожніх мереж є галузеві будівельні норми України ГБН В.2.3-218-007:2012 “Споруди транспорту. Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування” [69]. Цей документ зокрема передбачав обов’язковість розроблення ОВНС в складі проектної документації на будівництво (реконструкцію) автомобільної дороги, граничні зони впливу на навколишнє середовище в залежності від їх технічних параметрів та екологічного класу дороги (до вступу в дію ОВД). Загалом ГБН В.2.3-218-007:2012 встановлює вимоги щодо захисту повітряного середовища, геологічного середовища, водного середовища, земельних ресурсів та ґрунтів, рослинного і тваринного світу, заповідних об’єктів, передбачає вимоги щодо запобігання та зменшення негативного впливу автомобільної дороги на соціальне і техногенне середовище, захист від фізичних факторів впливу.

Формування раціональної структури автотранспортних засобів з визначенням рівнем екологічної відповідальності за неперевищенням фіксованим обсягом валових викидів автотранспортними потоками $[W_j]$ передбачає оптимізацію цільової функції [59, 126, 183]:

$$W_j(t) = \sum_j \sum_i \sum_k w_{j,i,k}(t) \cdot N_{i,k}(t) \cdot L_{a,i,k}(t) \prod_n R_{j,i,k} < [W_j] \quad (1.8)$$

де $W_j(t)$ – валовий викид j -ї шкідливої речовини сукупністю автотранспортних засобів за розглядуваний період часу, г;

$N_{i,k}$ – кількість автотранспортних засобів, які обладнано k -им типом двигунів, що використовують i -ий тип палива, шт.;

$w_{j,i,k}(t)$ – питомий викид j -ї шкідливої речовини, г/км;

$L_{a,i,k}(t)$ – сумарний пробіг автотранспортних засобів i -ї групи з двигуном k -го типу, тис. км;

$\prod_n R_{j,i,k}$ – добуток коефіцієнтів впливу n -го фактору на викид j -ї шкідливої речовини автотранспортного засобу i -ї групи з двигуном k -го типу.

Допустимий нормований обсяг $[W_j]$ валових викидів автотранспортного комплексу задається на підставі обсягів валових викидів попереднього року.

Розв'язок задачі екологічної оптимізації структури автотранспортного комплексу з використанням цільової функції (1.8) можливий за умови припущення усталених (стабільних) транспортних можливостей автотранспортного парку, тобто [82]:

$$N_{i,k}(t) \cdot L_{a,i,k}(t) = \text{const} \quad (1.9)$$

Алгоритм формування структури автотранспортного комплексу за умовою неперевищення обсягів $[W_j]$ валових викидів має обов'язково містити: прогноз чисельності та структури парку автотранспортних засобів за термінами їх використання, видами та обсягами пального, яке використовується, обґрунтування річного пробігу та граничних обсягів викидів шкідливих речовин по окремих групах автотранспортних засобів, а також блок коригування кількісного складу автомобілів, приведених викидів і витрат пального [67,58].

Практична реалізація цільової функції (1.8) передбачає виконання ітерацій по $w_{j,i,k}(t)$ та $N_{i,k}(t)$ одночасно, або послідовно по кожному з цих параметрів. Найприйнятнішим варіантом проведення ітерацій функції (1.8) є варіант:

$$\begin{cases} w_{j,i,k}(t) = \text{var} \\ N_{i,k}(t) = \text{const} \end{cases} \quad (1.10)$$

В цьому випадку можуть бути обґрунтовані екологічні вимоги (нормативи) викидів, які продукуються окремими групами автотранспортних засобів в прогнозованому автотранспортному комплексі. При виконанні оптимізаційних розрахунків за умовою (1.8) чисельність та структура парку автотранспортних засобів, їх сумарний пробіг може бути визначений або за даними статистичної звітності, або розрахунковими методами. Зазначені показники визначають також і загальну потужність (прогнозовану)

автотранспортної інфраструктури природно-техногенної геоекосистеми [52].

При реалізації задачі транспортно-екологічної раціоналізації автодорожньої мережі природно-техногенної геоекосистеми більш доцільним є використання цільової функції, яка була б прив'язана не до структури парку автотранспортних засобів, а до конкретної площі природно-територіального комплексу. Цільова функція $f_{C\leq[\Gamma ДК_j]}$ в цьому випадку матиме вигляд [46, 47, 49, 51, 126, 198, 200]:

$$f_{C\leq[\Gamma ДК_j]} = \frac{S_{C\leq[\Gamma ДК_j]}}{S} \rightarrow 100\% \quad (1.11)$$

де S – загальна площа природно-територіального комплексу, км;
 $S_{C\leq[\Gamma ДК_j]}$ – площа території природно-територіального комплексу де концентрація j -ї шкідливої речовини, яка продукується автотранспортним потоком, в приземних шарах атмосферного повітря не перевищую значення $[\Gamma ДК_{сд}]$.

Вважається, що автотранспортний комплекс природно-техногенної геоекосистеми сформовано з заданим рівнем екологічної безпеки природно-територіального комплексу, якщо в приземних шарах атмосферного повітря над всією контрольованою територією концентрації окремих компонентів викидів, які продукуються автотранспортними потоками не перевищують середньо-добових значень їх ГДК.

При цьому, для узагальненого оцінювання екологічної безпеки при будівництві (реконструкції), ремонті та утримання під час експлуатації автомобільної дороги може бути застосовано в якості критерію інтегральний показник (K), який розраховується для системи “автомобіль – дорога – середовище” з урахуванням “ваги” окремих параметрів стану природно-територіального комплексу [45, 51, 197, 199]:

$$K = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \quad (1.12)$$

де $S_1, S_2, \dots, S_n$ – значення ступеня відповідності окремих параметрів впливу на об'єкти природно-

територіального комплексу нормативним вимогам, бали;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коефіцієнти “ваги” i -го параметру впливу на об’єкти природно-територіального комплексу на окремих етапах її експлуатації.

Інтегральний показник (K) не лише визначає рівень екологічної безпеки системи “автомобіль – дорога – середовище”, але є також і підставою для розроблення комплексу заходів щодо забезпечення зменшення техногенного впливу мережі автомобільних доріг на об’єкти природно-територіального комплексу [50]. При проведенні такого комплексного оцінювання природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею мають бути враховані і фактори ризику, які виникають в процесі експлуатації об’єктів інфраструктури системи “автомобіль – дорога – середовище”. При цьому рівень експлуатаційної безпеки зазначеного комплексу визначається за формулою [45, 47, 50, 54]:

$$R = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \lambda_i \cdot G_i \quad (1.13)$$

де P_i – ймовірність (частота) виникнення i -ї ситуації;

λ_i – ймовірність (частота) розвитку i -ї ситуації до деякої кінцевої ситуації, яка характеризується формуванням неприйнятної ситуації за деяким фактором негативного впливу;

G_i – “вага” наслідків заподіяних i -ю ситуацією об’єктам інфраструктури природно-техногенної геоекосистеми.

Таким чином, транспортно-екологічна раціоналізація структури автотранспортного комплексу має передбачати комплексне конструювання всією природно-техногенної геоекосистеми цілому на стадії проектування (реконструкції) мережі автомобільних доріг, як визначальної складової системи “автомобіль – дорога – середовище”.

1.5. Динаміка міграційних процесів та депонування викидів забруднюючих речовин, які продукуються потоками автотранспортних засобів

Однією з основних експлуатаційних ознак динаміки колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків є формування рухомої множини факелів газоподібних викидів, які є продуктами згоряння використовуваних палив. В сукупності з пиловими викидами (мінеральний пил, який утворений в результаті дезінтегрування конструкційних матеріалів автодороги і транспортних засобів і сажа, яка є продуктом згоряння деяких видів палива) множина факелів газоподібних викидів утворює газо-пилову хмару викиду, яка і продукується автотранспортним потоком [21, 90]. При надходженні в атмосферу аерозолі газо-пилової хмари викиду відбувається її дифузія з одночасною міграцією в складі повітряних потоків [24, 55]. При цьому, як газові, так і пилові (дрібнодисперсні) компоненти аерозолі газо-пилової хмари викидів, з достатнім рівнем припущення, є пасивними, тобто такими, які не спричиняють будь-яких суттєвих впливів на кінематику і динаміку рухів повітряних мас [186], а отже, міграційні процеси шкідливих інгредієнтів, які продукуються автотранспортними потоками, в межах визначеної природно-техногенної геоекосистеми повністю узгоджені з динамічними ознаками переміщень приземних шарів атмосфери [194]. Відповідно, механізм переносу (міграції) газо-пилової хмари викиду є поєднанням її конвективного переносу в осередненому русі повітряних мас та дифузійного, який зумовлено турбулентними пульсаціями повітряних потоків [134]. Таким чином, міграційні потоки шкідливих інгредієнтів аерозолі газо-пилової хмари викидів, яка продукується автотранспортним потоком, загалом характеризуються ламінарно-турбулентними та перехідними ознаками руху повітряних мас в межах зони впливу автодорожньої мережі.

Якщо розглядати процес міграції інгредієнтів газо-пилової хмари з точки зору “принципу суперпозиції” (додавання), то цей процес описується сумою (f), яка складається з конвективних процесів певного усередненого потоку, який з певним наближенням має ознаки ламінарності і описується середніми значеннями $\bar{f}$ стану повітряних мас та дифузії у турбулентних

вихорах повітря, які можуть бути описані нерегулярними пульсаційними характеристиками $\tilde{f}$, тобто [226]:

$$(f) = \bar{f} + \tilde{f} \quad (1.14)$$

Складова $\bar{f}$, яку з певним наближенням за макро-ознаками можна вважати ламінарною, визначають на підставі усереднення миттєвих значень f . Процедура такого осереднення має здійснюватися за всією сукупністю можливих значень f з урахуванням ймовірності їх реалізації у просторі і часі, тобто має бути реалізоване так зване “усереднення ансамблю”. Для спрощення процедури усереднення значень f у випадку аналізу ергодичних залежностей може бути застосована процедура просторово-часового згладжування [217].

Значно складніший характер ознак має друга складова $\tilde{f}$ рівняння (1.14), яка описує дифузійні неусталені нерегулярні пульсуючі процеси в турбулентних вихорах повітряних мас. Характерний приклад турбулентності в зоні так званої “аеродинамічної тіні” наведено на рис.1.10).

Критерієм переходу струменів потоку ламінарної течії до турбулентного стану є виконання умови [248, 280]:

$$Re = \frac{U^2}{L} \bigg/ \frac{\nu \cdot U}{L^2} = \frac{U \cdot L}{\nu} \geq Re_{кр} \quad (1.15)$$

де Re – число Рейнольдса;

$Re_{кр}$ – критичне значення числа Рейнольдса, яке визначає
 границю переходу течії потоку до турбулентного
 стану;

U – швидкість течії потоку;

ν – кінематична в'язкість речовини потоку (в даному випадку
 повітряної маси).

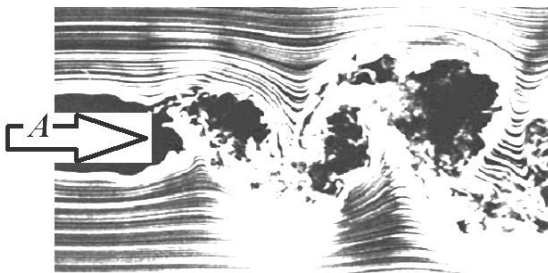


Рис.1.10. Зона турбулентності поміж двома зонами ламінарного потоку, яка виникає в зоні “аеродинамічної тіні” в напрямку стрілки A(vseslova.com.ua)

При зростанні значення числа Рейнольдса і переході в область його закритичних значень в потоках повітряних мас спочатку виникають великомасштабні збурення (пульсації) у вигляді турбулентних вихорів. Лінійні розміри (l) цих пульсацій є сумірними з розмірами L всього потоку, а їх амплітуди (варіативність відносно усереднених значень) максимальні і сумірні з величиною варіабельності швидкостей δU потоку на довжинах L [57]. При подальшому поступовому збільшенні числа Рейнольдса в потоці виникають збурення (турбулентні вихори) все менших масштабів і при $Re \gg Re_{кр}$ в потоці спостерігається каскад турбулентних вихорів з масштабами від сумірних з довжиною L потоку до мікро збурень (розвинена турбулентність) [215, 248].

Отже, визначального значення для аналізу процесів міграції складових інгредієнтів газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортними потоками, у “вільній” атмосфері природно-техногенної геоекосистеми набуває коректне встановлення значень довжини L ламінарно-турбулентних потоків повітряних мас, як довжини відстані перемішування (дифузії) газо-пилового аерозолю хмари викиду. Аналітична модель для визначення значень L була запропонована Прандлем на підставі обчислення “турбулентної” в’язкості речовини двовірного потоку:

$$\nu_t = l_m^2 \cdot \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (1.16)$$

де ν_t – “турбулентна” в’язкість речовини двовірного потоку (в даному випадку повітряної маси);

U – компонента вектора швидкості вздовж течії потоку;
 y – координата поперечного перерізу потоку;
 l_m – відстань, яку проходить виокремлена частинка аерозолію до змішування з сусідніми частинками.

Представлена аналітична модель (1.16), як відзначав сам автор, є досить грубим наближенням і може використовуватись лише для перехідних шарів потоку від ламінарної течії до зони турбулентності. При аналізі процесів турбулентності в перехідних шарах потоку приймають лінійну зміну величини l_m в межах цього шару, а за межами перехідного шару величина l_m обирається як така, що дорівнює товщині δ перехідного шару.

В реальних ландшафтах природно-техногенних геоекосистем розміри та шорсткість їх реальних об'єктів відрізняється достатньо широкою варіабельністю. Так, значущі розміри окремих об'єктів ландшафту варіюють від декількох сантиметрів до десятків кілометрів, а їх шорсткість визначається не лише фізичними та біоценотичними ознаками поверхонь ландшафту, але і динамікою та сезонними особливостями клімату розглядуваної природно-техногенної геоекосистеми [120, 133]. Отже, в реальних умовах значення L (1.15) та l_m (1.16) і, як наслідок значення Re , не можуть бути визначені достатньо коректно для реалізації аналітичних досліджень турбулентної дифузії газо-пилової хмари викидів, яка продукується автотранспортними потоками [132].

Більш доцільним в даному випадку є топологічний (фрактально-геометричний) аналіз [117, 121] характерних ознак турбулентної дифузії газо-пилових аерозолів в приземних шарах “вільної” атмосфери і векторний аналіз градієнтів переміщення повітряних мас [188] над ландшафтними поверхнями природно-техногенної геоекосистеми з ознаками розвиненої автодорожньої мережі. При цьому, фрактально-геометричний аналіз турбулентної дифузії має розглядатись, як геометричний аналог аналітичних досліджень турбулентності [87, 121]. Основною умовою (за Б. Мандельбротом) для реалізації фрактально-геометричних досліджень турбулентної дифузії у “вільній” атмосфері є зокрема те, що область розсіювання газо-пилового аерозолію (просторова множина на якій концентрується турбулентна дифузія) може бути змодельована фракталом [127, 143, 192]. Приклад такої просторової множини, на якій концентрується турбулентна дифузія газо-пилового аерозолію, у вигляді нерегулярного фракталу наведено на рис.1.11.



Рис.1.11. Фрактально-геометрична модель (нерегулярний фрактал) турбулентної дифузії газо-пилової хмари у “вільній” атмосфері (<https://www.google.com.ua>)

Таким чином, загальною задачею аналізу фрактально-геометричного аналізу турбулентної дифузії потоків повітряних мас вздовж ландшафтних поверхонь з різною фрактальною шорсткістю є описання фрактальних границь цих поверхонь та границь турбулентно-дифузійної області газо-пилової хмари викиду, всередині якої реалізуються фрактальні властивості газо-пилового аерозолі. Такий аналіз практично може бути реалізований з використанням регулярних фракталів (рис.1.12) з фрактальною розмірністю (розмірністю Хаусдорфа-Безиковича) $D=1,2618$ [187].

Процес турбулентної дифузії завершується розсіюванням газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортними потоками. При цьому, одні області газо-пилової хмари характеризуються високим ступенем розсіювання, тоді як в інших областях у порівнянні з першими розсіювання аерозолі практично відсутнє. Ця ознака турбулентно-дифузійного процесу отримала назву перемежовуваності. Найбільш видимо дана ознака виявляється при досить великих значеннях Re числа Рейнольдса, тоді коли зовнішня межа турбулентності достатньо велика по відношенню до її внутрішньої межі. Області, в яких зосереджено інтенсивне розсіювання газо-пилового аерозолі, називають несучими або опорними. Для реалізації фрактально-геометричного аналізу турбулентної дифузії Річардсон [65, 87, 183] запропонував концепцію ієрархії турбулентних вихорів, які пов'язані каскадними ознаками, що чітко виявляється в

фрактально нерегулярній моделі турбулентної дифузії газо-пилової хмари, яку наведено на рис.1.12.



Рис.1.12. Регулярні фрактали з розмірністю $D=1,2618$, як моделі турбулентно-дифузійної хмари викиду, який продукується автотранспортним потоком:
а – “потрійне озеро Коха”, б – фрактал Пеано

З урахуванням наведених вище припущень, узагальнене рівняння міграції диспергованих речовин у газо-пиловій хмарі викиду в турбулентній атмосфері набуде вигляду [122]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (\overline{v_\alpha} \bar{q}) - \frac{\partial}{\partial x} K_s \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K_s \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K_s \frac{\partial q}{\partial z} + G \bar{q} = \bar{f} \quad (1.17)$$

де q – значення миттєвої концентрації диспергованих інгредієнтів газо-пилової хмари викидів;

K_s – коефіцієнт турбулентної дифузії інгредієнтів q газо-пилової хмари викидів;

$\overline{v_\alpha} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}$ – складові усередненої швидкості повітряного потоку;

G – величина, обернено пропорційна інтервалу часу, за який концентрація диспергованих в газо-пиловій хмарі викиду інгредієнтів зменшується у порівнянні з початковою в e разів і описує ефекти трансформації інгредієнтів в результаті фізико-хімічних процесів;

x, y, z – просторові координати газо-пилової хмари викиду.

З аналізу рівняння (1.17) походить, що основними фізичними факторами, які визначають процеси перенесення і розсіювання інгредієнтів аерозолі газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком є [201, 236, 243]:

- усереднене перенесення інгредієнтів аерозолі в складі повітряного потоку $\left(\frac{\partial}{\partial x_\alpha}(\overline{v_\alpha \bar{q}})\right)$;
- турбулентна дифузія інгредієнтів аерозолі в горизонтальній площині $\left(\frac{\partial}{\partial x} K_S \frac{\partial q}{\partial x}\right)$ та $\left(\frac{\partial}{\partial y} K_S \frac{\partial q}{\partial y}\right)$;
- турбулентна дифузія інгредієнтів аерозолі у вертикальній площині $\left(\frac{\partial}{\partial z} K_S \frac{\partial q}{\partial z}\right)$.

Окрім того, до фізико-хімічних процесів трансформації інгредієнтів аерозолі газо-пилової хмари викидів, які описані у рівнянні (1.17) параметром G , можна віднести [249]:

- гравітаційне осадження диспергованих інгредієнтів аерозолі під дією поля сил тяжіння;
- хімічні трансформації газоподібних інгредієнтів аерозолі в результаті хімічних та фотохімічних реакцій в атмосфері;
- вимивання інгредієнтів газо-пилової хмари викидів атмосферними опадами.

Практично всі наведені вище фізичні та фізико-хімічні фактори процесів перенесення та дифузійного розсіювання інгредієнтів аерозолі газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортними потоками, перебувають в залежності від метеорологічних умов приземних шарів “нижньої” атмосфери, де і відбуваються процеси міграції та подальшого депонування забруднюючих речовин [134].

Загалом процес депонування пилових інгредієнтів газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортними потоками, передбачає сепарацію дрібнодисперсного пилового компоненту з ламінарно-турбулентного потоку повітряного аерозолі з наступною його адгезією поверхнями ландшафтних об’єктів природно-техногенної геоекосистеми. Отже, основною задачею захисту природно-техногенних геоекосистем з розвиненими автотранспортними мережами від впливу викидів автотранспортних потоків має бути розроблення таких конструкцій автодорожньої інфраструктури, які забезпечували б інтенсифікацію процесу депонування забруднюючих інгредієнтів викидів в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг (з урахуванням метеорологічних і погодно-кліматичних умов природно-територіального комплексу) і максимально звужували б сумарну ширину смуг впливу автодорожньої мережі [6, 7, 20, 42, 68, 70, 79, 85].

1.6. Аналіз методів захисту природно-техногенних геоекосистем від впливу автотранспортного комплексу

Основними завданнями щодо зниження негативного впливу сукупності автотранспортних засобів та автодорожньої мережі на природно-техногенну геоекосистему пов'язані з впорядкуванням (синхронізацією) колективного руху автотранспортних засобів у складі автотранспортних потоків, формуванням раціональної структури парку автотранспортних засобів, оптимізацією автодорожньої інфраструктури загалом і мережі автомобільних доріг зокрема, а також конструюванням штучних споруд та об'єктів (в тому числі і об'єктів ландшафту) на придорожніх територіях [17, 22, 33].

Відсутність систем захисту автодорожньої мережі (рис.1.13) призводить до неконтрольованого забруднення природно-техногенної геоекосистеми, яке залежить від умов міграції забруднюючих речовин, які продукуються автотранспортними потоками, рівнів хімічної активності цих речовин, погодно-кліматичних та метеорологічних умов регіону, характерних ознак ландшафту та підстилаючої поверхні його об'єктів тощо [2, 25, 26]. Отже, екологічна раціоналізація ландшафтної організації природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автодорожньою мережею є дієвим заходом щодо можливості управління екологічною безпекою природно-територіального комплексу в цілому [3, 4, 11, 193, 194].



Рис.1.13. Відсутність засобів захисту на ділянці автодороги М-18 Харків-Дніпропетровськ

Зокрема, для зниження рівнів розчленованості ландшафту природно-техногенних геоекосистем автодорожньою

мережею застосовується спорудження екодуків (рис.1.14), які однак характеризуються несуттєвими захисними властивостями щодо міграційних процесів забруднювачів, які продукуються автотранспортними потоками [40, 111, 139].

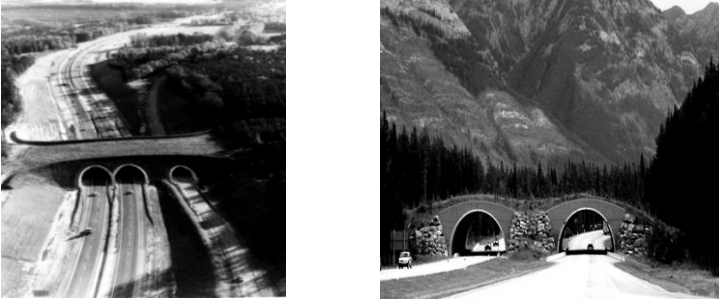


Рис.1.14. Приклади спорудження екодуків (за даними IENE)

Для захисту придорожніх територій від газо-пилових викидів, які продукovanі автотранспортними потоками, забруднення важкими металами, фізичних аномалій та різного роду випромінювань застосовують екранування автомагістралей з високими інтенсивностями автотранспортних потоків [111]. Для будівництва таких екранів використовують різні матеріали (рис.1.15), зокрема і матеріали, які є діловими відходами будівництва (реконструкції) автомобільних доріг [126, 170]. Значна кількість проектів захисних споруд автомобільних доріг є комбінацією інженерно-технічних та біологічних методів захисту природно-техногенних геоекосистем. Прикладом такого сполучення технічного та біологічного методів захисту може бути будівництво бетонно-земляного насипу з відповідним його озелененням, який окрім реалізації суто захисних функцій має також і певне декоративне призначення (рис.1.16) [17, 69, 75, 81, 82, 154].

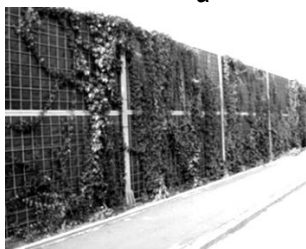
Досить ефективним прийомом захисту придорожніх ландшафтів природно-техногенних геоекосистем від хімічних та фізичних забруднювачів, які продукуються автотранспортними потоками є застосування комбінованих захисних споруд [77], окремі приклади облаштування яких наведено на рис.1.17.



а



б

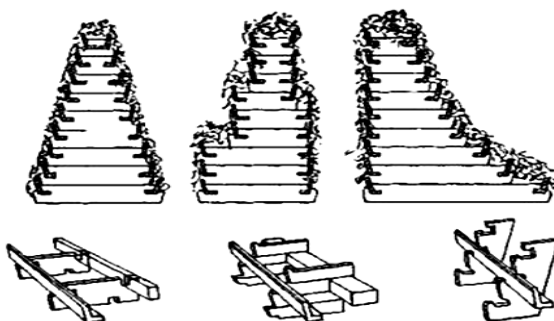


в



г

*Рис.1.15. Приклади захисного екранування автодорі:
а, б – екранування автомагістралей з високою
інтенсивністю автотранспортних потоків, в – екран-
шпалера з плющовими рослинами,
г – екранування шумозахисними панелями ПМК*



*Рис.1.16. Бетонно-земляний вал з озелененням (варіанти
будівництва та елементи конструкцій)*

Доведено [36, 39, 224], що екологічно найефективнішими захисними спорудами автомобільної дороги є двобічні геохімічні

бар'єри у вигляді лісових газо-пилозахисних смуг деревно-чагарникового типу (рис.1.18). Деревно-чагарникові насадження вздовж автомобільних доріг створюють не лише з метою захисту придорожніх ландшафтів від транспортних забруднень, але і для захисту самої автодороги та її конструктивних елементів від впливу негативних природно-кліматичних факторів (наприклад від впливу снігових переметів), для облаштування елементів благоустрою та архітектурного оформлення автомобільної дороги [154, 182]. Озеленення придорожніх територій, згідно з галузевими будівельними нормами ГБН В.2.3-218-007:2012 "Споруди транспорту. Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування" [69], здійснюється відповідно до робочого проекту будівництва автомобільної дороги на спеціально відведених придорожніх ділянках – резервно-технологічних смугах (смугах відведення) [22, 129, 142, 214, 223]

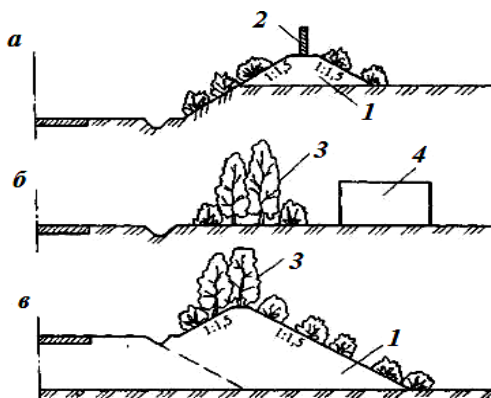


Рис.1.17. Приклади (а, б, в) комплексного застосування захисних споруд:

1 – земляний вал, 2 – захисний екран, 3 – зелені насадження,
4 – нежитлові будівлі та споруди



Рис.1.18. Варіанти лісових газо-пилозахисних смуг автомобільних доріг деревно-чагарникового типу

Для захисту автомобільних доріг та їх інфраструктури від снігових та піщаних переметів застосовують ряд конструкцій (рис.1.19) захисних деревно-чагарникових смуг, конструкція яких визначається екстремальними обсягами перенесення снігу або піщаного пилу [136].

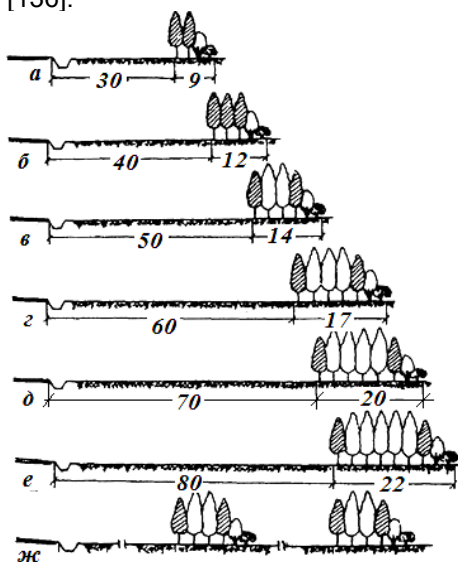


Рис. 1.19. Типові схеми снігозахисних лісових насаджень вздовж автомобільних доріг при обсягах снігоперенесення ($\text{м}^3/\text{м}$): а – до 50, б – до 75, в – до 100, г – до 125, д – до 150, е – до 200, ж – до 250

Аналіз конструкційних особливостей наведених вище конструкцій захисних лісосмуг деревно-чагарникового типу свідчить про їх спрямованість на захист проїжджої частини автомобільних доріг від зовнішніх погодно-кліматичних факторів та особливостей ландшафтної організації пришляхових територій, але жодна з наведених на рис.1.19 конструкцій не забезпечує надійного захисту природно-техногенної геоекосистеми від впливу газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортними засобами.

Значно досконалішою за розглянуті вище конструкції (рис.1.19) захисних лісосмуг деревно-чагарникового типу (за функціональними ознаками захисту придорожніх територій від газо-пилових викидів автотранспортних потоків) є конструкція триярусної лісової газо-пилозахисної смуги, модель поперечного перерізу якої наведено на рис.1.20 [146, 148, 215]. Верхній ярус такої лісосмуги утворюють крони деревних насаджень головної породи, середній ярус – крони дерев супутньої породи і нижній ярус – насадження чагарнику, які загалом визначаються такою схемою посадки:

$$\text{Ч} \leftrightarrow \Gamma \leftrightarrow \text{Ч} \leftrightarrow \text{С} \leftrightarrow \text{Ч} \leftrightarrow \Gamma \leftrightarrow \dots \leftrightarrow \text{Ч} \leftrightarrow \text{С} \leftrightarrow \text{Ч} \quad (1.18)$$

де Γ – головна деревна порода;
 С – супутня деревна порода;
 Ч – чагарник.

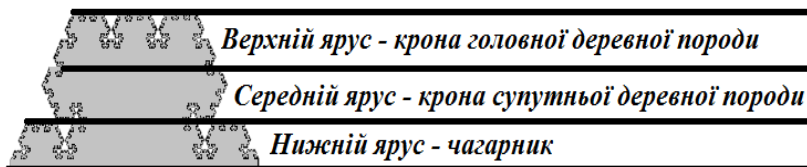


Рис.1.20. Фрактально-інваріантна модель перерізу висотно-просторової структури фітогоризонтів у лісовій газо-пилозахисній смузі ізолюючого типу

Структурна фітоценотична організація моделі поперечного перерізу такої лісосмуги передбачає її фрактально-інваріантну будову, яка відповідає регулярному фракталу Пеано-Пойа [206]. Процедурі виокремлення фітоценотичних складових

головної деревної породи, супутньої деревної породи та чагарнику з вихідного фракталу наведено на рис.1.21. В залежності від ландшафтних ознак природно-техногенної геоекосистеми з розвиненою автодорожною мережею, категорії автомобільної дороги, інтенсивності та щільності автотранспортних потоків визначено відповідні фрактально-інваріантні конструкції лісових газо-пилрозахисних смуг, які наведено на рис. 1.22 [136, 147, 205, 214. 215, 216, 218, 223,229, 246, 247].

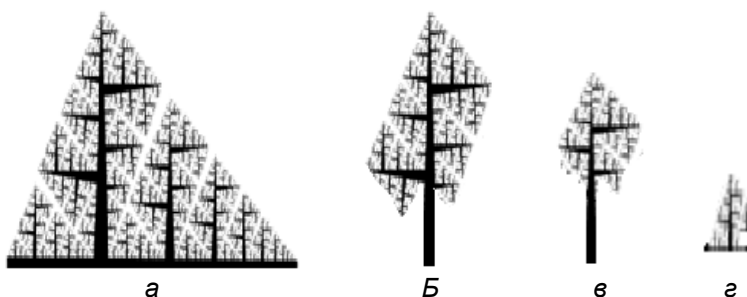


Рис.1.21. Процедура виокремлення модельних складових газо-пилрозахисної смуги деревно-чагарникового типу з регулярного фракталу Пеано-Пойа:

а – вихідний фрактал, б – фрактальна модель головної деревної породи;

в – фрактальна модель супутньої деревної породи,

г – фрактальна модель чагарнику

Характерною ознакою такої конструкції лісової газо-пилрозахисної смуги деревно-чагарникового типу є трапецієвидний профіль її поперечного перерізу з різними кутами нахилу бічних аверсної (обернена до проїжджої частини автомобільної дороги) і реверсної поверхонь. При цьому, кут α нахилу аверсної поверхні лісосмуги в 1,5–2,5 разів менший за кут β нахилу її реверсної поверхні (рис.1.23). Такі геометричні параметри контуру поперечного перерізу захисної лісосмуги ізолюючого типу внаслідок специфічних аеродинамічних умов [216] обтікання смуги повітряними потоками зумовлюють виникнення на її реверсному боці “аеродинамічної тіні”. Конструкція такої газо-пилрозахисної лісосмуги є досить ефективною з точки зору захисту природно-техногенних геоекосистем з розвиненою автотранспортною мережею від

газоподібних викидів, які продукуються автотранспортними потоками, і забезпечує зменшення індексу забруднення атмосфери на реверсному боці смуги в порівнянні з її аверсною стороною за такими інгредієнтами як CO , N_xO_y , SO_2 – в $\sim 10,7$ рази, а рівень відновлення спожитого автотранспортним потоком кисню складає 39–47 % [146, 215, 216].

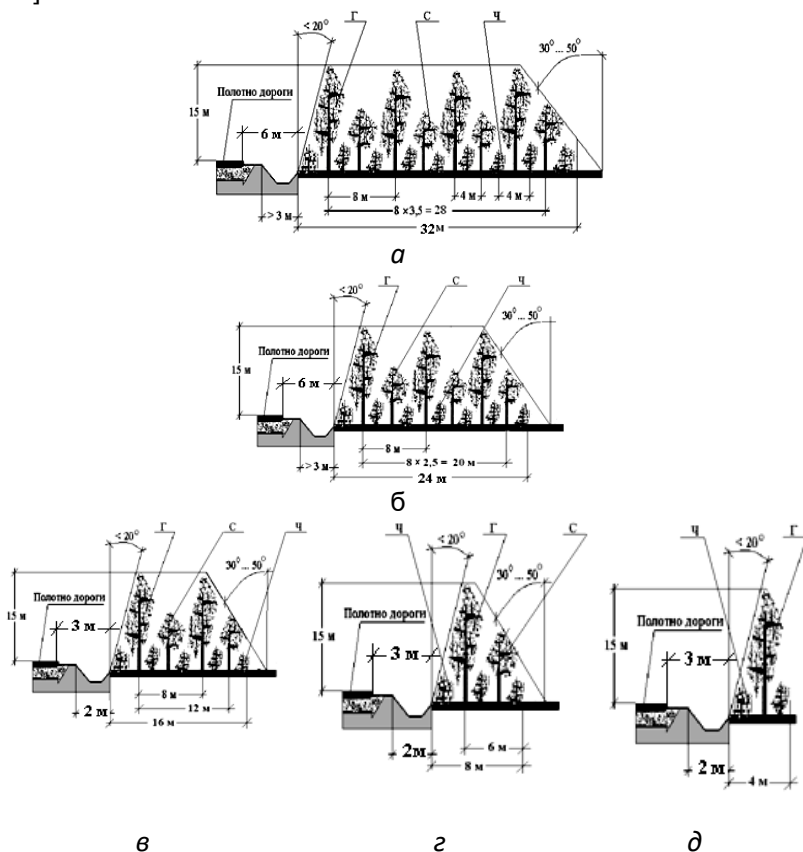


Рис. 1.22. Фрактально-інваріантні моделі лісових газопилозахисних смуг автодоріг: а – категорії 1а, 1б; б – категорія 2; в – категорія 3; г – категорія 4; д – категорія 5; Г – головна деревна порода; С – супутня деревна порода; Ч – чагарник.

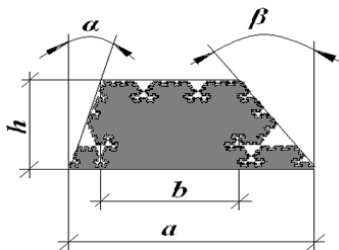


Рис. 1.23. Геометричні параметри профілю поперечного перерізу газо-пилосахисної смуги деревно-чагарникового типу

Для покращення пилосахисних властивостей наведених вище конструкцій газо-пилосахисних лісосмуг автомобільних доріг можуть бути застосовані похідні від неї конструкції [173, 176] з розрідженою посадкою деревних рослин супутньої породи (рис.1.24), або з лабіринтом лакунарних порожнин в структурі фітоценозу лісосмуги (рис.1.25) [57, 148, 149, 213].

Лабіринт лакунарних порожнини у внутрішній структурі фітоценозу такої лісової газо-пилосахисної смуги автомобільної дороги, як правило, зумовлений морфологічними та фітоценотичними властивостями деревних і чагарникових порід [223], однак за необхідності може бути створений штучно [57, 61, 62] при проведенні санітарних рубок лісосмуги (рис.1.26).

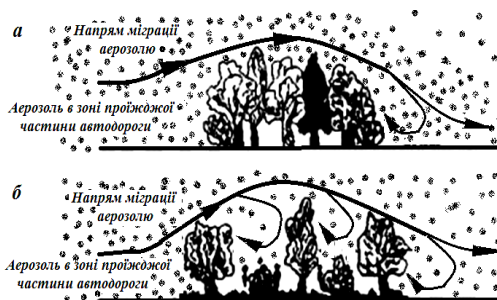


Рис.1.24. Похідна конструкція захисної лісосмуги автомобільної дороги з розрідженою посадкою
<http://www.gosthelp.ru/text/ObzornayainformaciyaAvtom17.html>

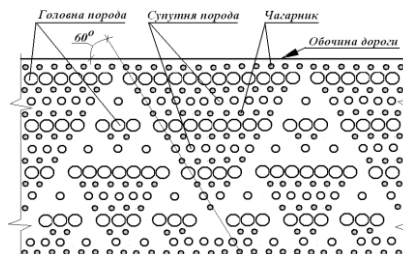


Рис.1.25. План структурної організації посадки деревних і чагарникових порід лісової газо-пилозахисної смуги з лабіринтом лакунарних порожнин (фітоценотичних ніш)



Рис.1.26. Штучно створені лакунарні порожнини (фітоценотичні ніші) в структурі деревно-чагарникової посадки лісової газо-пилозахисної смуги автомобільної дороги

Конструкційне збереження фрактальної інваріантності штучно створених лакунарних порожнин (фітоценотичних ніш) такої газо-пилозахисної лісосмуги (рис.1.27) до вихідної конструкції (рис.1.22) забезпечує підтримання її функціональної ефективності за показниками газоподібних забруднювачів (CO , CO_2 , N_xO_y , SO_2), які продукуються автотранспортними потоками [61, 149]. Разом із цим встановлено, що розглядувана конструкція газо-пилозахисної смуги з лабіринтом лакунарних порожнин забезпечує повне депонування частинок мінерального пилу в межах масиву лісосмуги з фракціями > 150 мкм. Дисперсні частинки мінерального пилу з фракціями < 150 мкм лише частково депонуються в межах лісосмуги, а частково можуть залишатися

диспергованими в повітряному аерозолі, при цьому масова частка недепонованих пилових забруднювачів не перевищує 0,04 % влітку та 0,12 % взимку від загальної маси мінерального пилу, який продукується автотранспортним потоком [57, 218, 219, 225, 251].

Однак, штучно створюваний лабіринт лакунарних порожнин (фітоценотичних ніш) в структурі деревно-чагарникової посадки (рис.1.25) призводить до зміни фрактально-інваріантних ознак верхнього ярусу (рис.1.20) газо-пилозахисної лісосмуги, який сформовано кронами дерев головної породи (рис.1.24).

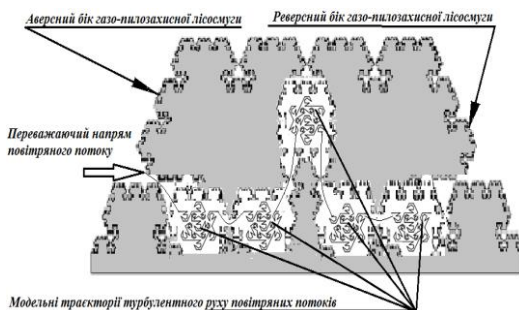


Рис.1.27. Фрактально-інваріантна модель турбулентної субколяції повітряних аерозольних потоків в лабіринті лакунарних порожнини лісової газо-пилозахисної смуги автомобільної дороги

Як наслідок, контур профілю поперечного перерізу конструкції такої смуги не може бути визначений трапецією (рис.1.23), верхню основу якої окреслено прямолінійною асимптотою-контуром регулярного фракталу Пеано-Пойа (рис.1.21), що призводить до зміни характеристик аеродинамічних потоків в складі яких мігрують аерозолі газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортними потоками. Отже, покращення захисних властивостей лісосмуги з лабіринтом лакунарних порожнин за показником контрастності [227] по пилових забруднювачах призводить до погіршення її функціональних властивостей щодо відновлення хімічного складу “нормальної атмосфери” за газоподібними інгредієнтами газо-пилової хмари викиду. Таким чином розглянута конструкція лісової газо-пилозахисної смуги з лабіринтом лакунарних

порожнин (фітоценотичних ніш) вимагає доопрацювання за структурною композицією деревних та чагарникових порід для покращення її функціональних ознак щодо захисту природно-техногенних геоекосистем від газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортним комплексом.

Необхідно також зазначити, що дослідження функціональних властивостей газо-пилозахисних лісосмуг в ландшафтних умовах, як правило, є ускладненим, а іноді і взагалі неможливим з огляду на методологічні особливості експериментів: відсутність ділянок лісосмуг з конструкційно визначеними захисними властивостями (період виведення газо-пилозахисної смуги на експлуатаційні показники з моменту її створення може досягати десяти і більше років, що зумовлено біологічними особливостями деревних і чагарникових порід), мінливість аеродинамічних та метеорологічних умов (опис атмосферних потоків аналітично наближений до атрактору Лоренца), варіативність погодно-кліматичних факторів тощо [40, 51]. Тому для оптимізації захисних властивостей лісових газо-пилозахисних смуг доцільним є застосування методів фізичного моделювання аеродинамічних процесів масопереносу в лабораторних умовах з використанням спеціально розроблених експериментальних моделей, лабораторних установок та випробувальних стендів (рис.1.28, рис.1.29) [35, 41, 115, 118, 122, 114, 125].

Отже, встановлено, що одним з найефективніших заходів підтримання екологічної рівноваги природно-техногенних геоекосистем з розвиненою автотранспортною мережею є створення штучних лінійно-двобічних геохімічних бар'єрів у вигляді газо-пилозахисних смуг, як складової частини інженерної інфраструктури системи “автомобіль – дорога – середовище”, хоча їх конструкції потребують певного доопрацювання спрямованого на підвищення їх функціональної ефективності шляхом поєднання пилозахисних властивостей та здатності до відновлення складу “стандартної атмосфери” [45, 46, 57, 61, 215]

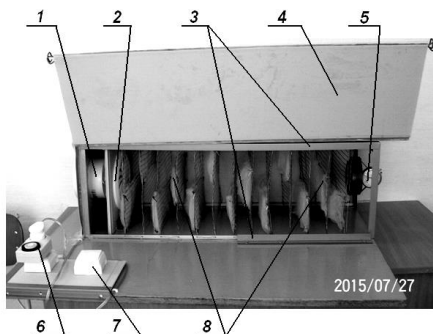


Рис.1.28. Аеродинамічний короб:

1 – вузол осьового вентилятора VENTS-125ВКО-турбо; 2 – жалюзі VENTS-125ПФ для регулювання швидкості вітрового потоку; 3 – опорний каркас; 4 – панелі короба (передня панель піднята); 5 – анемометр лопатевий АСО-3; 6 – таймер; 7 – вмикач електроживлення; 8 – шпалера з моделями гілчасто-листяних ярусів смуги

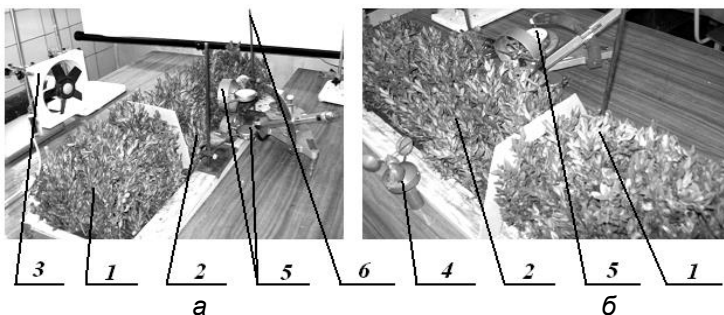


Рис.1.29. Загальний вигляд моделі-імітатора деревно-чагарникової газо-пилозахисної смуги, а – вигляд з боку, б – вигляд зверху:

1 – ділянка муляжу лісосмуги з ажурністю $K^a=0,12$; 2 – ділянка муляжу лісосмуги з ажурністю $K^a=0,59$; 3 – вентилятор типу АF-890; 4 – анемометр індукційний АРІ-49; 5 – анемометр лопатевий АСО-3; 6 – рейтер

1.7. Управління екологічною безпекою територій з щільною мережею автомобільних доріг

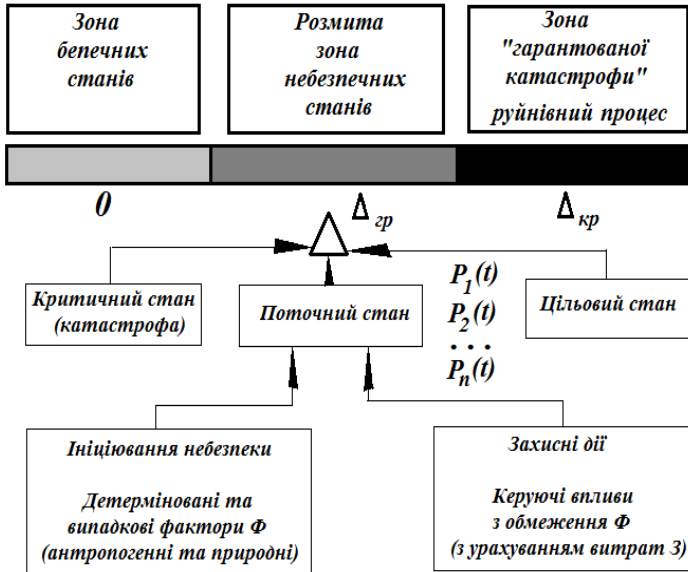
Забезпечення оптимально стабільних фіксованих рівнів екологічної безпеки (рис.1.30) природно-техногенних геоекосистем з розвинутою автотранспортною інфраструктурою в першу чергу передбачає розробку оптимального за ландшафтно-екологічними ознаками (вимогами) робочого проекту автодорожньої мережі [160, 194, 256]. Загалом, основну мету ландшафтно-екологічного проектування автодорожньої мережі можна сформулювати як перспективну оцінку у часі динаміки техногенної трансформації ландшафту під впливом будівництва (реконструкції) автотранспортної інфраструктури [60, 74, 105, 107, 110, 235, 244, 245].

Ландшафтно-екологічне проектування повинне передбачати комплексну оцінку територій, що є основою (вихідними даними) планування та проектування основних чинників їх господарського використання та обґрунтування екологічних наслідків розвитку ландшафтних структур або природно-територіальних комплексів [45, 49, 50, 108, 119, 130, 150].

Ландшафтно-екологічне проектування є широкою розгалуженою за результатами мережею прогнозування динаміки станів природно-техногенної геоекосистеми, які визначають еколого безпечні властивості природно-територіального комплексу [10]. Ландшафтно-екологічне прогнозування має обов'язково враховувати загальнотеоретичні аспекти географічного, ґрунтового, погодно-кліматичного, метеорологічного, гідрологічного та інших прогнозів в межах вирішення спеціальних завдань екологічної безпеки всієї природно-техногенної геоекосистеми в цілому. Складністю є недостатня розробленість загальнонаукових основ методології еколого-ландшафтного прогнозування, що зумовлює спрямованість прогнозних оцінок, як правило, у межах лише кількох компонентів ландшафту [9, 11, 14, 63, 64, 66, 96, 97, 98].

Таким чином, виникає потреба у розробленні надійних методів узагальнення та комплексного (інтегрального) оцінювання багатопараметричної інформації про динаміку станів природно-техногенних геоекосистем (в тому числі і з розвинутою автотранспортною інфраструктурою), які дозволили б не стадії проектування будівництва (реконструкції) автодорожньої мережі

забезпечити достатній рівень екологічної безпеки природно-територіального комплексу.



$\Delta = P_i(t) - P^u$ – відхилення актуального параметру від цільового екологічно безпечного показника

$\Delta_{гр}$ – гранично допустиме відхилення

$\Delta_{кр}$ – критичне відхилення

$P_{пр}$ = оптимізація [небезпека (Φ), корисність ($З$)] – прийнятна ймовірність

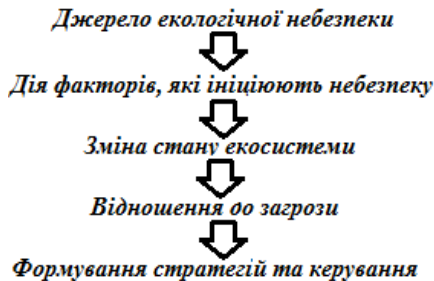


Рис.1.30. Цикл забезпечення екологічної безпеки

Функціонування об'єктів автотранспортної інфраструктури безпосередньо пов'язане з виникненням певних систематичних екологічних та експлуатаційних ризиків [47, 91]. Проектоване функціонування об'єктів автотранспортної інфраструктури, при якому виникає систематичний ризик може бути визначене через математичне очікування окремих чинників екологічної небезпеки протягом встановленого періоду роботи (технічного ресурсу). Ризик R визначається ймовірністю P виникнення небажаної події і обсягом X її (цієї події) наслідків [179]. За умови такого визначення екологічний ризик визначається як [63, 118]:

$$R = \{P, X\} \quad (1.19)$$

Для визначення показника екологічного ризику доцільним є визначення математичного очікування у вигляді деякої скалярної величини [227]:

$$R = P \cdot X \quad (1.20)$$

Аналіз ризиків техногенного впливу автотранспортного комплексу на природно-техногенну геоекосистему починається з оцінювання ризику джерел небезпеки (автодорожня мережа, автотранспортні потоки, об'єкти інфраструктури автотранспортного комплексу) та вимірювання цієї небезпеки з рівнем ефективних впливів на природно-територіальний комплекс. Прийнятний техногенний (транспортно-експлуатаційний) ризик не повинен перевищувати рівнів ризиків від об'єктивних чинників, які визначають екстремальний перебіг природних процесів (зливи, повені та паводки, зсуви або обвали ґрунту, снігові лавини, буревії тощо) [45].

Оцінювання ризиків джерел небезпеки автотранспортного комплексу має також містити сукупність методів аналізу транспортно-експлуатаційної надійності його окремих об'єктів. На підставі аналізу всіх статистичних рядів розраховують кінцеву ймовірність можливості виникнення ризиків втрати транспортно-експлуатаційної якості функціонування автотранспортної системи, що призводить до погіршення встановленого рівня екологічної безпеки природно-територіального комплексу [262].

Екологічно небезпечні впливи автотранспортної системи на навколишнє середовище та об'єкти природно-територіального комплексу наведено в таблиці 1.1 [47, 50, 113, 228, 258].

При цьому, потрібно також зазначити, що проблемними, з точки зору екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з розвиненими автотранспортними мережами, є випадки різкого збільшення інтенсивності руху та щільності автотранспортних потоків і пов'язані із цим підвищення наднормативних рівнів розрахункових навантажень на окремі ділянки автомобільної дороги, а також збільшення обсягів газо-пилових викидів та рівнів фізичних забруднень на придорожніх територіях.

Таблиця 1.1 - Вплив автошляхової мережі на навколишнє середовище

Характер негативного впливу	Прояв негативного впливу
Вичерпання місцевих природних ресурсів	Відчуження земельних площ. Видобуток кам'яних матеріалів, піску, ґрунту. Руйнування родючих шарів ґрунту та дернини.
Зміни рельєфу ландшафту	Облаштування насипів вище (нижче) профілю природного рельєфу, будівництво відкосів, виїмок, бічних резервів, узбіч, кавальєрів невикористаного ґрунту, розробка зосереджених резервів, глибоких кар'єрів, які поєднуються з природним рельєфом.
Гідротехнічні роботи	Осушення (дренаж) земель та боліт, регулювання стоку (водовідвід), облаштування напірних гідроспоруд, зміна русл водотоків, облаштування насипів на болотах.
Технологічні забруднення	Мінеральне запилення, шуми, вібрації від будівельної техніки та вибухових робіт, стоки ґрунтових суспензій, забруднення поверхні ґрунту в місцях тимчасових споруд та стоянок техніки, прокладка комунікацій на пришляхових смугах, обробка антижелезевими матеріалами тощо.
Транспортні забруднення	Відпрацьовані гази транспортних засобів, транспортні шуми та вібрації, побутове забруднення пришляхових територій, рекреаційні навантаження.

Отже, структура і склад парку автотранспортних засобів, їх технічний стан, технічне обслуговування та ремонт,

ландшафтна організація мережі автомобільних доріг, організація вантажних і пасажирських перевезень, будівництво об'єктів автотранспортної інфраструктури, виробництво будівельних матеріалів, організація руху автотранспортних потоків – призводить до зовнішніх впливів на природно-техногенну геоекосистему з розвиненою автотранспортною мережею. Головним завданням проектного управління є досягнення екологічної безпеки природно-територіального комплексу з одночасним збалансуванням матеріальних і ресурсних витрат на будівництво та експлуатацію автотранспортної системи з одночасним виконанням завдань та зобов'язань щодо превентивно визначених обмежень проекту будівництва (реконструкції) автодорожньої мережі.

II. СТРУКТУРА, СКЛАД ТА ОБСЯГИ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН, ЯКІ ПРОДУКОВАНІ ПОТОКАМИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Викиди забруднюючих речовин, які здійснюються автотранспортними засобами, їх структура, склад та обсяги, неможливо визначити застосовуючи принцип суперпозиції, тобто додаванням динаміки впливу окремих одиничних автотранспортних засобів. Автотранспортні потоки завжди функціонально прив'язані до існуючої або спроектованої автодорожньої мережі, а отже і до ландшафтно-територіальних умов конкретної природно-техногенної геоекосистеми. Пов'язана з цим варіабельність умов руху автотранспортних потоків призводить до зміни режимів руху, роботи двигунів транспортних засобів, витрат пального, надійності та довговічності конструкцій автодоріг і, як наслідок, до специфічних для кожної конкретної природно-техногенної геоекосистеми, функціональних характеристик викидів шкідливих речовин, умов їх міграції та депонування [178, 185, 191]. Основними аргументами цих функціональних характеристик є: структурний склад, усереднена швидкість та інтенсивність руху автотранспортного потоку, а також конструкційні особливості, технічний рівень та експлуатаційний стан автомобільної дороги. При цьому, транспортна здатність автодороги визначається не лише її конструкційними особливостями, але і специфікою організації руху, який забезпечує як достатню безпеку кожного учасника, так і визначає рівень техногенної та екологічної безпеки всього природно-територіального комплексу вцілому.

До небезпечних впливів автотранспортного комплексу (в тому числі і за їх обсягами) необхідно віднести: продукти руйнування (дезінтеграції) та зношування мінеральних матеріалів конструкції автомобільних доріг, газоподібні токсичні та небезпечні шкідливі речовини, які є продуктами згоряння пального у двигунах внутрішнього згоряння автотранспортних засобів [122, 116].

2.1. Викиди мінерального пилу та пилових аерозолів

Викиди мінерального пилу та пилових аерозолів, які здійснюються автотранспортними засобами, відрізняються за своїм походженням, складом, структурою та обсягами. Основним

диспергованим компонентом пилового забруднення є мінеральний пил, який утворюється внаслідок руйнування (дезінтеграції) та зношування конструкційних матеріалів автомобільних доріг в результаті фретінг-втому і пітингового пошкодження [128]. Загалом під дезінтеграцією будемо розуміти процес подрібнення багатокомпонентної мінеральної суміші конструкції автомобільної дороги, яка утворена відносно слабо зв'язаними поміж собою складовими частинами і характеризується утворенням каверн (рис.2.1) [15, 16, 80].

2.1.1. Процеси дезінтеграції мінеральних речовин при експлуатації автомобільних доріг

Внаслідок взаємодії рушія транспортного засобу з поверхнею автодороги в останній в місці дотику виникає напружено-деформований стан зумовлений тиском, який припадає на достатньо малу площу окреслену деякою плямою контакту (рис.2.1). Конструкційний матеріал (як шари асфальтобетону, так і підстилаючі шари щебеню), не маючи можливості вільно деформуватися, зазнають об'ємного напруженого стану [210]. На підставі розв'язування задачі Бусінеска-Фламана контактні напруження мають явно місцевий характер і досить швидко зменшуються в міру віддалення від зони контакту (рис.2.2).



Рис.2.1. Характер профілю каверн поверхонь автомобільних доріг

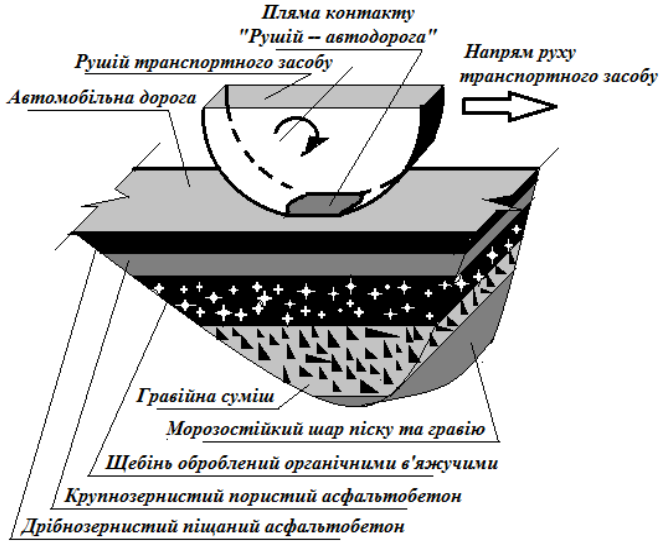


Рис.2.2. Характер контакту рушія транспортного засобу з автомобільною дорогою

На підставі розв'язку "задачі Герца" про контакт двох циліндрів [240]:

$$b = 2,15 \sqrt{q \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \quad (2.1)$$

встановлено, що найбільше напруження стискання, яке діє в точках осі плями контакту [198]:

$$\sigma_{max} = 1,27 \frac{q}{b} = 0,418 \sqrt{2q \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}} \quad (2.2)$$

де: q – інтенсивність розподіленого за твірними циліндрів навантаження;

E_1 та E_2 – модулі пружності матеріалів першого і другого циліндрів відповідно;

R_1 та R_2 – радіуси першого і другого циліндрів відповідно.

При цьому, аналіз напружено-деформованого стану конструкції автомобільної дороги свідчить про те, що небезпечна точка розташована в площині, яка проходить через паралельні осі циліндрів на глибині $0,8b$, де b – півширина контактної площинки “рушій транспортного засобу – автомобільна дорога” (рис. 2.3). Головні напруження в цій точці матимуть такі значення [73]:

$$\begin{cases} \sigma_I = -0,180 \cdot \sigma_{max} \\ \sigma_{II} = -0,288 \cdot \sigma_{max} \\ \sigma_{III} = -0,780 \cdot \sigma_{max} \end{cases} \quad (2.3)$$

а найбільше дотичне напруження в небезпечній точці становить:

$$\tau_{max} = 0,32 \cdot \sigma_{max} \quad (2.4)$$

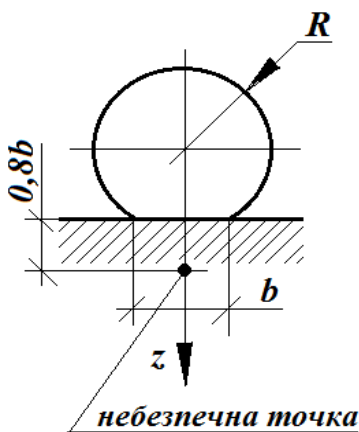


Рис.2.3. Схема контакту “циліндр – площина” (“рушій – дорога”)

При розгляді контактної взаємодії (рис.2.3) рушія транспортного засобу і автомобільної дороги (циліндр – площина) приймаємо у формулі (1.2) $R_2 = \infty$. І в цьому випадку отримуємо:

$$\sigma_{max} = 0,418 \sqrt{2q \frac{1}{R} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}} \quad (2.5)$$

де R – радіус рушія транспортного засобу (рис.2.3);

E_1 – модуль пружності рушія транспортного засобу;

E_2 – модуль пружності конструкційного матеріалу автодороги.

Враховуючи “м’якість” напруженого стану в небезпечних точках (всі три головних напруження у формулі (2.3) є стискаючими), перевірку міцності при контактних напруженнях виконується за третьою або четвертою теоріями міцності:

$$\sigma_{еквIII} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (2.6)$$

$$\sigma_{еквIV} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (2.7)$$

де $[\sigma]$ – допустимі напруження для матеріалу дороги.

Підставивши в формули (2.6) і (2.7) значення головних напружень в небезпечній точці, які виражені через найбільше напруження σ_{max} в центрі плями контакту, умови міцності можна записати в такому вигляді:

$$\sigma_{екв} = m \cdot \sigma_{max} \leq [\sigma] \quad (2.8)$$

де m – обраний коефіцієнт запасу міцності конструкційного матеріалу дороги. Звідки:

$$\sigma_{max} \leq \frac{1}{m} [\sigma] = [\sigma]_{конт} \quad (2.9)$$

В формулах (2.8) і (2.9):

$$[\sigma]_{конт} = \frac{1}{m} \cdot [\sigma] \quad (2.10)$$

що є допустимим значенням для найбільшого напруження в зоні контакту.

Окрім процесів контактного руйнування дорожнього покриття під дією рушіїв транспортних засобів поверхневий шар полотна автомобільної дороги, перебуваючи на жорсткій основі зазнає деформацій складного згину (рис.2.4). У вертикальних ярусах деформованого полотна автодороги завжди можна виокремити деякі елементарні прямокутні шари або пластини [138, 224], які (з певним наближенням) зазнають циліндричного згину (рис.2.5).

Вираз для визначення відносної деформації в шарі, що перебуває на відстані z від серединної площини за аналогією з зігнутою балкою матиме вигляд:

$$\varepsilon_x = \frac{(\rho_x + z)d\theta - \rho_x d\theta}{\rho_x dx} = \frac{z}{\rho_x} \quad (2.11)$$

де ρ_x - радіус кривизни серединної поверхні.

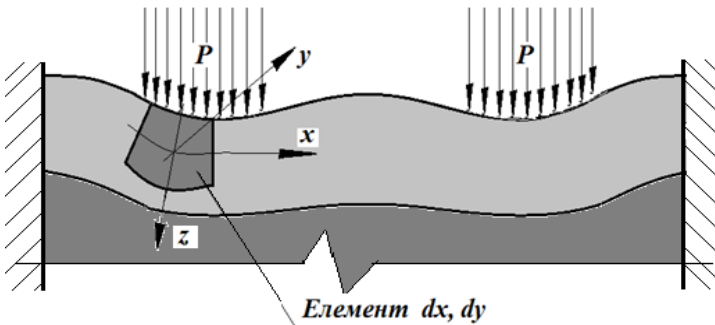


Рис.2.4. Згин поверхневого шару полотна дороги

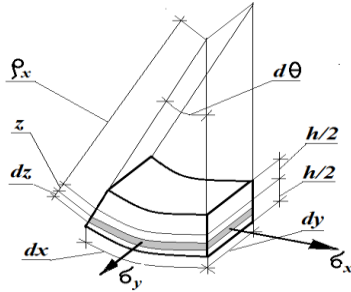


Рис.2.5. Елементарний об'єм циліндрично zdeформованої пластини

Окрім того:

$$\varepsilon_y = 0 \quad (2.12)$$

Так як маємо плоский напружений стан, то відповідно до закону Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_x}{E} \quad (2.14)$$

З (2.11) – (2.14) отримуємо:

$$\sigma_y = \mu \sigma_x \quad (2.15)$$

$$\sigma_x = \frac{z}{\rho_x} \cdot \frac{E}{1 - \mu^2} \quad (2.16)$$

При малих прогинах кривизну $1/\rho_x$ можна замінити на другу похідну прогину:

$$\frac{1}{\rho_x} = -\frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.17)$$

Тоді:

$$\sigma_x = -\frac{Ez}{1 - \mu^2} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.18)$$

$$\sigma_y = -\mu \cdot \frac{Ez}{1 - \mu^2} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.19)$$

Відповідно до формул (2.18) і (2.19) встановлено, що напруження σ_x та σ_y змінюються за товщиною пластинки відповідно до лінійного закону в залежності від z і по різні напрями від серединної площини мають різні знаки. Ці напруження пов'язані із згинаючими моментами такими інтегральними статистичними залежностями:

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \quad (2.20)$$

$$M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \quad (2.21)$$

Індекси згинаючих моментів відповідають напрямкам тих напружень, якими вони створюються. Згинаючі моменти будемо вважати додатними, якщо вони намагаються зігнути елемент пластинки опуклістю донизу.

Якщо підставити у залежності (2.20) та (2.21) вирази напружень з (2.18) та (2.19), отримаємо наступні диференційні рівняння:

$$M_x = \frac{d^2 w}{dx^2} \cdot D \quad (2.22)$$

$$M_y = -\mu \cdot \frac{d^2 w}{dy^2} \cdot D \quad (2.23)$$

де

$$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2.24)$$

Де величина D є жорсткістю пластини при циліндричному згині, або циліндричною жорсткістю.

Відповідно до (2.22) і (2.23) моменти M_x та M_y пов'язані поміж собою залежністю:

$$M_y = \mu \cdot M_x \quad (2.25)$$

Запишемо рівняння (2.22) у вигляді:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M_x}{D} \quad (2.26)$$

Вираз (2.26) є диференціальним рівнянням зігнутою пружної поверхні пластинки. Таким чином, обчислення прогинів пластинки при циліндричному згині зводиться до інтегрування рівняння (2.26).

Застосувавши у рівняннях (2.18) та (2.19) вирази кривизни $d^2 w / dx^2$ через згинаючі моменти і циліндричну жорсткість, отримані відповідно у (2.22) та (2.23), отримаємо формули для визначення напружень:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{M_x}{h^3/12} \cdot z \\ \sigma_y = \frac{M_y}{h^3/12} \end{cases} \quad (2.27)$$

Відповідно залежності (2.27), циліндричний згин в чистому вигляді за всією довжиною пластини може виникнути лише в тому випадку, коли до її бічних (коротких) сторін прикладено моменти $M_y = \mu \cdot M_x$, величина яких вздовж осі x змінюється так само, як змінюються моменти M_x . Якщо ж моментів M_y немає, то поблизу бічних країв форма пружної поверхні пластинки дещо відхиляється від циліндричної.

В реальних умовах згин прямокутних пластин (шарів конструкції автомобільних доріг) є дещо складнішим ніж

розглянуті вище випадки. Внутрішні силові фактори в поперечних перерізах пластини визначають безпосередньо через зовнішні навантаження, а прогини – інтегруванням простого диференційного рівняння другого порядку. Внутрішні силові фактори і прогини є функціями двох незалежних змінних x та y в прямокутній системі координат. Сумісний розгляд рівнянь статки, геометричних і фізичних залежностей дозволяє виразити всі внутрішні силові фактори через функцію прогину $w(x, y)$. Розв'язок цієї функції зводиться до інтегрування диференційного рівняння четвертого порядку в частинних похідних з постійними коефіцієнтами. Це основне диференціальне рівняння теорії згину пластинок має такий вигляд [210]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (2.28)$$

де p – інтенсивність поперечного навантаження.

Обчислення функції $w(x, y)$, яке задовольняло б рівнянню (2.28) і граничним умовам пластини, є достатньо складною задачею. Зазвичай вирази для прогинів, зусиль і моментів отримують у вигляді нескінченних рядів.

В реальних умовах згину поверхневих шарів дорожнього одягу, які за всією розглядуваною площиною оперті на шари нижніх ярусів конструкції, їх розрахунок ще більше ускладнюється. Так, диференціальне рівняння зігнутої осі балки постійного перерізу на пружній основі матиме вигляд:

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} = \frac{1}{EJ} \cdot [q(x) - \alpha \cdot w(x)] \quad (2.29)$$

де q – інтенсивність навантаження;

w – величина прогину;

E – модуль пружності конструкційного матеріалу;

J – момент інерції перерізу.

Наведені вище розрахунки на міцність поверхневих шарів конструкцій автомобільних доріг засновані на оцінці міцності конструкційних матеріалів у небезпечній точці. При таких розрахунках найбільші нормальні, дотичні або еквівалентні напруження (в залежності від виду напруженого стану і обраної

теорії міцності) в небезпечній точці порівнюють із допустимим напруженням. Якщо найбільші розрахункові напруження не перевищують допустимих, то вважається, що необхідний запас міцності конструкції цим забезпечується. Такий спосіб розрахунків на міцність є розрахунком за допустимими напруженнями. Метод розрахунків міцності за допустимими напруженнями забезпечує міцність матеріалів конструкції, однак в багатьох випадках не дозволяє раціонально використовувати всі властивості конструкційного матеріалу з точки зору його міцності.

При розрахунках за допустимими напруженнями небезпечним, або граничним, станом конструкції вважають такий її стан при якому найбільше напруження хоча б в одній точці матеріалу конструкції досягає небезпечної величини. Стан же решти маси матеріалу не враховується [104].

Практика експлуатації реальних конструкцій автодоріг свідчить, що при появі місцевих пластичних деформацій конструкція ще може задовольняти поставлені до неї вимоги і для переходу її в граничний стан необхідне подальше зростання зовнішніх навантажень. Таким чином, в реальності конструкція автомобільної дороги має запас міцності, більший ніж встановлено при розрахунках за допустимими напруженнями [128, 250].

У зв'язку із зазначеним недоліком розрахунків на міцність за допустимим напруженням виникає необхідність удосконалення підходів до оцінки міцності конструкцій. Як альтернативний підхід може бути використано метод розрахунку конструкцій автомобільних доріг за граничним станом [247]. Під граничним станом конструкції автомобільної дороги, необхідно розуміти такий її стан, при якому конструкція втрачає здатність протидіяти зовнішнім навантаженням або припиняє задовольняти поставлені до неї експлуатаційні вимоги.

Розрізняють три види граничних станів:

- перший граничний стан – за несучою здатністю (міцності та витривалості при повторних змінюваних зовнішніх навантаженнях);
- другий граничний стан – за розвитком значних деформацій (прогинів, втрати форми), які не допустимі за умовами експлуатації;
- третій граничний стан – за утворенням та критичним “розкриттям” берегів тріщин.

Для виконання проектних розрахунків при будівництві автомобільних доріг застосовується теорія пластичності Сен-Венана. Відповідно до цієї історії, пластичний стан конструкційного матеріалу при складному напруженому стані спостерігається тоді, коли найбільші дотичні напруження досягають граничного значення – межі текучості при зсуві [210]:

$$\tau_{max} = \tau_m \quad (2.30)$$

Розрахунок за граничними станами дозволяє виявити додаткові резерви міцності конструкційних матеріалів.

Розрахунок за граничними станами з визначеним запасом міцності не гарантує запобігання появи місцевих пластичних деформацій, що є допустимим лише при дії постійних (стабільних) зовнішніх сил (впливів). При змінюваних навантаженнях, що і є характерним для конструкцій автомобільних доріг, поява пластичних деформацій в більшості випадків є недопустимою. Тому, в таких випадках необхідно виконувати розрахунки за допустимими напруженнями.

Отже, під дією рушіїв транспортних засобів, яка змінюється в часі як за напрямком, так і за інтенсивністю, поверхневі шари покриття автомобільної дороги зазнають деформацій складного згину. Внаслідок таких деформацій у найбільш деформованих (як правило розтягнутих) поверхневих шарах конструкції автодороги виникають тріщини (рис.2.6). Під дією повторно-змінюваних навантажень відбувається розвиток (зростання) розмірів тріщин, розкриття їх “берегів” та їх взаємне перехрещення, що призводить до руйнування поверхневих шарів дорожнього одягу. Поєднання декількох факторів руйнування дорожнього одягу (рис.2.7), таких як багатоциклове розтягування-стискання окремих шарів покриття в результаті знакозмінюваного згину, складний напружено-деформований стан покриття в зоні контакту рушія транспортного засобу з полотном автодороги і, як наслідок його крихке руйнування з утворенням каверн, що призводить до інтенсифікації руйнування поверхневих шарів покриття автомобільних доріг (рис.2.8) [210].

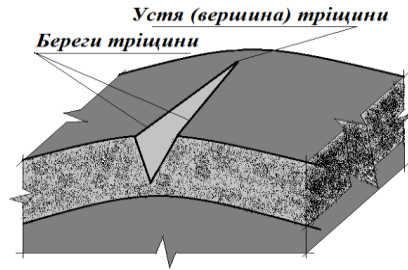


Рис.2.6. Характер утворення тріщини на поверхні дорожнього одягу

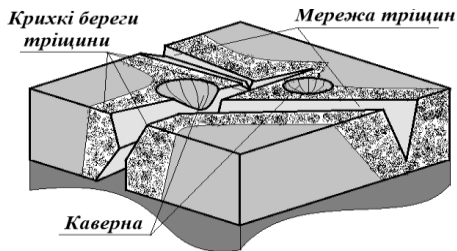


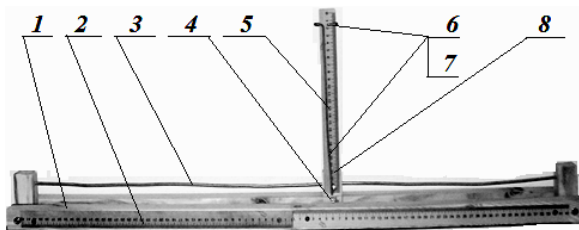
Рис.2.7.Комплексний характер руйнування покриттів автомобільних доріг



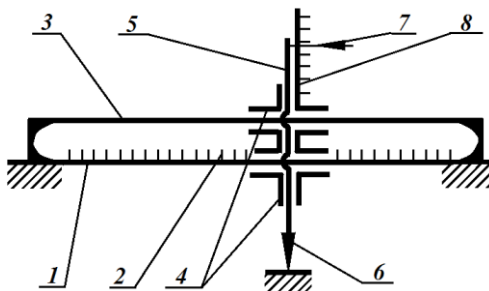
Рис.2.8. Характер утворення мережі тріщин на поверхні дорожнього одягу автомобільної дороги

2.1.2. Аналітичне моделювання обсягів диспергування мінеральних речовин автотранспортним потоком при руйнуванні автодорожнього покриття

На підставі аналізу характеру процесів руйнування дорожнього одягу було виконано профілювання контурів типових каверн за допомогою спеціально розробленого профілометра (рис.2.9) [252].



а



б

Рис.2.9. Профілометр: а – загальний вигляд, б – конструкційна схема:

- 1 – опорна рейка; 2 – установочна шкала; 3 – напрямляюча;
4 – повзун; 5 – вимірювальна штанга; 6 – глибиновказівник;
7 – вимірювальна стрілка з аретиром; 8 – вимірювальна шкала

Профілометр (рис.2.9) складається з опорної рейки (п.1) з установочною шкалою (п.2) та жорстко встановленій на рейці напрямляючої (п.3). Вдовж напрямляючої вільно переміщується повзун (п.4), в напрямляючому отворі якого вільно рухається у

вертикальному напрямі вимірювальна штанга (п.5), на робочому кінці якої міститься глибиновказівник (п.6). На вимірювальній штанзі жорстко встановлено вимірювальну стрілку (п.8) з аретиром для фіксації показань глибини профілю каверни.

Показання глибини профіля каверни визначається за вимірювальною шкалою (п.8). Загальний принцип застосування профілометра для профілювання контуру каверни наведено на рис.2.10.

За результатами профілювання типових каверн, які утворюються при руйнуванні поверхневих шарів автомобільних доріг, встановлено, що профіль контуру каверн достатньо задовільно може бути описаний рівнянням кола (рис.2.11):

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.31)$$

або еліпсу (рис.2.11):

$$\left(\frac{x}{d_1/2}\right)^2 + \left(\frac{y}{d_2/2}\right)^2 = 1 \quad (2.32)$$

де d – діаметр профілю каверни у вигляді кола;

d_1, d_2 – малий і великий діаметри профілю каверни у вигляді еліпсу, відповідно.



Рис.2.10. Профілювання контуру каверни, утвореної на поверхні автомобільної дороги

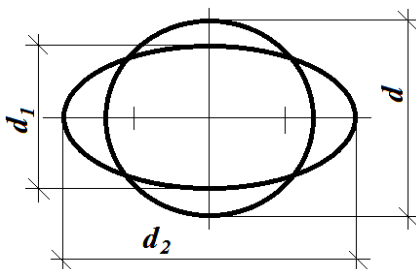


Рис.2.11. Профілі контуру каверн автомобільних доріг

При цьому, площа A поверхні каверни, окреслена колом (2.33) або еліпсом (2.34) буде визначатись як:

$$A_k = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.33)$$

$$A_e = \pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right) \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right) \quad (2.34)$$

Якщо визначати добуток d_1 , d_2 , як їх середнє геометричне, то:

$$d_{\Sigma} = d = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad (2.35)$$

А отже для подальшого аналізу дезінтегрування мінерального матеріалу конструкції автомобільної дороги при утворенні каверн, профіль їх контуру має обиратись у вигляді кола з усередненим діаметром d_{Σ} .

За результатами профілювання поверхонь автомобільних доріг в зонах утворення каверн (типовий профіль каверни наведено на рис.2.12) запропоновано графоаналітичну модель поверхні каверни у вигляді еліптичного параболоїду обертання симетричного відносно вертикальної осі z (рис.2.13), рівняння якого в загальному випадку має вигляд:

$$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} \quad (2.36)$$

де $p > 0; q > 0$ – параметри еліптичного параболоїда обертання.

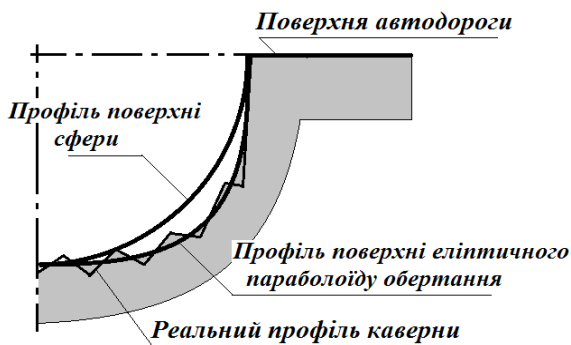


Рис.2.12. Графоаналітична модель контуру поверхні каверни автомобільної дороги

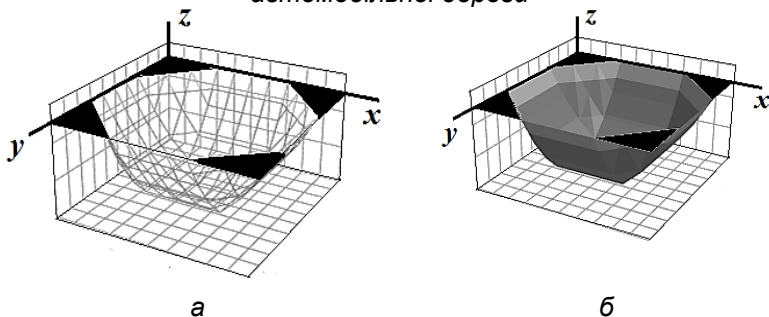


Рис.2.13. Модель дорожньої каверни:
а – ізолінійна; б – просторова

Відповідно, об'єм параболоїда обертання за умови обмеження його верхньої частини деякою областю D , що окреслена колом з діаметром d_z

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{1}{2}d_z\right)^2 \quad (2.38)$$

становитиме:

$$V = \iiint_V dx \cdot dy \cdot dz = \iint_D z(x, y) \cdot dx \cdot dy \quad (2.39)$$

Для визначення об'єму моделі каверни (рис.2.13), переходимо від декартової системи координат до циліндричної і, з огляду на симетричність параболоїда відносно осі z , знаходимо об'єм четвертої частини параболоїда для $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ (рис.2.14):

$$v = \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^a \rho \frac{\rho^2 \cdot \cos^2 \varphi + \rho^2 \cdot \sin^2 \varphi}{2d} \cdot d\rho =$$

$$= \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^a \rho \frac{\rho^2}{2d} \cdot d\rho = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{d^{(4-1)}}{2} = \frac{\pi}{32} \cdot d^3. \quad (2.40)$$

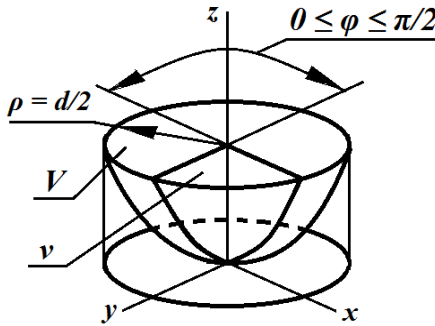


Рис.2.14. Модель дорожньої каверни в циліндричних координатах

За результатами розв'язання (2.40) отримуємо значення V об'єму параболоїда:

$$V = 4v = 4 \frac{\pi}{32} d^3 = \frac{\pi}{8} d^3. \quad (2.41)$$

Якщо визначити частку зруйнованого полотна проїжджої частини дороги через деякий коефіцієнт k , як:

$$k = \frac{A_k}{A_\Sigma} \quad (2.42)$$

де A_k – сумарна площа каверн, m^2 ;

A_{Σ} – площа проїжджої частини автодороги м^2 ;
то після відповідних перетворень, отримуємо вираз для визначення обсягів $V_{\text{дз}}$ дезінтегрованих мінеральних речовин на довжині в 1 км, при руйнуванні дорожнього одягу автомобільної дороги в залежності від рівня (частки) k його руйнування:

$$V_{\text{дз}} = \frac{10^4 (a \cdot k)^{3/2}}{\sqrt{0,1\pi}} \quad (2.43)$$

або:

$$V_{\text{дз}} = 1,76 \times 10^4 (a \cdot k)^{3/2} \quad (2.44)$$

де a_i – ширина проїжджої частини дороги визначеної категорії.

Результати аналітичного дослідження об'ємів $V_{\text{дис}}$ утворення дезінтегрованих мінеральних речовин на довжині в 1 км, при руйнуванні дорожнього одягу автомобільної дороги [222] в залежності від рівня (частки) k його руйнування наведено в таблиці 2.1 та на рис.2.15.

За результатами визначення об'ємів дезінтегрованого мінерального матеріалу в результаті руйнування конструкції автомобільної дороги можна розрахувати відповідні масові ($\text{кг/год.} \times \text{км}$) показники $M_{\text{дз}}$ (таблиці 2.2):

$$M_{\text{дз}} = \frac{\gamma \cdot V_{\text{дис}}}{t_p} \quad (2.45)$$

де $\gamma = 1,5 \dots 1,8$ (т/м^3) – усереднена густина асфальтобетонних та щебеневих шарів конструкції автомобільної дороги [80];
 $t_p = 8760$ (год.) – річний фонд часу.

Дезінтегрована частка $M_{\text{дз}}$ мінеральних матеріалів конструкції автомобільної дороги, з огляду на характер процесу їх руйнування (рис.2.16) відрізняється багатокомпонентністю за фракційним складом (для розклинюючих фракцій $\sim 0 \dots 20$ мм – ДСТУ Б.В.2.7-34-2001 [80]). Таким чином, для виокремлення з загального обсягу $M_{\text{дз}}$ частки $M_{\text{дис}}$ мінерального пилу, який може утворювати забруднюючі аерозолі, необхідно визначити обсяги мінерального пилу з фракційним складом меншим за 500 мкм.

Таблиця 2.1

Обсяги утворення дезінтегрованих мінеральних речовин
залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу
автодороги, м³

Частка зруйнованого полотна автодороги, $k \times 10^{-3} (\%)$	Категорія автомобільної дороги				
	I-а, I-б	II	III	IV	V
0,20	2,91	1,03	0,93	0,74	0,48
0,40	8,30	2,93	2,65	2,10	1,36
0,60	15,24	5,38	4,87	3,85	2,50
0,80	23,46	8,28	7,49	5,93	3,85
1,00	32,78	11,57	10,46	8,28	5,37
1,20	43,10	15,21	13,76	10,89	7,06
1,40	54,32	19,17	17,34	13,72	8,90
1,60	66,36	23,42	21,18	16,61	10,88
1,80	79,25	27,95	25,28	20,01	12,98
2,00	93,60	32,74	29,61	23,44	15,21
2,20	-	37,77	34,16	27,04	17,54
2,40	-	43,03	38,92	30,80	19,99
2,60	-	48,52	43,88	34,73	22,54
2,80	-	54,23	49,04	38,82	25,19
3,00	-	60,14	54,39	43,05	27,93

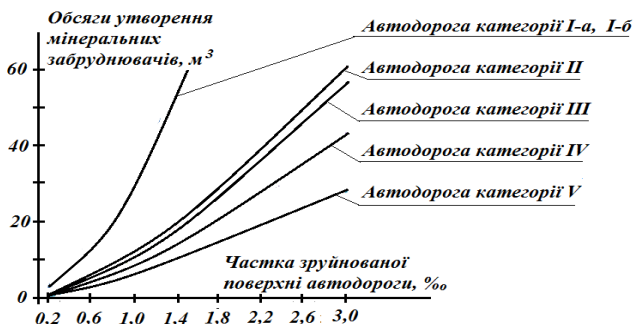


Рис.2.15. Динаміка утворення диспергованих мінеральних речовин залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу автодороги

Таблиця 2.2

Маса дезінтегрованих мінеральних речовин залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу автодороги, кг/год. *км

Частка зруйнованого полотна автодороги, $\text{к} \times 10^{-3} (\%)$	Категорія автомобільної дороги				
	I-а, I-б	II	III	IV	V
0,20	0,599	0,212	0,192	0,152	0,099
0,40	1,710	0,604	0,546	0,433	0,280
0,60	3,139	1,108	1,003	0,793	0,515
0,80	4,833	1,706	1,543	1,222	0,793
1,00	6,753	2,383	2,155	1,706	1,106
1,20	8,879	3,133	2,834	2,243	1,454
1,40	11,190	3,949	3,572	2,826	1,833
1,60	13,670	4,825	4,363	3,422	2,241
1,80	16,326	5,758	5,208	4,122	2,674
2,00	19,282	6,744	6,100	4,829	3,133
2,20	-	7,781	7,037	5,570	3,613
2,40	-	8,864	8,018	6,345	4,118
2,60	-	9,995	9,039	7,154	4,643
2,80	-	11,171	10,102	7,997	5,189
3,00	-	12,389	11,204	8,868	5,754

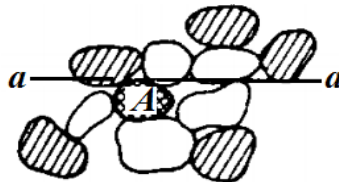
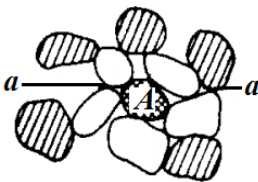


Рис.2.16. Деформація і зсув сипучого тіла

Для визначення обсягів диспергованого мінерального пилу з фракційним складом меншим за 500 мкм розглянемо фрактально-інваріантну модель композиційної будови гетерогенної структури шарів конструкції автомобільної дороги (гравійно-щебенева максимально ущільнена структура) відповідно до “гіпотези Кеплера” про максимально щільну упаковку куль у просторі. Регулярна фрактально-інваріантна структура зазначеної моделі наведена на рис.2.17 [184, 203, 275].

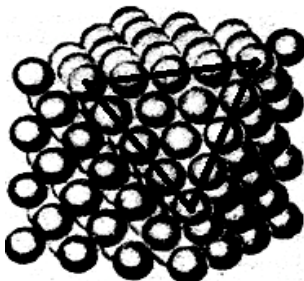


Рис.2.17. Морфологічна модель регулярної структури максимально щільної упаковки куль у просторі

Для подальшого структурного аналізу пропонованої моделі виконаємо побудову тришарового ґратчастого агрегату шляхом накладення шарів, в яких центри куль розташовано у відповідності до “гексагональної” ґратки (рис.2.18). Щільність ρ заповнення простору для “гексагональної” упаковки куль у просторі становитиме:

$$\rho = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \approx 0,7402 \quad (2.46)$$

і, відповідно, об’єм e дванадцяти тетраедричних порожнин (пористість) такої моделі буде визначена як:

$$e = (1 - \rho) = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \approx 0,2698; \quad (2.47)$$

а діаметр дезінтегрованих частинок гетерогенного заповнення об'єму при послідовному заповненні порожнин дисперсною фазою мінеральних частинок становитиме:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot e^r}{\pi \cdot (n \cdot m)^r}} = 1,241 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{e}{n \cdot m}\right)^r} \quad (2.48)$$

де $n = 12$ – кількість порожнин в одиниці об'єму тришарової моделі з “гексагональною” ґраткою;

$m = 13$ – кількість мінеральних частинок дисперсної фази в порожнині дезінтегрованого матеріалу.

r – порядок диспергування дисперсної фази.

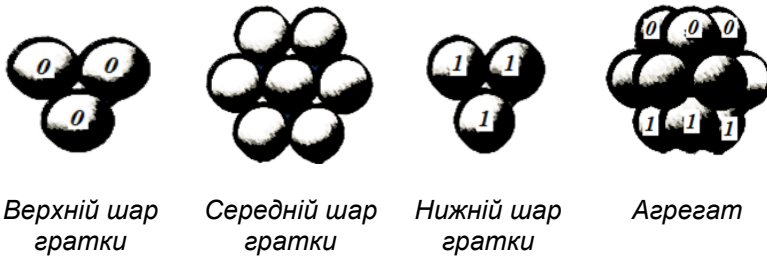


Рис.2.18. Побудова тришарової моделі з “гексагональною” ґраткою

При значенні $r > 1,85$ отримуємо $d \ll 500$ мкм. Отже, частка маси $M_{\text{дис}}$ дисперсної фази від загального значення $M_{\text{дз}}$, становитиме:

$$M_{\text{дис}} = e^{r=1,85} \cdot M_{\text{дз}} \approx 0,089 \cdot M_{\text{дз}} \quad (2.49)$$

Таким чином відповідно до (2.45) і (2.49) визначено масу утворюваного мінерального пилу та його частку дисперговану в атмосферному повітрі, яка утворює стабільний аерозоль, залежно від конструкційних особливостей автомобільної дороги [251], інтенсивності автотранспортних потоків, динаміки річного руйнування дорожнього покриття (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3

Маса пилових викидів та їх диспергована частка, які продукуються автотранспортними потоками, кг/год.*км

Категорія автодороги	I-а, I-б	II	III	IV	V
Інтенсивність автотранспортного потоку авт/добу	> 10000	3000 – 10000	1000 – 3000	150 – 1000	< 150
Маса мінерального пилу, кг/год.*км	19,3	12,4	11,2	8,9	5,8
Маса дисперсної фази в стабільному атмосферному аерозолі, кг/год.*км	1,75	1,12	1,01	0,80	0,52

Таким чином встановлено, що обсяги утворення автотранспортними потоками викидів мінерального пилу, залежно від конструкційних особливостей автомобільної дороги, інтенсивності автотранспортних потоків та динаміки річного зношування дорожнього покриття, варіюють в межах 6-19 кг/год.*км, а їх частка, яка утворює повітряний аерозоль становить 0,5-1,8 кг/год.*км.

2.1.3. Обсяги викидів диспергованих мінеральних речовин, які утворюються в результаті абразивне зношування конструкції втомобільних доріг.

Для дослідження обсягів диспергування мінеральних речовин конструкції автомобільної дороги в результаті її абразійного зношування мають бути застосовані методи моделювання трибологічних процесів, які відбуваються в поверхневих ярусах дорожнього одягу. При цьому суттєвого значення набувають дослідження деформування і руйнування

(дезінтеграції) поверхневих ярусів конструкції автодороги на мікро- та мезорівнях пітінг- і фретінг- процесів [241, 248]. При моделюванні процесів мікро- та макрозношування поверхонь найефективнішими виявляються моделі аналізу кінетики мікро- та мезотріщин в поверхневих шарах конструкційних матеріалів. Отже, для визначення обсягів викидів мінеральних речовин, які утворюються в результаті абразійного зношування поверхневих шарів конструкцій автомобільних доріг має бути розроблено двовірний (плоский) аналог морфологічної моделі регулярної структури максимально щільної упаковки структурних елементів у просторі, яку наведено на рис.2.17.

Аналогом “гексагональної” упаковки куль у просторі в двовірному евклідовому просторі є розташування центрів куль у вершинах правильної шестикутної ґратки, в якій кожна куля оточена шістьма іншими. Щільність такої упаковки (рис.2.19) становитиме:

$$\rho = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,9069 \quad (2.50)$$

Для практичної реалізації механічних випробувань динаміки морфологічних ознак формозміни гетерогенної структури щибенево-гравійних шарів конструкції автомобільної дороги (рис.2.16) розроблено дві їх двовірні моделі-аналоги – з “гексагональною” упаковкою куль на площині (рис.2.20-а) з щільністю упаковки відповідною до (2.50) $\rho \approx 0,9069$ та попередньо “структуровану” модель (рис.2.20-б), яка складена з окремих “гексагональних агрегатів” після відповідної формозміни вихідної моделі. Щільність такої упаковки кругів на площині відповідно становитиме $\rho \approx 0,6049$. Пропоновані моделі матеріалізовано за допомогою набору структурних елементів (рис.2.20-в), які зібрано у відповідні структури за допомогою каліброваних метизів.

Відповідно до деформаційних особливостей та структурної міцності щибенево-гравійних шарів конструкції автомобільної дороги визначено таку програму механічних випробувань розроблених моделей. Для процесу утворення каверн – послідовне випробування на розтягування моделі (а) та моделі (б), наведених на рис.2.20, що імітує крихке руйнування поверхні автодороги в результаті дії контактних напружень в зоні контакту “дорога – рушій автотранспортного засобу” (рис.2.21). Для процесу дезінтеграції мінеральних матеріалів конструкції

автодороги в результаті їх трибологічного зношування – послідовне випробування на зсув моделей (а) та (б) – рис.2.21, що імітує абразивне зношування поверхні автодороги в результаті фретінг-втоми та пітингового пошкодження (рис.2.22).

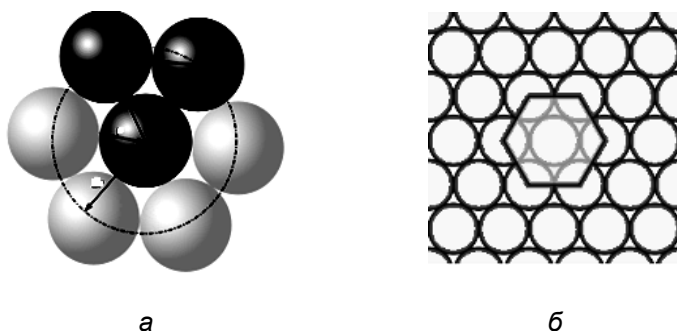


Рис.2.19. Двовірний аналог (а) “гексагональної” упаковки куль у просторі та геометрична модель її структури (б)

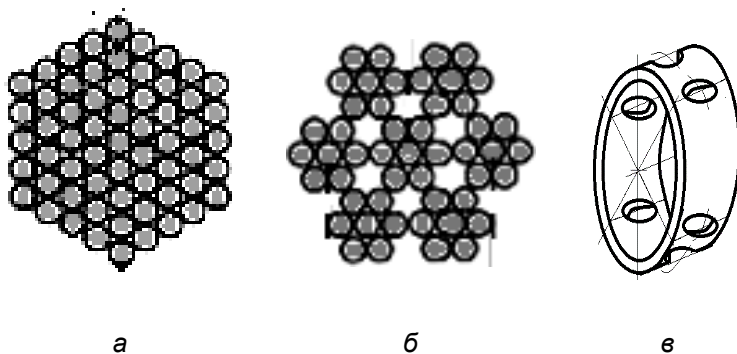
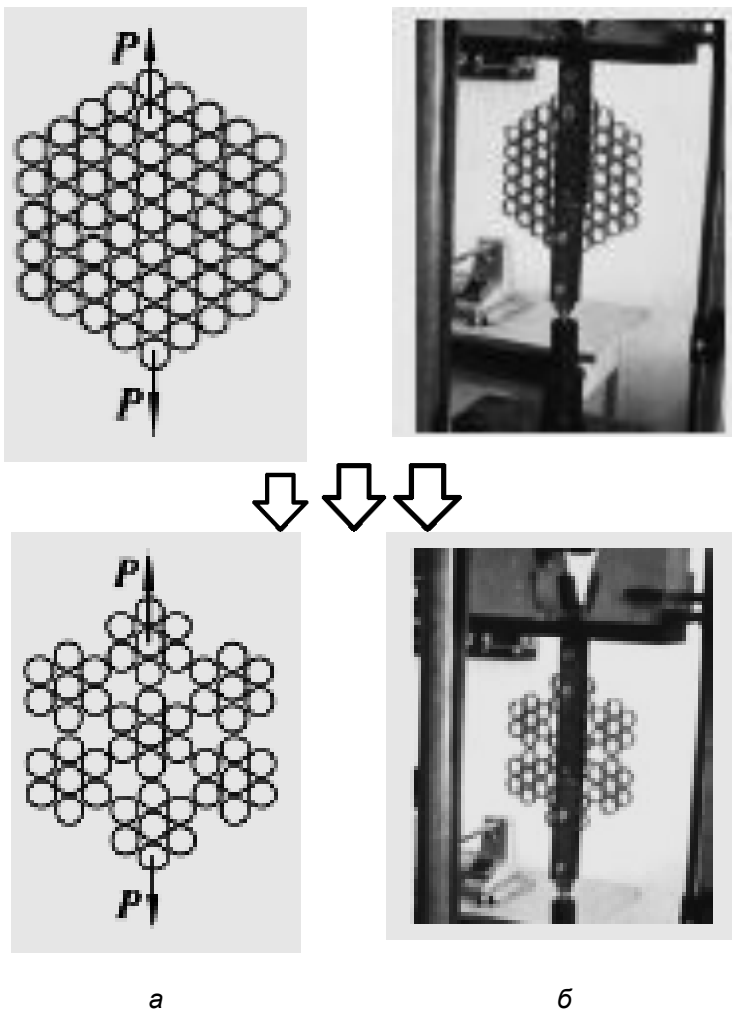


Рис.2.20. Варіанти двовірних моделей-аналогів гетерогенної структури щебенево-гравійних шарів конструкції автомобільної дороги (а, б) і структурний елемент для їх виготовлення (в)



*Рис.2.21. Послідовність механічні випробувань моделі щебенево-гравійних шарів конструкції автомобільної дороги при імітації утворенні каверн на її поверхні:
а – схема навантаження моделі, б – практична реалізація експерименту*

За результатами механічних випробувань моделей-аналогів щебенево-гравійних шарів конструкції автомобільних доріг (додаток Ф) отримано відповідні діаграми (рис.2.23) в координатах:

$$P \cdot H(t) \sim \Delta l \quad (2.51)$$

де P – миттєве значення прикладеної сили;

$H(t)$ – хевісайд (функція Хевісайда);

Δl – деформація моделі, $\Delta l=1$ – повне руйнування структури.

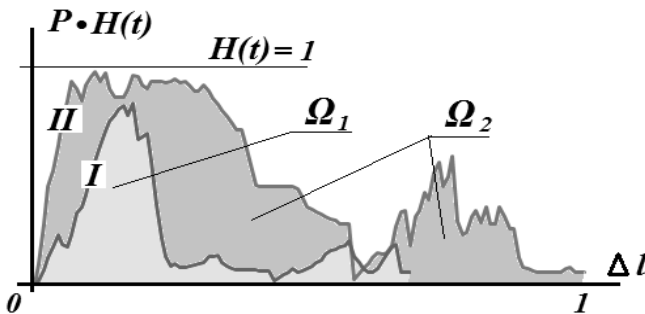


Рис.2.23. Діаграми механічних випробувань моделей щебенево-гравійних шарів конструкції автомобільних доріг: I – імітація процесу утворення каверн на поверхні автомобільної дороги, II – імітація процесу трибологічного зношування поверхні автомобільної дороги

За умови, що повна робота $\Omega_{\Sigma} = 1$ утворення мінеральних викидів продукуваних автотранспортним засобом складається з роботи Ω_1 утворення каверн і роботи Ω_2 трибологічного зношування поверхні автомобільної дороги, маємо:

$$\Omega_{\Sigma} = 1 = \Omega_1 + \Omega_2 \quad (2.52)$$

За результатами експерименту моделювання динаміки руйнування щебенево-гравійних шарів конструкції автомобільної дороги робота Ω_1 витрачена на утворення каверн може бути визначена як площа A_1 діаграми I:

$$\Omega_1 = \int_{A_1} PH(t) \cdot dl_1 \quad (2.53)$$

і, відповідно робота Ω_2 витрачена на трибологічне зношування поверхні автомобільної дороги, визначена за площею A_2 діаграми II , становитиме:

$$\Omega_2 = \int_{A_2} PH(t) \cdot dl_2 \quad (2.52)$$

Числове інтегрування діаграм, наведених на рис.2.23, з урахуванням виразу (2.52) дозволяє встановити:

$$\Omega_{\Sigma} = 1,0 \begin{cases} \Omega_1 = 0,222 \\ \Omega_2 = 0,778 \end{cases} = 0,222 + 0,778 \quad (2.53)$$

Співвідношення k часток повної роботи Ω_{Σ} зовнішніх сил, які витрачаються на продукування мінеральних викидів, поміж роботою Ω_1 утворення каверн і роботою Ω_2 трибологічного зношування поверхні автомобільної дороги, становитиме:

$$k = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{0,778}{0,222} = 3,505 \quad (2.54)$$

Зважаючи на те, що кількість роботи зовнішніх сил, яка витрачається на утворення одиниці маси мінеральних викидів є величиною сталою для конкретної конструкції автомобільної дороги, коефіцієнт k може бути представленим у вигляді:

$$k = \frac{m_2}{m_1} = 3,505 \quad (2.55)$$

де m_1 – маса мінеральних викидів, які зумовлені утворенням каверн на поверхні автомобільної дороги;

m_2 – маса мінеральних викидів, які утворені внаслідок трибологічного зношування поверхні автомобільної дороги.

Отже, для утворення одиниці маси мінеральних викидів за рахунок трибологічного зношування поверхні автомобільної

дороги необхідно витратити роботи в 3,5 рази більше ніж за рахунок утворення каверн на її (дороги) поверхні.

За результатами експериментального визначення обсягів руйнування мінеральних матеріалів конструкції автомобільної дороги та їх (матеріалів) диспергованої частки внаслідок утворення каверн [229], встановлено повні екстремальні обсяги утворення мінерального пилу в залежності від категорії автомобільної дороги та інтенсивності автотранспортних потоків (таблиця 2.4).

Визначені вище обсяги викидів мінерального пилу та їх частка, яка диспергується в атмосферному повітрі у вигляді аерозолі, що продукуються автотранспортними потоками, дозволяють на стадії проектування або реконструкції автомобільних доріг оптимізувати заходи захисту придорожніх ландшафтів в умовах розвиненої автотранспортної мережі залежно від проектованої інтенсивності автотранспортних потоків та міцності і довговічності конструкції автомобільних доріг відповідних категорій.

2.2. Структура та обсяги газових викидів, які здійснюються потоками транспортних засобів

Перетворення хімічної енергії транспортних палив в роботу вантажо- та пасажиропотоків призводить до утворення шкідливих викидів, які як правило, є токсичними газами, що відпрацьовані автомобільними двигунами [237, 245, 252]. Тому, оцінка матеріального балансу “пальне – викиди ” є важливим питанням для визначення рівнів екологічної безпеки автотранспортних комплексів, розробки заходів захисту придорожніх територій та екологічної раціоналізації природно-техногенних геоекосистем з розвиненою автотранспортною мережею [238].

В двигунах внутрішнього згоряння автотранспортних засобів протікають процеси ламінарного і турбулентного гомогенного згоряння палива, які відбуваються з речовинами, що перебувають у вигляді парів рідкої фази з використанням в якості окиснювача кисню, який міститься в атмосферному повітрі [258]. Основним джерелом енергії при згорянні палив є окиснення атомів вуглецю *C* та водню *H*. Окрім зазначених компонентів, пальне може містити в незначних кількостях сірку, сполуки нітрогену, спирти, ефіри, важкі метали тощо [192].

Таблиця 2.4

Маса пилових викидів та їх диспергована частка, які
 продукуються автотранспортними потоками, кг/год.*км

Категорія автодороги	I-а, I-б	II	III	IV	V
Інтенсивність автотранспортного потоку, авт/добу	> 10000	3000 – 10000	1000 – 3000	150 – 1000	< 150
Маса мінерального пилу продукovanого внаслідок утворення каверн, кг/год.*км	19,3	12,4	11,2	8,9	5,8
Маса мінерального пилу продукovanого внаслідок трибологічного зношування поверхні дороги, кг/год.*км	5,05	3,54	3,20	2,54	1,65
Повна екстремальна маса мінерального пилу продукovanого автотранспортним потоком, кг/год.*км	24,35	15,94	14,40	11,44	7,45
Маса дисперсної фази в стабільному атмосферному аерозолі продукovanа внаслідок утворення каверн, кг/год.*км	1,75	1,12	1,01	0,80	0,52
Маса дисперсної фази в стабільному атмосферному аерозолі, продукovanа внаслідок трибологічного зношування поверхні дороги, кг/год.*км	0,50	0,32	0,29	0,23	0,15
Повна екстремальна маса дисперсної фази в стабільному атмосферному аерозолі, кг/год.*км	2,25	1,44	1,30	1,03	0,67

“Умовну молекулу” рідкого палива можна представити в загальному вигляді як $C_xH_yO_z$ (для палив, які містять нітроген – $C_xH_yO_zN_g$, які містять сірку – $C_xH_yO_zN_gS_k$). Робочий матеріальний баланс палива формується через масовий вміст його окремих елементів і визначається як [237]:

$$w_C + w_H + w_O + w_N + w_S = 1 \quad (2.56)$$

де w – масові частки окремих елементів в 1 кг палива.

Якщо знехтувати значеннями w_N та w_S , отримуємо:

$$w_C + w_H + w_O = 1 \quad (2.57)$$

Частки маси w окремих елементів в 1 кг палива $C_xH_yO_z$ визначаються як [3]:

$$\begin{cases} w_C = \frac{12x}{12x + y + 16z} = \frac{12x}{M_T} \\ w_H = \frac{y}{12x + y + 16z} = \frac{y}{M_T} \\ w_O = \frac{16z}{12x + y + 16z} = \frac{16z}{M_T} \end{cases} \quad (2.58)$$

де M_m – молярна маса “умовної молекули” палива.

Для більшості реальних палив (бензин, дизельне паливо) наявністю кисню можна знехтувати і “умовна молекула” пального набуває вигляду C_xH_y , а отже:

$$M_T = 12x + y \quad (2.59)$$

Для визначення співвідношення поміж кількостями вихідних продуктів згоряння (пальне і кисень атмосферного повітря) і відпрацьованими газами двигуна, необхідно зробити такі припущення:

- всі хімічні сполуки складаються з атомів окремих елементів, які пов’язані поміж собою у визначених числових співвідношеннях;

- в хімічних реакціях атоми речовин зберігають свою ідентичність і відбувається лише їх перегрупування.

Повне згоряння (окиснення) молекули пального C_xH_y до кінцевих продуктів (діоксид вуглецю CO_2 та водяної пари H_2O) визначається рівнянням (в кмоль) [126, 135, 258]:

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 = xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O \quad (2.60)$$

x атомів C в 1 кмоль C_xH_y дають x кмоль CO_2 , $N_{CO_2} = x$;

y атомів H в 1 кмоль C_xH_y дають $y/2$ кмоль H_2O , $N_{H_2O} = y/2$.

Склад продуктів згоряння в перерахунку на 1 кг палива ($1/M_T$, кмоль) становитиме:

$$\begin{cases} N_{CO_2} = \frac{x}{M_T} = \frac{x}{12x + y} \\ N_{H_2O} = \frac{y}{2} M_T = \frac{y/2}{12x + y} \end{cases} \quad (2.61)$$

або через елементний склад, з урахуванням отримуємо:

$$\begin{cases} N_{CO_2} = \frac{w_C}{12} \\ N_{H_2O} = \frac{w_H}{2} \end{cases} \quad (2.62)$$

В реакції беруть участь $(x+y)/4$ кмоль O_2 , $N_{O_2} = x + y/2$.

Кількість кисню (кмоль), необхідна для повного згоряння палива є стехіометричною і визначається як [258]:

$$N_{O_2} = x + \frac{y}{4} = \frac{w_C}{12} M_T + \frac{w_H}{4} M_T \quad (2.63)$$

кількість (кмоль) кисню O_2 на 1 кг палива становитиме:

$$\widetilde{L}_O = \frac{N_{O_2}}{M_T} = \frac{x + y/4}{12x + y} = \frac{w_C}{12} + \frac{w_H}{4} \quad (2.64)$$

а, маса (кг) кисню O_2 необхідна для окиснення 1 кг палива буде:

$$\widetilde{L}_O = \widetilde{L}_O M_{O_2} = \frac{32x + 8y}{12x + y} = \frac{8}{3} w_C + 8w_H \quad (2.65)$$

Таким чином, маса кисню, яка споживається з атмосферного повітря для повного згоряння палива (кг/ кг палива) становить:

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot \alpha \cdot l_0 \quad (2.66)$$

де l_0 – стехіометричне число;

α – коефіцієнт надлишку повітря в паливо-повітряній суміші.

Обравши об'ємну частку кисню O_2 в атмосферному повітрі за 21 % і масову частку – за 23,2 %, можна обчислити стехіометричну кількість повітря, необхідну для повного згоряння палива [126]:

- кількість (кмоль) повітря на 1 кг палива:

$$L_0 = \frac{\widetilde{L}_O}{0,21} = \frac{1}{0,21} \cdot \frac{x + y/4}{12x + y} = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\frac{w_C}{12} + \frac{w_H}{4} \right) \quad (2.67)$$

- маса (кг) повітря на 1 кг пального:

$$l_0 = \frac{\widetilde{L}_O}{0,232} = 138 \cdot \frac{x + y/4}{12x + y} = 138 \cdot \left(\frac{w_C}{12} + \frac{w_H}{4} \right) \quad (2.68)$$

При цьому, коефіцієнт α надлишку повітря в (2.66) є відношенням кількості повітря G_s , яке міститься у паливо-повітряній суміші, до його (повітря) мінімальної кількості G_m , необхідної для повного згоряння всього палива, яке містить ця суміш:

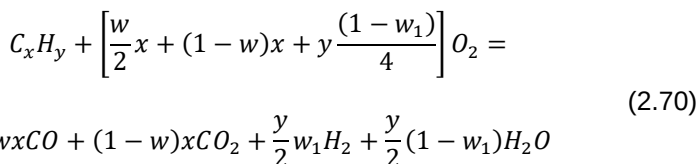
$$\alpha = \frac{G_{\pi}}{G_T \cdot l_0} \quad (2.69)$$

де G_m – годинна витрата палива [кг/год];

$G_m \cdot l_0$ – мінімальна, теоретично необхідна для повного згоряння палива, кількість повітря [кг/год].

Якщо $\alpha=1$, то паливо-повітряна суміш має стехіометричний (теоретичний) склад, якщо $\alpha>1$ – суміш є збідненою, а якщо $\alpha<1$, то суміш збагачена паливом. Для дизельних двигунів номінальний режим роботи характеризується показником $\alpha=1,4-2,2$ [126].

У випадку, коли кількість кисню буде меншою за стехіометричну, окислення буде неповним: частина вуглецю окислиться лише до CO, а частина водню взагалі не згорить. Окислення вуглеводневої молекули C_xH_y в загальному випадку відбувається за рівнянням:



де w – масова частка вуглецю, окисленого до CO;

w_1 – масова частка незгорівшого водню;

x – маса вуглецю в молекулі палива;

y – маса водню в молекулі палива.

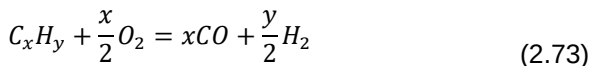
В продуктах згоряння палива в цьому випадку виявляються незгорівший водень (N_{H_2}) та оксид вуглецю (N_{CO}):

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = x \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{y}{2} \end{cases} \quad (2.71)$$

або на 1 кг пального (кмоль):

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = \frac{w_C}{12} \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{w_H}{2} \end{cases} \quad (2.72)$$

Із зменшенням кількості кисню в продуктах згоряння збільшується вміст CO та H_2 , а вміст H_2O та CO_2 – зменшується. За умови $w_1=w=1$ в продуктах згоряння буде міститись лише CO та водень H_2 , який не згорів. Відповідне рівняння окиснення матиме вигляд [232, 237]:



Кількість кисню (кмоль) $N_{O_2} = x/2$ відповідає умові, відповідно до якої кількість атомів водню C дорівнює кількості атомів кисню O , тобто:

$$\frac{C}{O} = 1 \quad (2.74)$$

При подальшому збільшенні у паливо-повітряній суміші вмісту кисню O , тобто:

$$\frac{C}{O} > 1 \quad (2.75)$$

і в продуктах згоряння виявляється незгорівший вуглець у вигляді сажі.

На рис.2.23 наведено принципову схему утворення токсичних та шкідливих викидів автотранспортним засобом, який обладнано чотиритактним двигуном внутрішнього згоряння.

Шкідливі і токсичні гази у викидах двигунів внутрішнього згоряння можна поділити на такі групи:

- вуглецевмісні речовини – продукти повного та неповного згоряння палив (CO_2 , CO , вуглеводні, в тому числі ароматичні і поліциклічні);
- оксиди азоту (N_xO_y), які, як правило, приведені до NO ;
- речовини, утворення яких пов'язане з наявністю домішок у паливі (сполуки сірки, важких металів та їх оксидів).

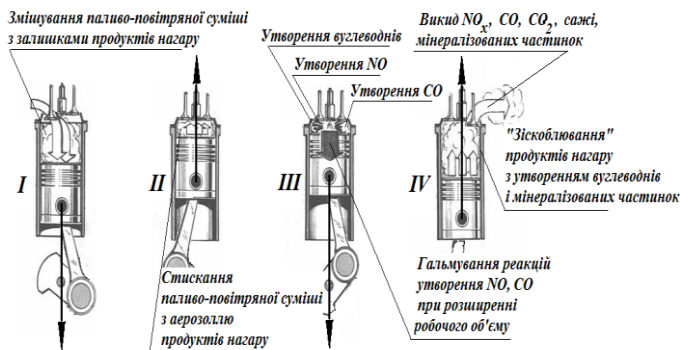
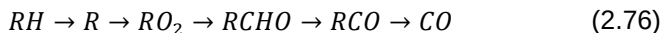
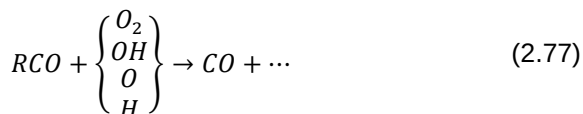


Рис.2.23. Принципова схема утворення токсичних та шкідливих викидів автотранспортним засобом, який обладнано чотиритактним двигуном внутрішнього згоряння:
I, II, III, IV – порядок робочих тактів двигуна

Монооксид вуглецю CO утворюється в результаті згоряння палива з певним дефіцитом повітря, а також при дисоціації CO_2 . Послідовність утворення CO може бути представлена як:



Реакція радикалу RCO, яка призводить до утворення CO відбувається в результаті одночасної взаємодії з чотирма компонентами:



Окрім цього, частинки сажі, які утворені при “зіскоблюванні” частинок нагару, створюють можливість для здійснення реакції типу:

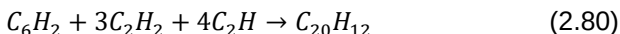


Діоксид вуглецю CO_2 є шкідливою речовиною, хоча і не належить до токсичних речовин. Типовою реакцією утворення CO_2 є реакція:

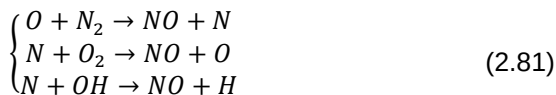


Окрім наведеної вище реакції (2.79), доокиснення CO в CO_2 відбувається у вихлопній трубі двигуна, а також у нейтралізаторних пристроях сучасних двигунів.

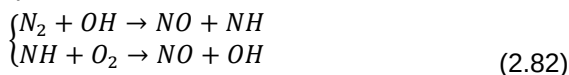
Вуглеводні (до десятка різних найменувань) утворюються в результаті неповного згоряння палива, зокрема при гальмуванні реакції горіння поблизу стінок циліндра двигуна. Максимальний рівень токсичності вуглеводнів має бенз(α)пірен $C_{20}H_{12}$. Реакція утворення $C_{20}H_{12}$ при піролізі вуглеводневих палив має вигляд:



Оксиди азоту N_xO_y , складаються, як правило з таких сполук N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5 . Для практичних розрахунків перелічені вище сполуки приводять до NO . При горінні збіднених паливо-повітряних сумішей ($\alpha > 0,8$) характерними є ланцюгові реакції:



В збагачених паливо-повітряних сумішах ($\alpha < 0,8$) відбуваються такі реакції:



Рух автотранспортних засобів у складі щільних транспортних потоків значно відрізняється від режиму руху одиночного транспортного засобу. Пов'язана з цим зміна режиму роботи сукупності двигунів потоку призводить до зміни не лише витрат палива, але і до зміни структури, складу та обсягів викидів. В загальному вигляді викиди M_s [кг/год.×км] шкідливих речовин автотранспортними потоками можуть бути визначені як [124, 234]:

$$M_s = \sum_i \sum_j \sum_n B_i \cdot J_j \cdot N \quad (2.83)$$

де B_i – питома кількість витраченого палива, кг/км;
 J_j – питомий викид шкідливої (токсичної) речовини, кг/кг;
 N – інтенсивність автотранспортного потоку.

Статистична усереднена питома кількість витрати палива фізичною автотранспортною одиницею становить при частці вантажного автотранспорту і автобусів в транспортному потоці [?]: $S \geq 25\%$ – $B_s = 0,21$ кг/км, при $5\% < S < 25\%$ – $B_s = 0,18$ кг/км, при $S \leq 5\%$ – $B_s = 0,11$ кг/км [234]. При цьому, значення J_j становлять для CO – $201,8 \times 10^{-3}$ [кг/кг], CO_2 – 3183×10^{-3} [кг/кг], N_xO_y – $21,2 \times 10^{-3}$ [кг/кг], вуглеводні, в тому числі ароматичні і поліциклічні ($C_{20}H_{12}$) – $33,1 \times 10^{-3}$ [кг/кг].

Таким чином, з урахуванням інтенсивності N автотранспортного потоку отримуємо значення M_s [кг/год.×км]:

$$M_s = \frac{B_s \cdot J_s \cdot N}{24} \quad (2.84)$$

При цьому:

$$B_s = \varphi(S) \quad (2.85)$$

Результати інвентаризації газових викидів автотранспортними потоками в залежності від їх інтенсивності та категорії автомобільної дороги, які визначені на підставі виразу (2.84), наведено в таблиці 2.5.

Результати аналітичного оцінювання обсягів газових викидів автотранспортними потоками дозволяють встановити, що їх обсяги визначаються в першу чергу інтенсивністю і часткою вантажних автомобілів у транспортному потоці, режимом руху транспортних засобів та обсягами витрат палива. При цьому, обсяги викидів токсичних і шкідливих речовин для автомобільних доріг категорій I-а і I-б по окремих інгредієнтах можуть досягати: CO – 17,59 кг/год.×км, CO_2 – 278,51 кг/год.×км, N_xO_y – 1,86 кг/год.×км, вуглеводням – 2,90 кг/год.×км.

2.3. Обсяги викидів сажі потоками автотранспортних засобів, які обладнано дизельними двигунами

До небезпечних впливів автотранспортного комплексу на довкілля є викиди сажових аерозолів, які продукуються автотранспортними засобами обладнаними дизельними двигунами [19, 49, 50]. Нерозчинні викиди відпрацьованого пального двигунів внутрішнього згоряння складають до 70-75% від загальної маси твердих викидів. Сажа (твердий технічний аморфний вуглець) є основним компонентом нерозчинних твердих викидів у відпрацьованих газах дизельних двигунів (рис.2.24).

Сажа утворюється при об'ємному піролізі (термічному розкладенні вуглеводнів в газоподібній (паровій) фазі дизельних палив в умовах нестатку кисню. Сажові частинки формують у збагаченій дизельним паливом камері згоряння двигуна (особливо при безпосередньому вприскуванні палива в камеру згоряння – рис.2.25), де кількість кисню є недостатнім для здійснення вихідного вуглеводню в CO_2 та H_2O [126, 234].



Рис.2.24. Викиди сажі дизельним двигуном автомобіля

Процес утворення сажі складається з таких стадій:

- утворення зародків з розміром до 5 нм, які містять декілька атомів вуглецю, внаслідок піролізу вуглеводнів;
- збільшення (зростання) зародків до первинних частинок з майже сферичною (або ланцюговою) формою і містять понад 3×10^5 атомів вуглецю;
- утворення сажових агломератів (кластерів), які містять іноді понад 500 первинних частинок (сферул) з діаметром до 100 нм;

Таблиця 2.5

Обсяги газоподібних викидів автотранспортними потоками,
кг/год.×км

Категорія автомобільної дороги	Інтенсивність автотранспортного потоку, авт./добу	Забруднюючий інгредієнт	Частка вантажних автомобілів і автобусів у автотранспортному потоці		
			$S < 5\%$	$5\% < S < 25\%$	$S \geq 25\%$
I-а, I-б	> 10000	CO	9,25	15,13	17,59
		CO ₂	145,89	238,72	278,51
		N _x O _y	0,97	1,59	1,86
		Вуглеводні	1,52	2,48	2,90
II	3000 – 10000	CO	6,45	10,55	12,31
		CO ₂	102,12	167,11	194,96
		N _x O _y	0,68	1,11	1,30
		Вуглеводні	1,06	1,74	2,03
III	1000 – 3000	CO	1,84	3,01	3,65
		CO ₂	29,18	47,75	55,71
		N _x O _y	0,20	0,32	0,37
		Вуглеводні	0,31	0,50	0,59
IV	150 – 1000	CO	0,55	1,02	1,08
		CO ₂	8,75	14,32	16,71
		N _x O _y	0,06	0,09	0,11
		Вуглеводні	0,09	0,15	0,17
V	< 150	CO	0,09	0,15	0,18
		CO ₂	1,46	2,39	2,78
		N _x O _y	0,01	0,02	0,02
		Вуглеводні	0,02	0,02	0,03

- коагуляція кластерів до складних утворень – конгломератів з розміром від 10-20 нм до 300 нм з вмістом

вуглецю 95,6% та водню – 4,2%, що відповідає хімічній формулі C_8H_4 .

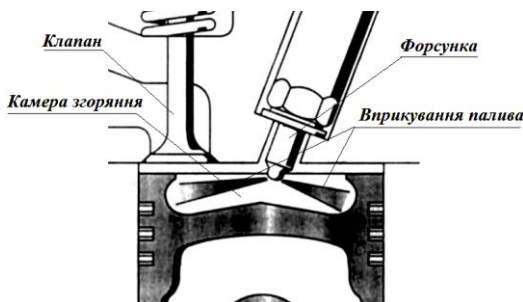


Рис.2.25. Принципова схема безпосереднього вприскування пального в камеру згоряння дизельного двигуна

В камерах згоряння дизельних двигунів, у порівнянні з двигунами іскрового запалювання, локальні перенасичені паливом зони утворюються значно частіше, а отже повною мірою реалізуються перераховані вище стадії сажоутворення. Утворення сажових викидів дизельних двигунів залежить від властивостей палива – чим більшим є співвідношення C/H в паливі, тим вміст сажі у відпрацьованих викидах більший. Маса кисню, який споживається з атмосфери, для повного згоряння дизельного палива $[кг/кг_{паливи}]$ визначається формулою (2.66), а коефіцієнт надлишку повітря є відношенням кількості повітря, яке міститься у паливо-повітряній суміші G_p до його мінімальної кількості, яка теоретично потрібна для повного згоряння всього дизельного палива G_m суміші. Тобто, відповідно (2.69):

$$\alpha_{диз} = \frac{G_p}{G_T \cdot l_0} \quad (2.86)$$

де G_m – годинна витрата дизельного палива $[кг/год]$;

$G_m \cdot l_0$ – мінімальна, теоретично необхідна для повного згоряння дизельного палива, кількість повітря $[кг/год]$.

Якщо $\alpha_{диз}=1$, то паливо-повітряна суміш має стехіометричний (теоретичний) склад, якщо $\alpha_{диз}>1$ – суміш є збідненою, а якщо $\alpha_{диз}<1$, то суміш збагачена паливом. Для

дизельних двигунів номінальний режим роботи характеризується показником $\alpha_{\text{диз}}=1,4-2,2$ [126].

У випадку, коли кількість кисню буде меншою за стехіометричну, окислення буде неповним: частина вуглецю окислиться лише до CO, а частина водню взагалі не згорить. Окислення вуглеводневої молекули C_xH_y в загальному випадку відбувається за рівнянням:

$$C_xH_y + \left[\frac{w}{2}x + (1-w)x + y \frac{(1-w_1)}{4} \right] O_2 =$$

$$= wxCO + (1-w)xCO_2 + \frac{y}{2}w_1H_2 + \frac{y}{2}(1-w_1)H_2O \quad (2.87)$$

де w – масова частка вуглецю, окисленого до CO;

w_1 – масова частка незгорівшого водню;

x – маса вуглецю в молекулі палива;

y – маса водню в молекулі палива.

Для дизельного палива (якщо знехтувати наявністю кисню) “умовна” молекула палива C_xH_y буде мати молярну масу M_n [231]:

$$M_T = 12x + y \quad (2.88)$$

Відповідно (2.88), в продуктах згоряння дизельного палива з’являється незгорівший водень (N_{H_2}) та оксид вуглецю (N_{CO}). Тоді:

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = x \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{y}{2} \end{cases} \quad (2.89)$$

і, відповідно на 1 кг палива (кмоль):

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = \frac{w_c}{12} \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{w_H}{2} \end{cases} \quad (2.90)$$

Із зменшенням кількості кисню в продуктах згоряння палива буде збільшуватись вміст CO та H_2 і зменшуватись вміст H_2O та CO_2 . При $w_1=w=1$ в продуктах згоряння буде міститись лише чадний газ CO та незгорівший водень H_2 . Відповідне рівняння окислення матиме вигляд:

$$C_xH_y + \frac{x}{2}O_2 = xCO + \frac{y}{2}H_2 \quad (2.91)$$

Кількість кисню (кмоль) $N_{O_2} = x/2$ відповідає умові, за якої кількість атомів вуглецю дорівнює кількості атомів кисню, тобто $C/O = 1$. При подальшому зменшенні вмісту кисню в паливо-повітряній суміші $C/O > 1$ в продуктах згоряння палива з'являється незгорівший вуглець (сажа).

Обсяги викидів сажі автотранспортного засобу, обладнаного дизельним двигуном [кг/км], визначаються як:

$$M_s = B_s \cdot J_s \quad (2.92)$$

де M_s – валовий викид сажі фізичним автотранспортним засобом, кг/км;

B_s – питома кількість витраченого палива, кг/км;

$J_s = 0,0155$ – питомий викид сажі, кг/кг.

Статистична усереднена питома кількість витрати дизельного палива фізичною автотранспортною одиницею, яка обладнана дизельним двигуном становитиме $B_s = 0,55$ кг/км. Таким чином, з урахуванням інтенсивності N автотранспортного потоку отримуємо значення M_s [кг/год×км]:

$$M_s = \frac{B_s \cdot J_s \cdot N \cdot S}{24} = 3,55 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot S \quad (2.93)$$

Результати інвентаризації викидів сажі автотранспортними потоками в залежності від їх швидкості та інтенсивності, категорії автомобільної дороги і частки транспортних засобів у потоці, які обладнано дизельними двигунами, визначені на підставі виразу (2.93), наведено в таблиці 2.6 [232, 234, 255]

Таблиця 2.6

Обсяги викидів сажі автотранспортними потоками, кг/год.×км

Категорія автомобільної дороги	Інтенсивність автотранспортного потоку, авт./добу	Частка автомобілів у автотранспортному потоці, які обладнано дизельними двигунами		
		$S < 5\%$	$5\% < S < 25\%$	$S \geq 25\%$
I-a, I-б	> 10000	0,266	1,065	1,864
II	3000 – 10000	0,173	0,693	1,212
III	1000 – 3000	0,053	0,213	0,373
IV	150 – 1000	0,017	0,070	0,122
V	< 150	0,023	0,011	0,087

За результатами оцінювання обсягів викидів диспергованої сажі автотранспортними потоками встановлено, що при наявності в автотранспортних потоках частки транспортних засобів обладнаних дизельними двигунами понад 25%, сажові викиди можуть досягати для автомобільних доріг категорій I-a та I-б – 1,864 кг/год.×км, категорії II – 1,212 кг/год.×км, категорії III – 0,373 кг/год.×км.

2.4. Узагальнення матеріального балансу викидів, які продукуються автотранспортними потоками

Для забезпечення ефективного контролю рівнів екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з розвинутою автотранспортною мережею необхідно визначитись з критерієм комплексної оцінки всього матеріального балансу викидів, які продукуються автотранспортними потоками, залежно від інтенсивності цих потоків, категорії та якості і довговічності конструкції автомобільної дороги, погодно-кліматичних та ландшафтних особливостей природно-техногенної геоекосистеми, автотранспортної ємності території тощо. Загальноприйнятим показником для оцінювання рівнів забруднення атмосферного повітря об'єктами господарської

діяльності є показник КНП (категорія небезпечності підприємства), який в загальному випадку розраховують відповідно виразу [175]:

$$\text{КНП} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{\text{ГДК}_{\text{сд}}} \right)^{\alpha} \quad (2.94)$$

де M_i – маса i -тої речовини у викиді, [т/рік×км];

$\text{ГДК}_{\text{сд}}$ – середньодобова гранично допустима концентрація i -тої речовини у викиді, [мг/м³];

n – кількість шкідливих речовин, які викидаються об'єктом господарської діяльності (враховуються при розрахунку КНП);

α – безрозмірна константа, яка дозволяє привести ступінь шкідливості i -тої речовини до шкідливості дії діоксиду сульфуру.

При цьому:

$$M_i = f \cdot m_i \quad (2.95)$$

де $f=8769$ – річний фонд часу, год.;

m_i – годинне продукування маси i -тої речовини у викиді, кг/год.

За результатами визначення структури, складу та обсягів викидів, які продукуються автотранспортними потоками, по показниках CO , N_xO_y , кількості ароматичних і поліциклічних вуглеводнів ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) та мінерального пилу розраховано показник КНП для автомобільних доріг відповідних категорій (таблиця 2.7 і таблиця 2.8).

Важливою характеристикою інтенсивності забруднення природно-техногенної геоекосистеми з розвиненою автотранспортною мережею є річні обсяги викидів транспортними потоками діоксиду вуглецю (CO_2), які наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.7

Гранична розрахункова річна маса викидів,
які продукуються автотранспортними потоками, т/рік×км

Категорія авто- більної дороги	Інтенсивність автотранс- портного потoku, авт./добу	Маса річного викиду і-тої речовини, [т/рік×км]					
		CO	N _x O _y	C ₂₀ H ₁₂ ароматичні та поліциклічні вуглеводні	Сажа	Мінераль- ний пил	Аеро- золі
I-а, I-б	>1000	154, 1	16,3	25,4	16,3	213, 3	19, 7
II	3000- 10000	107, 8	11,4	17,8	10,6	139, 6	12, 6
III	1000-3000	32,0	3,3	5,2	3,3	126, 1	11, 4
IV	150-1000	9,4	0,9	1,5	1,1	99,8	9,0
V	<150	1,6	0,2	0,3	0,8	65,5	5,9

Таблиця 2.9

Граничні обсяги викидів діоксиду вуглецю, автотранспортними
потоками, т/рік×км

Категорія авто- мобільної дороги	Інтенсивність автотранспортного потoku, авт./добу	Обсяги викидів діоксиду вуглецю, т/рік×км
I-а, I-б	> 10000	2440
II	3000 – 10000	1708
III	1000 – 3000	488
IV	150 – 1000	146
V	< 150	24

Не зважаючи на те, що діоксид вуглецю CO₂ не є токсичною речовиною, однак при проектуванні (реконструкції) мережі автомобільних доріг мають бути передбачені заходи щодо нормування (регламентації) його викидів. При цьому, ці заходи мають враховувати перспективні плани інтенсифікації автотранспортних перевезень

2.5. Висновки за розділом II

За результатами оцінювання структури, складу та обсягів викидів, продукуваних автотранспортними потоками різної інтенсивності, встановлено:

1. Особливо небезпечними за обсягами забруднення природно-техногенних геоекосистем з розвинутою автотранспортною мережею є автомобільні дороги категорій I-а, I-б, II і III (інтенсивність транспортного потоку понад 1000 автомобілів за добу), які за показником категорії їх небезпечності ($KHP > 10^3$) мають бути віднесені до 3-ої категорії небезпечності об'єктів господарської діяльності з розміром санітарно-захисної зони не менше за 300 м.

2. Для забезпечення надійного захисту придорожніх ландшафтів від пилових та аерозольних забруднень має бути забезпечено максимально можливе депонування мінеральних викидів, які продукуються автотранспортними потоками, в таких межах:

- для автотранспортних потоків з інтенсивністю > 10000 авт/добу: пилових викидів – 213,3 т/рік×км; мінерального аерозолю – 19,7 т/рік×км; сажі (аморфного вуглецю) – 16,3 т/рік×км;
- для автотранспортних потоків з інтенсивністю 3000 – 10000 авт/добу: пилових викидів – 139,6 т/рік×км; мінерального аерозолю – 12,6 т/рік×км; сажі (аморфного вуглецю) – 10,6 т/рік×км;
- для автотранспортних потоків з інтенсивністю 1000 – 3000 авт/добу: пилових викидів – 126,1 т/рік×км; мінерального аерозолю – 11,4 т/рік×км; сажі (аморфного вуглецю) – 3,3 т/рік×км.

3. Відновлення складу атмосферного повітря (структури стандартної атмосфери) в межах територій впливу автодорожньої мережі має передбачати заходи захисту від газоподібних продуктів згоряння двигунів внутрішнього згоряння автомобілів транспортних потоків в таких обсягах:

- для автотранспортних потоків з інтенсивністю > 10000 авт/добу: чадний газ (CO) – 154,1 т/рік×км; оксиди нітрогену (N_xO_y) – 16,3 т/рік×км; ароматичні та поліциклічні вуглеводні ($C_{20}H_{12}$) – 25,4 т/рік×км;

- для автотранспортних потоків з інтенсивністю 3000 – 10000 авт/добу: чадний газ (CO) – 107,8 т/рік×км; оксиди нітрогену (N_xO_y) – 11,4 т/рік×км; ароматичні та поліциклічні вуглеводні ($C_{20}H_{12}$) – 17,8 т/рік×км;
- для автотранспортних потоків з інтенсивністю 1000 – 3000 авт/добу: чадний газ (CO) – 32,0 т/рік×км; оксиди нітрогену (N_xO_y) – 3,3 т/рік×км; ароматичні та поліциклічні вуглеводні ($C_{20}H_{12}$) – 1,5 т/рік×км.

4. Інженерна інфраструктура автотранспортної мережі має забезпечувати відновні властивості граничного шару атмосфери щодо вмісту в ній кисню та зменшення обсягів діоксиду вуглецю (CO_2), який має не перевищувати 400-500 ppm ~ 0,03-0,04 %, що відповідає значенням природного вмісту CO_2 в атмосферному повітрі.

III. ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ І ДЕПОНУВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ В МЕЖАХ СМУГИ ВІДВЕДЕННЯ АВТОМОДОРОГИ

3.1. Дифузія аерозольних викидів автотранспортних потоків

Бідь-яка мінеральна або газоподібна домішка, яка продукується автотранспортними потоками у вигляді аерозолів, після надходження в атмосферне повітря починає мігрувати внаслідок природних повітряних рухів (течій). При цьому, домішка бере участь як в ламінарних, так і в турбулентних переміщеннях тих або інших потоків атмосферного повітря [248].

Відповідно до характерних особливостей роботи двигунів внутрішнього згоряння (п. 2.2) вважаємо, що вся домішка в початковий момент часу одномоментно рівномірно заповнює весь об'єм разового факелу викиду у вигляді деякої хмари викиду, яка під дією природних повітряних рухів починає дифузно розсіюватись в атмосферному повітрі [134].

Аналітично цей процес “раптового” одномоментного викиду, який був відсутній до визначеного моменту часу (дорівнював нулю) і відлік часу розпочинається з моменту виникнення “хмари викиду”, описується, так звану, одиничною функцією $H(t)$ (функцією Хевісайда) у вигляді одиничного переривача. Графік функції Хевісайда, наведений на рис.3.1, визначає, що подія одномоментного викиду хмари аерозолу дорівнює нулю при $t < 0$ і дорівнює одиниці при $t > 0$, що може бути записаним у вигляді [248]:

4

$$H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

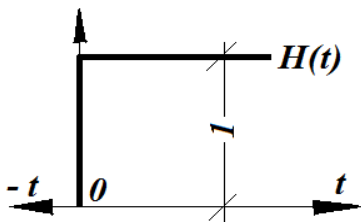


Рис.3.1. Графік одиничної функції $H(t)$

Зрозуміло, що якщо помножити функцію $F(t)$ зовнішнього впливу на $H(t)$, то всі ординати $F(t)$ при $t < 0$, будуть відсутніми, а при $t > 0$ ординати функції $F(t)$, помножені на одиницю, збережуть своє початкове значення.

Аналітичне значення раптово прикладеного зовнішнього впливу і одразу ж припиненого (миттєвий вплив) реалізується за допомогою так званої дельта-функції Дірака (рис.3.2), яка зазвичай позначається через $\delta(t)$.

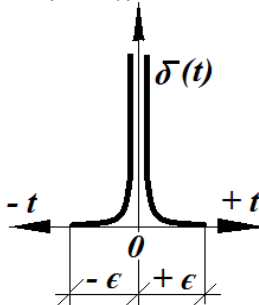


Рис.3.2. Дельта-функція Дірака $\delta(t)$

Дельта-функція Дірака має такі особливості:

- при всіх $t < 0$ і $t > 0$ $\delta(t) = 0$;
- при $t = 0$ $\delta(t) = \infty$;
- $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta = 1$.

Так як $\delta(t) = 0$ при всіх $t \neq 0$, то з цієї властивості функції походить, що інтеграл з добутку $\delta(t)$ на деяку функцію $F(t)$ впливу на структуру можна записати у вигляді:

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) F(t) dt = \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \delta(t) F(t) dt \quad (3.2)$$

З огляду на те, що межі інтегрування є достатньо малими, то на інтервалі від $-\varepsilon$ до $+\varepsilon$ можна вважати, що $F(t) = F(0)$. Таким чином:

$$I = \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \delta(t) F(t) dt = \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \delta(t) F(0) dt \quad (3.3)$$

Величина $F(0)$ є деякою постійною величиною, а отже її можна винести за знак інтегралу:

$$I = F(0) \cdot \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} \delta(t) dt = F(0) \cdot 1 = F(0) \quad (3.4)$$

Отже

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) F(t) dt = F(0) \quad (3.5)$$

Якщо дельта-функція дорівнює нескінченності не при $t=0$, а в точці $t=a$, то аналогічно вищевикладеному отримуємо:

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-a) F(t) dt = F(a) \quad (3.6)$$

Одинична функція Хевісайда $H(t)$ пов'язана із дельта-функцією $\delta(t)$ співвідношенням:

$$H(t) = \int_{-\infty}^t \delta(t) dt \quad (3.7)$$

Так як при $t < 0$ отримуємо $H(t)=0$, а при $t > 0$ – $H(t)=1$, то $H(t)$ є розривною функцією, яка зазнає стрибку від 0 до 1 при $t=0$. Інтегруючи $H(t)dt$ отримуємо:

$$\int_0^t H(t) dt = t H(t) \quad (3.8)$$

Якщо продиференціювати $H(t)$ відповідно до (3.7) отримаємо:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \delta(t) \quad (3.9)$$

Таким чином, диференціюючи розривну функцію $H(t)$, отримуємо дельта-функцію $\delta(t)$.

Для позначення знаку функції користуються функцією $\text{sign}(t)$, яка дорівнює -1 при $t < 0$ і $+1$ при $t > 0$. Очевидно, що зазначену функцію можна представити як:

$$\text{sign}(t) = \frac{t}{|t|} \quad (3.10)$$

Поміж $H(t)$ і $\text{sign}(t)$ існує така залежність:

$$\text{sign}(t) = 2 \cdot H(t) - 1 \quad (3.11)$$

і інтеграл від $H(t)$ дорівнює:

$$\int_{-\infty}^t H(t) dt = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

і є абсолютно ідентичним до (3.1) в разі раптового одномоментного викиду факелу аерозолі (рис.3.2).

Загалом, концентрація q викидів в аерозольній хмарі, яка дифундує в атмосферному повітрі і мігрує спільно з природними рухами (вітровими потоками) атмосфери є функцією часу t і просторових координат (x, y, z) , початок яких лежить в миттєвому центрі мас хмари, яка утворилась в момент викиду $H(t)$:

$$q = q(x, y, z, t) \quad (3.13)$$

Мірою дифузії в даному випадку (рис.3.3) є маса речовини ΔM , яка зазнала дифузного розсіювання за одиницю часу через одиницю площі поверхні хмари газо-пилового викиду в атмосферне повітря. При цьому, величина ΔM буде тим більшою, чим більшою буде від'ємний приріст концентрації Δq на одиниці довжини вздовж всієї сукупності напрямків в яких і відбувається дифузія. Знак $(-)$ у $H = -q(t)$ свідчить про зменшення концентрації Δq в хмарі газо-пилового викиду.

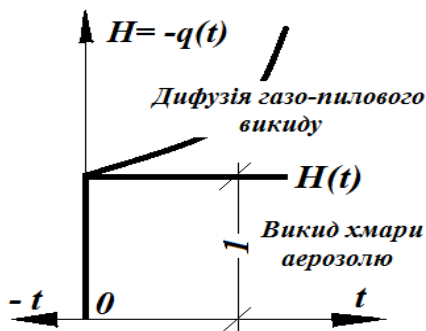


Рис.3.3. Характер дифузії хмари газо-пилового викиду в атмосфері

Таким чином, для процесу дифузії характерною є пропорційність усередненого зміщення дифундуючих частинок аерозолі квадратному кореню з часу t . Тобто:

$$\{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2\} \propto t \quad (3.14)$$

де x, y, z – координати дифундуючої частинки аерозолі в початковий момент часу t (див. 3.13);

x_i, y_i, z_i – координати дифундуючої частинки аерозолі в момент часу t_i від початку дифузії газо-пилової хмари викиду.

Співвідношення (3.14) дозволяє встановити характеристику кількості дифузії ΔM у вигляді коефіцієнта D дифузії:

$$D = \frac{1}{6 \cdot t} \cdot \{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2\} \quad (3.15)$$

На підставі постулату про термодинамічну рівновагу і як наслідок рівняння неперервності, для опису процесу дифузії газо-пилової хмари викиду, який полягає у вирівнюванні концентрації аерозолі в термодинамічній системі маємо:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \text{div } j = 0 \quad (3.16)$$

де j – потік частинок аерозолію від поверхні газо-пилової хмари.

Якщо врахувати що потік частинок аерозолію, який є пропорційним до градієнту його концентрації q з коефіцієнтом пропорційності D (3.15), отримуємо:

$$j = -D\nabla q \quad (3.17)$$

або, у феноменологічній формі рівняння дифузії газо-пилової хмари викиду матиме вигляд:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D\Delta q \quad (3.18)$$

де $\Delta = \operatorname{div} \nabla$ – оператор Лапласа (див. 3.3).

Або, в загальному випадку дифузії просторово неоднорідного аерозолію газо-пилового викиду, який продукується автотранспортним потоком:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \operatorname{div} (Dq\nabla\mu) \quad (3.19)$$

де μ – потенціал вирівнювання концентрації q аерозолію газо-пилової хмари викиду в термодинамічній системі.

Визначальним чинником в рівняннях (3.16) – (3.18) є оператор Лапласа:

$$\Delta = \nabla^2 = \operatorname{div} \nabla \quad (3.20)$$

який у даному випадку визначає характер динамічної рівноваги тиску у газо-пиловій хмарі викиду (на границі розділення фаз) в процесі дифузії хмари в атмосферному повітрі в кожний конкретний момент часу t .

Диференційний оператор div , який відображує векторне поле на скалярне є дивергенцією. В (3.16) – (3.18) дивергенція – це лінійний диференційний оператор на векторному полі, який характеризує потік аерозольних частинок початкової одномоментної газо-пилової хмари викиду через поверхню (достатньо малу) цієї хмари кожної точки її внутрішньої області:

$$\operatorname{div} F = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Phi_F}{V} \quad (3.21)$$

де Φ_F – потік векторного поля F через довільну поверхню S газопилової хмари викиду, яка окреслює деякий об'єм V аерозолію. Тобто:

$$\Phi_F = \oiint_S (\vec{F}, \vec{dS}) \quad (3.22)$$

а отже, (3.22) не має прив'язки до конкретної системи координат (в даному випадку до просторово-територіальних або ландшафтних параметрів природно-техногенної геоекосистеми, конструкційних розмірів автомобільної дороги або технологічно визначених геометричних чинників автотранспортного потоку). З фізичної точки зору процесів масопереносу аерозолію газопилової хмари викиду розглядаються такі можливі варіанти:

- $\operatorname{div} F > 0$ – будь-яка точка газопилової хмари викиду є джерелом аерозолію;
- $\operatorname{div} F < 0$ – будь-яка точка газопилової хмари викиду є стоком аерозолію;
- $\operatorname{div} F = 0$ – стоки і джерела відсутні, або компенсують один одного.

Третій з наведених варіантів ($\operatorname{div} F$) визначає формування роторів в зонах турбулентного руху аерозолію у вигляді:

$$\operatorname{div}\{\operatorname{rot}(F)\} = 0 \quad (3.23)$$

Характер формування роторів в зонах турбулентності аерозолів газопилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками, на зрізі швидкостей повітряних потоків та у відповідних об'єктах рельєфу ландшафтів смуг відведення автомобільних доріг наведено відповідно на рис.3.4 і рис.3.5.

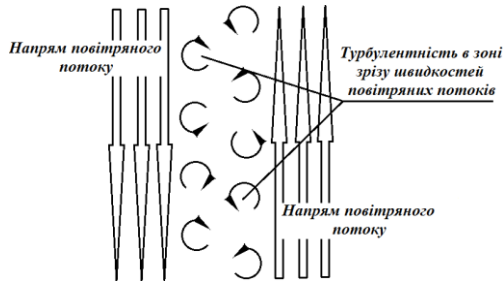


Рис.3.4. Характер формування роторів турбулентності на зрізі швидкостей та напрямів руху повітряних потоків, які формуються переміщенням автотранспортних засобів

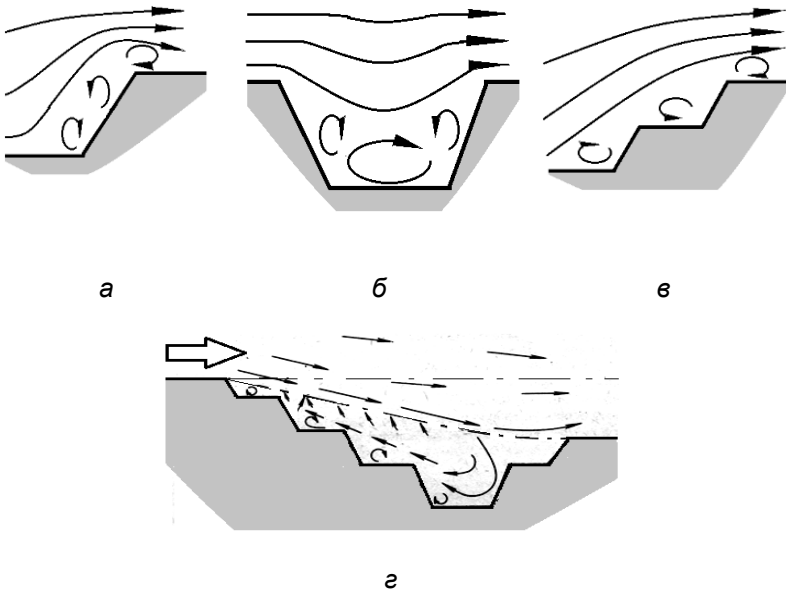


Рис.3.5. Формування роторів турбулентності в елементах рельєфу ландшафтів (напряж руху повітряних мас позначений стрілками):

а – схил; б – западина; в – сходишковий схил;
г – складний характер дивергентного масопереносу в ландшафті

3.2. Динаміка аерозолів газо-пилової хмари викиду в турбулентних роторах

В загальному випадку турбулентний ротор газо-пилової хмари викиду (3.23), яка продукується автотранспортним потоком і дифундує у турбулентних потоках, в тривимірному просторі (з координатами – x, y, z) визначається як:

$$\begin{cases} (rot F)_x = \partial_y F_z - \partial_z F_y \equiv \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ (rot F)_y = \partial_z F_x - \partial_x F_z \equiv \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ (rot F)_z = \partial_x F_y - \partial_y F_x \equiv \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{cases} \quad (3.24)$$

або у вигляді:

$$(rot F)_{m,n} = \partial_m F_n - \partial_n F_m \quad (3.25)$$

де m, n – відповідні координати, розглядуваного простору.

За теоремою Коші-Гельмгольца розподілення швидкостей аерозольної суміші у газо-пиловій хмарі викиду поблизу деякого центру мас задається як:

$$v(r) = v_0 + \omega \cdot r + \nabla \cdot \varphi + O(r) \quad (3.26)$$

де v_0 – вектор поступального руху (переміщення турбулентного ротору в напрямку дії ламінарного потоку);

ω – вектор кутового обертання аерозольного середовища навколо центра його мас O ;

r – усереднений радіус газо-пилової хмари викиду;

φ – потенціал деформації газо-пилової хмари викиду.

Таким чином, рухи аерозольної газо-пилової хмари викидів відносно центра O її мас визначається сукупністю поступального руху (вектор v_0) в ламінарних потоках атмосферного повітря, обертального руху ($\omega \cdot r$) хмари навколо O та потенційного формозмінення-деформації у вигляді вектору ($\nabla \cdot \varphi$). Застосувавши до (3.26) операцію rot отримуємо, що для центра мас хмари (для точки O) справедливо:

$$v = 2 \cdot \omega \quad (3.27)$$

і, як наслідок, можна зробити висновок про те, що поле швидкостей турбулентного ротору газо-пилової хмари викиду, який продукується автотранспортним потоком, відносно деякого центра мас газо-пилової хмари (точки О) дорівнює подвоєному вектору кутового руху аерозолі хмари з центром в центрі її мас. Графічно, характер поступального переміщення турбулентного ротору аерозолі газо-пилової хмари викиду, який продукується автотранспортним потоком, в ламінарному потоці атмосферного повітря наведено на рис.3.6.



Рис.3.6. Характер поступального переміщення турбулентного ротора газо-пилової хмари викиду в ламінарному потоці атмосферного повітря (A', A'', A''' – послідовне положення точки A в роторі)

Отже, за результатами вищевикладеного встановлено:

- в дифузійному дивергентному полі турбулентних рухів аерозольної хмари газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками, формуються ротори (області обертowego руху аерозолі), які беруть участь у поступальному русі ламінарних потоків атмосферного повітря, що формуються в смугах відведення автомобільних доріг (автодорожньої мережі) природно-техногенної геоекосистеми;
- в роторі повітряні потоки обертаються навколо центра мас аерозольної газо-пилової хмари викиду і обов'язково мають ненульовий ротор поблизу центра мас хмари;

- в залежності від характеру потоку векторного поля частинок аерозолію через контрольну (умовну) поверхню газо-пилової хмари викиду (характеру дивергенції) аерозольний ротор може бути джерелом або стоком цього поля (акумулювати в роторі або генерувати за межі ротора аерозольну хмару);
- за конкретних динамічних умов стоки і джерела в аерозольному роторі можуть бути відсутніми або вони компенсують один одного (ні акумуляції ні генерації газо-пилової хмари викиду у роторі не відбувається);
- для векторного поля v швидкостей руху аерозольного ротора, $\text{rot } v$ є однаковим за всім полем (об'ємом) ротора і дорівнює вектору подвоєної кутової швидкості обертання ротора;
- якщо рух автотранспортних потоків (з неусталеними швидкостями потоків) і ландшафтні елементи смуги відведення автомобільної дороги описувати деякими визначеними векторними полями, то ротори на зрізах швидкостей ламінарних потоків атмосферного повітря, які визначаються цими елементами, завжди будуть ненульовими.

3.3. Динаміка ламінарно-турбулентних повітряних потоків в межах смуг відведення автомобільних доріг

Ламінарні потоки рухів атмосферного повітря в межах смуг відведення автомобільних доріг можуть бути описані на підставі рівняння Нав'є-Стокса [106]:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p + \eta \Delta v + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla v \quad (3.28)$$

де v – поле швидкості атмосферного повітря;

ρ – густина повітряного аерозолію;

p – тиск приземних шарів атмосфери;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

ζ – об'ємна в'язкість;

∇ – оператор Набла (векторний диференціальний оператор, компоненти якого є частковими похідними по декартових координатах);

Δ – оператор Лапласа (дія над скалярним або векторним полем, як сума других часткових похідних по кожній декартовій координаті).

При цьому:

- оператор Набла:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (3.29)$$

- оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.30)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори по осях x, y, z відповідно.

В рівнянні (3.28) значення v, ρ, p, η, ζ – є стохастичними змінюваними у часі чинниками, які при практичному використанні (3.28) мають бути усередненими за часом [218]. Дійсно, якщо розглядати міграційні процеси забруднювачів газо-пилової хмари викиду, які зумовлені швидкостями v ламінарних потоків атмосферного повітря, то такі процеси є ергодичними відносно усереднених значень параметрів, якщо:

$$m_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(A, t) \cdot dt \quad (3.31)$$

і ергодичними по відношенню до автокореляційної функції, якщо:

$$R_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(A, t) \cdot X(t + \tau) \cdot dt \quad (3.32)$$

В (3.31) і (3.32) застосовано такі позначення:

m_X – середнє значення відгуку функції $X(A, t)$ визначене за “ансамблем” розглядуваного стохастичного чинника;
 t – час усереднення;
 $R_X(\tau)$ – середнє значення відгуку функції $X(A, t)$ визначене за часом, при чому для стаціонарних випадкових процесів в широкому розумінні:

$$R_X(t_1, t_2) = R_X(t_1 - t_2) = R_X(\tau) \quad (3.33)$$

а отже:

$$E\{X(A, t)\} = m_X = R_X(\tau) = \text{const} \quad (3.34)$$

де $X(A, t)$ – функція досліджуваного процесу.

В даному випадку вираз (3.34) свідчить про ергодичність рівняння (3.28), що дає можливість усереднення, для подальшого векторного аналізу значень v , ρ , p , η , ζ рівняння (3.28).

Розглянемо епюру зміни швидкостей (в окремих горизонтальних шарах) повітряних потоків на відкритій місцевості і при наближенні до, зумовленої ландшафтним елементом, механічної перешкоди (рис.3.7).

В зонах виникнення турбулентності (рис.3.7) відповідно до рівняння (3.28) параметр ∇v визначає появу деякого градієнту dv горизонтальних швидкостей

$$\nabla v = \text{grad } v = \frac{\partial v}{\partial x} \cdot i + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot j + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot k \quad (3.35)$$

де i, j, k – орти координатної системи (системи відліку).

Якщо напрям ламінарного потоку атмосферного повітря спрямувати за напрямом однієї з координатних осей (вісь x), то з (3.35) отримуємо:

$$\text{grad } v = \frac{\partial v}{\partial x} \cdot i \quad (3.36)$$

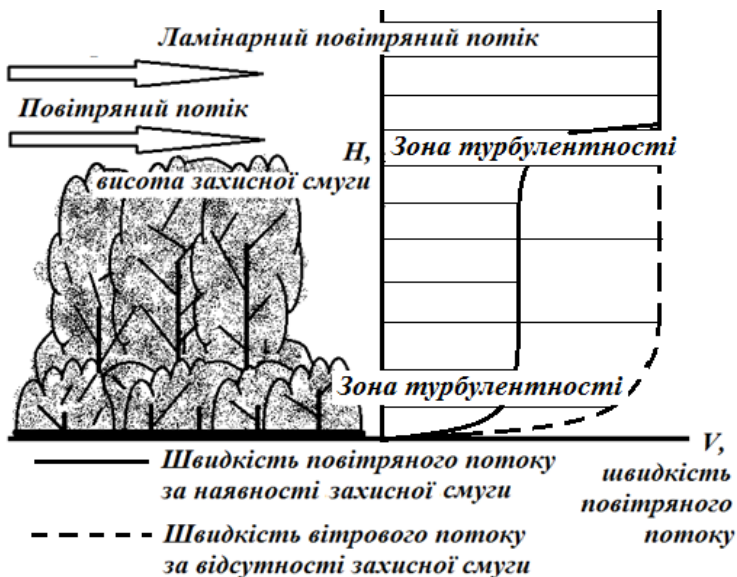


Рис.3.7. Характер зміни швидкостей повітряних потоків за наявності і відсутності механічної перешкоди у вигляді елементів ландшафту

Графічну інтерпретацію градієнту швидкостей повітряного потоку dv наведено на рис.3.8.



Рис.3.8. Градієнт швидкостей повітряних потоків і перенесення їх імпульсу mv

Наявність градієнту dv швидкостей повітряних потоків в зоні виникнення турбулентності відбувається перенесення імпульсу mv з вертикальною швидкістю u :

$$u = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial h} \quad (3.37)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

h – висота повітряного потоку над поверхнею ґрунту.

Таким чином, горизонтальні ламінарні потоки атмосферного повітря в зонах турбулентності (рис.3.7) є “ансамблями” численних турбулентних роторів, які окрім горизонтального вектору dv переміщення ламінарного потоку мають і вертикальну складову du . Процеси перенесення маси аерозолію (перенесення імпульсу du) з одного рівня на інший (обмін масою аерозолію поміж шарами атмосферного повітря) характеризуються добутком флуктуацій горизонтальної складової dv на вертикальну складову du переміщення повітряних аерозолів або, так звану, вихровою коваріацією швидкостей, як деякої невизначеності добутку швидкостей ($du \times dv$):

$$\begin{aligned} Cov(X, Y) &= E[(X - \mu_X) \cdot (Y - \mu_Y)] = E(X, Y) - \mu_X \cdot \mu_Y = \\ &= \mu_{XY} - \mu_X \cdot \mu_Y \end{aligned} \quad (3.38)$$

де E – оператор математичного очікування;

μ_X – усереднене значення величини X (в даному випадку горизонтальна швидкість v повітряного потоку);

μ_Y – усереднене значення величини Y (в даному випадку вертикальна швидкість u повітряного потоку);

$E(X, Y)$ – математичне очікування добутку величин X, Y ;

μ_{XY} – усереднене значення добутку величин X, Y .

Розглянемо переміщення аерозолів у потоках атмосферного повітря з горизонтальною v та вертикальною складовими u повітряних потоків:

$$\begin{cases} v = \bar{v} + \delta v \\ u = \bar{u} + \delta u \end{cases} \quad (3.39)$$

де $\bar{v}$ та $\bar{u}$ – усереднені горизонтальна та вертикальна складові швидкостей повітряного потоку;

δv та δu – флуктуації горизонтальної та вертикальної складових швидкостей повітряного потоку.

Отже, процес переносу маси m аерозолі в ламінарних потоках атмосферного повітря в зонах утворення турбулентних потоків, як коваріація їх горизонтальної та вертикальної швидкостей $Cov(v, u)$ матиме вигляд:

$$Cov(v, u) = \frac{\sum \delta v \cdot \delta u}{n} \quad (3.40)$$

де n – кількість розглядуваних змінних.

Якщо підставити (3.39) в (3.40), отримуємо:

$$Cov(v, u) = \frac{\sum (v - \bar{v})(u - \bar{u})}{n} \quad (3.41)$$

Процес безпосереднього масопереносу аерозолі газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, в цьому випадку буде характеризуватись величиною потоку маси, яка визначає кількість маси m аерозолі, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу. Потік маси залежить від кількості маси m , розмірів площі поверхні газо-пилової хмари викиду і часу перенесення цієї маси в повітряному потоці. Миттєвий горизонтальний потік імпульсу маси m залежить від горизонтальної швидкості ламінарного повітряного потоку, а вертикальний потік імпульсу маси аерозолі газо-пилової хмари викиду через складові швидкостей (v, u) повітряного потоку визначається як:

$$F(t) = \rho \cdot v(t) \cdot u(t) \quad (3.42)$$

де ρ – густина повітряного аерозолі;

Усереднений потік імпульсу маси m аерозолі газо-пилової хмари викиду становитиме:

$$\overline{F(t)} = \bar{\rho} \cdot \overline{(v \cdot u)} \quad (3.43)$$

Таким чином, вертикальний потік імпульсу є коваріацією поміж флуктуаціями горизонтальної v та вертикальної u швидкостей повітряного потоку:

$$F = \rho \cdot \overline{(\delta v \cdot \delta u)} \quad (3.44)$$

Таким чином, якщо вихрові флуктуації спрямовані вертикально донизу ($\delta v < 0$), флуктуації концентрації аерозолію газопилової хмари викиду, зумовлені потоком імпульсу, матимуть тенденцію до зменшення $\delta m < 0$ і добуток $\delta v \cdot \delta m > 0$ є додатнім. Якщо ж вихрові флуктуації спрямовані вертикально догори ($\delta v > 0$), то концентрації флуктуації аерозолів збільшуються з висотою, оскільки вони переміщують догори шари з більшою концентрацією аерозолію а отже добуток $\delta v \cdot \delta m > 0$, який визначається коваріацією поміж v та m залишається додатнім.

Відповідно рівнянню (3.39) при зростанні горизонтальної швидкості v повітряного потоку збільшуються і її флуктуації δv , що зумовлює зменшення товщини розглядуваних шарів аерозольних потоків в межах усталеного імпульсу ($\delta v \cdot \delta u$). Такий характер турбулентності при збільшенні горизонтальної складової швидкості v ламінарного повітряного потоку призводить до формування деякої ієрархії роторів турбулентності, які пов'язані каскадним процесом. Зазначений факт може бути проілюстрований на прикладі формування зони турбулентності в улоговині ландшафту при збільшення горизонтальної швидкості v ламінарного повітряного потоку, який рухається над улоговиною (рис.3.9).

Топологія наведеного на рис.3.9 формування каскаду роторів турбулентності є геометричним аналогом їх (роторів) самоподібності, що свідчить про фрактальний характер ламінарно-турбулентних потоків повітряних аерозолів. Фрактальна розмірність D (розмірність Хаусдорфа-Безиковича) сформованої у ротор аерозолі газопилової хмари викиду (просторової множини на якій відбувається турбулентна дифузія) відповідно до [266] коливається в межах $2,5 < D < 2,6$, при цьому з достатньою ймовірністю можна стверджувати, що завжди $D \leq 2,66$. Тому розв'язки рівняння (3.28) можуть бути винятково фрактальними.

Прикладом такого фракталу, який в двомірному аналогу моделює фрактальний ієрархічний характер каскаду

роторів ламінарно-турбулентних потоків повітряних аерозолів (рис.3.9) є, побудований за допомогою семиланкового генератора, самоподібний регулярний фрактал Коха-Пеана-Мандельброта, наведений на рис.3.10.

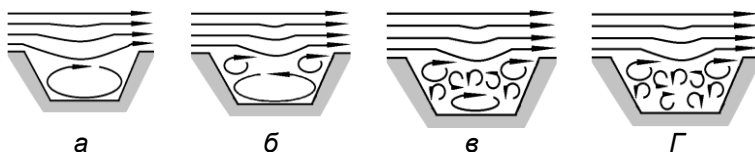


Рис.3.9. Каскадний процес ієрархічного формування роторів турбулентності в улоговині при поступовому зростанні величини швидкості горизонтального ламінарного повітряного потоку: а→б→в→г – збільшення горизонтальної швидкості v потоку

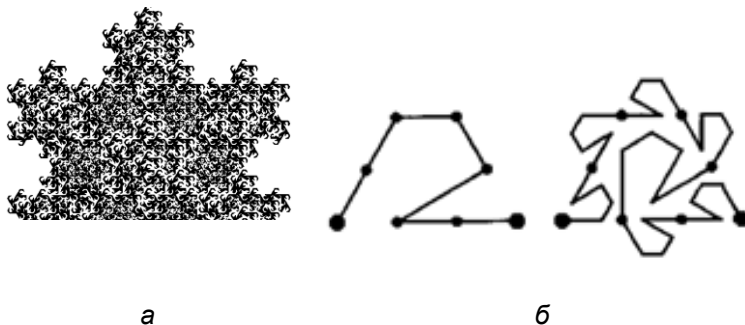


Рис.3.10. Фрагмент фракталу Коха-Пеана-Мандельброта (а) та семиланковий генератор для його побудови (б)

Фрактальний підхід до аналізу формування ієрархії самоподібних роторів турбулентності, які пов'язані каскадним процесом, дозволяє в подальшому розглянути процеси контактування ламінарно-турбулентних потоків повітряних аерозолів з фрактально організованими поверхнями ландшафтних елементів в межах смуг відведення (резервних смуг) автодорожньої мережі.

3.4. Основні чинники формування мікроклімату в зоні смуги відведення автомобільної дороги

В межах смуг відведення автомобільної дороги фонові кліматичні умови природно-техногенної геоекосистеми зазнають суттєвих змін внаслідок антропогенної трансформації ландшафту та специфіки функціонування автотранспортних потоків, що призводить до формування комплексу мікроклімату автодорожньої мережі. На формування специфічних мікрокліматичних умов в зоні функціонування автотранспортного потоку, в першу чергу впливають такі чинники:

- лінійність техногенного об'єкту (автомобільної дороги), що призводить до відповідної трансформації та розчленування ландшафту природно-територіального комплексу;
- переорієнтація напрямків природних повітряних потоків (вітрового режиму) відповідно до трансформованих ландшафтних умов (насипи та виїмки траси автомобільної дороги, облаштування кавальєрів та газо-пилотзахисних лісосмуг, облаштування просік та вирубок в лісових масивах тощо);
- безпосередні теплове забруднення та газо-пилових аерозолів, які продукуються автотранспортними потоками, що призводять до зміни природного теплового балансу;
- заміна ґрунту і підстилаючого шару поверхні природного ландшафту конструкційними матеріалами автодороги, які змінюють гідрологічний і тепловий режими природно-територіального комплексу.

Лінійно-розгалужена структура автодорожньої мережі визначає, що процеси формування мікроклімату кожної конкретної ділянки автомобільної дороги визначаються, в першу чергу характером вертикальних рухів елементарних об'ємів (з розміром dx , dy , dz) повітряних мас в зоні смуги відведення. Головним чинником вертикальних рухів елементарних об'ємів повітряного аерозолі є різниця температури (T_i) цього елементарного об'єму повітряного аерозолі і температури (T_e) атмосферного повітря на локальному рівні. Відповідно, прискорення елементарного об'єму аерозолі газо-пилової хмари викиду, яка продукується

автотранспортним потоком, у вертикальному напрямі буде визначатись як [134]:

$$\frac{dv_i}{dt} = g \frac{T_{i0} - T_{e0}}{T_e} + g \frac{\gamma - \gamma_a}{T_e} \Delta h \quad (3.45)$$

де v_i – вертикальна швидкість переміщення елементарного об'єму повітряного аерозолі в кожній конкретній точці;

t – час;

g – прискорення вільного падіння;

T_{i0} – температура елементарного об'єму повітряного аерозолі в момент викиду;

T_{e0} – температура повітря на рівні поверхні автомобільної дороги;

Δh – вертикальний розмір розглядуваного шару повітря;

$\gamma - \gamma_a$ – різниця температурних градієнтів в Δh .

Представимо (3.45) у вигляді:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{dv_i}{dt} \Big|_{h=h_0} + \frac{dv_i}{dt} \Big|_{\Delta h} \quad (3.46)$$

Очевидно, що вертикальне прискорення елементарного об'єму аерозолі газо-пилової хмари викиду у рівнянні (3.46) визначається другим доданком його (рівняння) правої частини, тобто:

$$\frac{dv_i}{dt} \Big|_{\Delta h} = g \frac{\gamma - \gamma_a}{T_e} \Delta h \quad (3.47)$$

За характером вертикального переміщення елементарного об'єму аерозолі газо-пилової хмари викиду, відповідно (3.47), розрізняється три випадки за станом стійкості атмосфери [134]:

- якщо $\frac{dv_i}{dt} \Big|_{\Delta h} > 0$ вертикальні рухи аерозолі відбуваються з певним прискоренням, швидкість вертикального (спрямованого догори) переміщення елементарного об'єму газо-пилової хмари викиду зростає і, в цьому випадку, за означенням стратифікація шарів атмосферного повітря є нестійкою;

- якщо $\left. \frac{dv_i}{dt} \right|_{\Delta h} < 0$ вертикальні рухи аерозолі відбуваються з певним уповільненням (від'ємне прискорення), швидкість вертикального (спрямованого догори) переміщення елементарного об'єму газо-пилової хмари викиду зменшується і за означенням такий випадок визначає стратифікацію шарів атмосферного повітря як стійку;
- якщо $\left. \frac{dv_i}{dt} \right|_{\Delta h} = 0$ повітряні маси, які оточують газо-пилову хмару викиду, характеризуються значенням градієнтів температури $\gamma = \gamma_a$, а отже не призводять до змін вертикальної швидкості елементарних об'ємів аерозолі і за означенням визначають даний стан стратифікації атмосфери як байдужий.

Типовий профіль конструкції смуги відведення автомобільної дороги [2, 15, 16] з урахуванням рельєфних особливостей ландшафту природно-техногенної геоекосистеми передбачає два базових варіанти розташування земляного полотна і пов'язаних з ним конструкційних елементів: у виїмці (рис.3.11-а) та на насипу (рис.3.11-в).

Узагальнюючим розвитком варіанту розташування земляного полотна і пов'язаних з ним елементів автомобільної дороги у виїмці є конструкція поперечного профілю автомобільної дороги, яка передбачає обладнання лінійного двобічного (іноді однібічного) “екранування” смуги автомобільної дороги такими елементами як кавальєри, газо-пилозахисні лісосмуги (рис.3.11-б), резерви тощо.

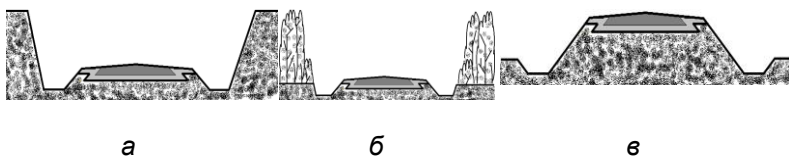


Рис.3.11. Варіанти поперечного профілю розташування земляного полотна автомобільної дороги: а – у виїмці; б – з облаштованою двобічною газо-пилозахисною лісосмугою; в – на насипі

Внаслідок специфічних ландшафтно-геометричних параметрів конструкції смуги відведення за варіантами а та б,

які наведено на рис.3.11, фонові повітряні потоки, напрямок руху яких практично завжди не співпадає з поздовжньою орієнтацією смуги відведення автомобільної дороги, призводять до переорієнтації напрямку переміщення фонових повітряних мас. В зоні смуги відведення автомобільної дороги вектор напрямку руху повітряної маси орієнтується вздовж проїжджої частини дороги, яка обмежена бічними елементами виїмки або аверсною стороною газо-пилрозахисних лісосмуг (рис.3.12) – виникає, так званий, “долинний” вітер (відповідно до класифікації типу вітру). В результаті в профілі граничних шарів атмосфери, які розташовані безпосередньо над поверхнею дорожнього полотна формується дві зони, границю поміж якими можна умовно визначити площиною “зрізу” напрямків руху відповідних повітряних мас (рис.3.13).

Температура T_{i0} аерозолів газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, завжди суттєво вища за температуру T_{e0} повітряної маси на рівні поверхні проїжджої частини автодороги, а отже різниця градієнтів температури $\gamma - \gamma_a$ в довільному шарі атмосферного повітря Δh над проїжджою частиною (дорожнім полотном) автодороги є додатною. Відповідно (3.47) в цьому випадку стратифікація шару атмосферного повітря, який є прилеглим до поверхні проїжджої частини автомобільної дороги, буде класифікуватись як нестійка (рис.3.13) [134].

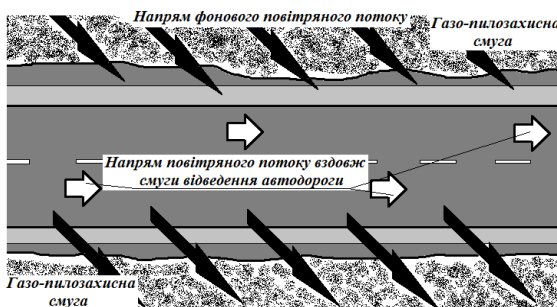


Рис.3.12. Зміна напрямку рухів повітряних мас в профілі смуги відведення автомобільної дороги, яка облаштована двобічними газо-пилорозахисними лісосмугами

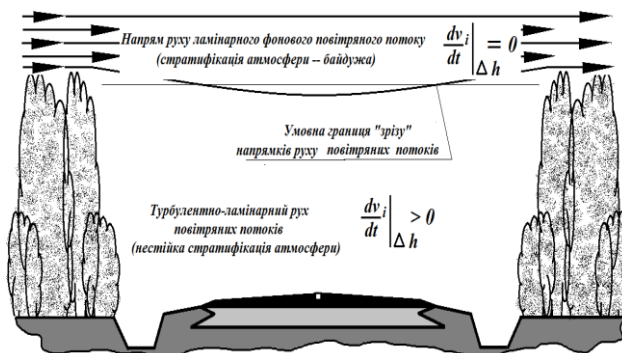


Рис.3.13. Характер стратифікації атмосфери над полотном проїжджої частини автомобільної дороги

Таким чином, вертикальне прискорення $\frac{dv_i}{dt} \Big|_{\Delta h} > 0$ аерозолі газопилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, в зоні прилеглій до полотна проїжджої частини автомобільної дороги завжди є додатнім. Ротори аерозольного викиду рухаючись у повітряних потоках вздовж смуги відведення автодороги одночасно переміщуються вертикально доверху, а їх (роторів) бічне переміщення обмежене аверсними сторонами бічних газопилозахисних лісосмуг або бічними стінками виїмки (рис.3.12). Вище верхнього зрізу профілю смуги відведення автодороги (рис.3.13), який визначено площиною дотичною до верхівки крон дерев захисних смуг (при розташуванні полотна проїжджої частини автодороги у виїмці – верхніми бровками виїмки), ламінарний характер фоновому переміщенню повітряних мас зумовлює нульове значення вертикального прискорення елементарних об'ємів газопилової хмари викиду, тобто $\frac{dv_i}{dt} \Big|_{\Delta h} = 0$. Стратифікація атмосфери в цій зоні визначається як байдужа.

Такий, різний за ознаками стратифікації, стан атмосфери в поперечному профілі смуги відведення автомобільної дороги призводить до появи на "зрізі" напрямків руху повітряних мас різкої границі, яка є аналогом інверсійного шару атмосфери. "Замкненість" та особливі характеристики атмосферного повітря в зоні смуги відведення автодороги зумовлюють формування специфічного мікроклімату, який є

відмінним від фонового і визначається, в першу чергу, транспортно-експлуатаційними параметрами автотранспортних потоків (структурою транспортних засобів, інтенсивністю, режимами руху тощо) та ландшафтними особливостями природно-техногенної геоекосистеми.

В процесі міграції роторів аерозолію газо-пилової хмари викидів, яка продукується автотранспортними потоками, відбувається сепарація мінеральної складової аерозолів з наступним її депонуванням в масиві газо-пилозахисних лісосмуг або на бічних сторонах смуги відведення автомобільної дороги. Газо-повітряна складова хмари викиду мігрує до меж інверсійної границі де відбувається типовий незворотній процес об'єднання компонентів двох потоків газових сумішей з вирівнювання їх температури.

На відміну від розглянутих вище варіантів, варіант при якому проїжджа частина автомобільної дороги розташована на насипу, відрізняється тим, що стратифікація атмосфери в смугі відведення такої автомобільної дороги відноситься до категорія байдужої, тобто в будь-якій точці вертикальне прискорення $\left. \frac{dv_i}{dt} \right|_{\Delta h} = 0$ її елементарного об'єму дорівнює нулю (рис.3.14).

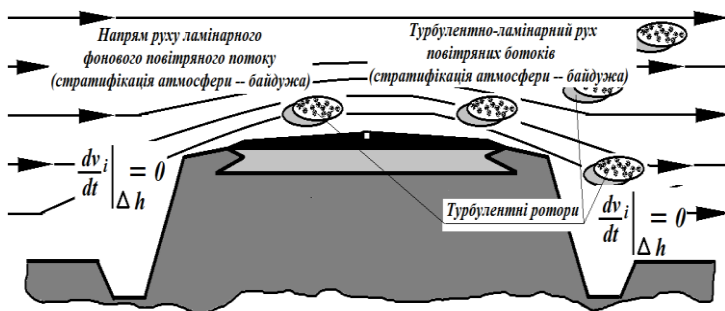


Рис.3.14. Характер стратифікації атмосфери над полотном проїжджої частини автомобільної дороги, яка розташована на насипу

Ротори аерозольної газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, залучаються до фонового ламінарного повітряного потоку не отримуючи

жодних вертикальних прискорень ($\left.\frac{dv_i}{dt}\right|_{\Delta h} = 0$) і мігрують за межі смуги відведення автомобільної дороги на невизначені відстані.

При порушенні топологічної суцільності бічних лінійних механічних геохімічних бар'єрів відбувається значна інтенсифікація турбулентності ламінарно-турбулентних повітряних потоків і виникають додаткові зони турбулентності (рис.3.15). В таких випадках спостерігаються, так звані, “крайові ефекти”. При цьому, в додаткових зонах турбулентності стратифікація атмосфери має бути охарактеризована як нестійка, тобто в цьому випадку $\left.\frac{dv_i}{dt}\right|_{\Delta h} > 0$.

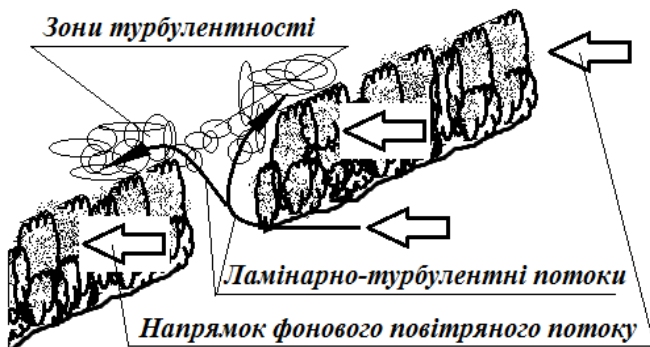


Рис.3.15. “Крайові ефекти” і виникнення додаткових зон турбулентності в ламінарно-турбулентних повітряних потоках при порушенні топологічної суцільно геохімічного бар'єру (газо-пилезахисної лісосмуги)

Отже, для забезпечення надійного депонування транспортних викидів (особливо викидів мінерального пилу та технічного вуглецю у вигляді сажі) в поперечному профілі автомобільної дороги конструкційно має бути реалізовано принцип стратифікаційного поділу прилеглих до полотна проїжджої частини автодороги шарів атмосфери.

Конструкційне забезпечення стратифікаційних відмінностей шарів атмосфери, прилеглих до полотна проїжджої частини автодороги, реалізується шляхом використання природно-ландшафтних або облаштування

штучних механічних захисних споруд смуги відведення автомобільної дороги (наприклад, газо-пилозахисних лісосмуг) у вигляді двобічних “геохімічних” бар’єрів [38, 39, 146, 148, 149].

3.5. Сепарація аерозоліу газо-пилової хмари викидів та депонування викидів, які продукуються автотранспортними потоками

Інерційні властивості мінеральної пилової фази повітряного аерозоліу (пилових частинок зважених у повітряних потоках) проявляються за будь-якої швидкості руху вітрових потоків, в тому числі і за умови повного штилю ($v \geq 0$) [134]. В результаті дії сил інерції на пилову фазу повітряного аерозоліу відбувається його сепарація з виокремленням цієї фази. Виходячи з принципу суперпозиції, в загальному випадку можна розглядати будь-який елементарний об’єм аерозоліу газо-пилової хмари викиду, як такий, що одночасно перебуває під впливом трьох інерційних чинників:

- гравітаційний фактор – дисперговані часточки аерозоліу перебувають в полі тяжіння і під дією гравітаційних сил відбувається їх сепарація, процес якої не залежить від вектору напрямків і швидкостей повітряних потоків;
- інерційний фактор – зумовлений різною густиною дисперсного середовища (атмосферне повітря) і диспергової фази (мінеральний пил та сажа) і виявляється завдяки варіабельності напрямків та швидкостей ламінарно-турбулентних повітряних потоків в елементах ландшафту природно-техногенної геоекосистеми;
- відцентровий фактор – зумовлений відцентровими силами обертових рухів аерозоліу при формуванні роторів турбулентності (відцентрові прискорення, як правило, на декілька порядків більші за прискорення сили тяжіння).

В зустрічних напрямках руху автотранспортних потоків (рис.3.4) і з огляду на ландшафтні особливості смуг відведення автомобільних доріг (рис.3.5) завжди формуються ротори турбулентності в ламінарно-турбулентних потоках повітряних мас. При цьому, розподілення швидкостей диспергованих частинок аерозольної суміші у газо-пиловій хмарі викиду, яка продукується автотранспортним потоком, відповідно до теорема Коші-Гельмгольца визначається виразом (3.26).

Траєкторії руху окремих диспергованих частинок аерозолі в повітряному роторі залежно від їх маси можуть бути представлені у вигляді сімейства епюр (рис.3.16).

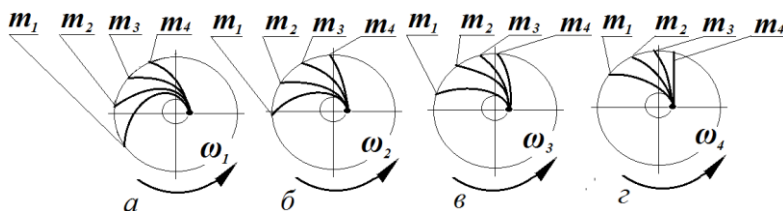


Рис.3.16. Епюри залежності траєкторій руху диспергованих мінеральних частинок в роторі аерозолі залежно від маси (m) частинки і швидкості (ω) обертання ротора

Наведені на рис.3.16 епюри характеризуються такими залежностями значень маси (m) диспергованих частинок аерозолі та кутової швидкості (ω) ротора:

$$\begin{cases} m_1 < m_2 < m_3 < m_4 \\ \omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4 \end{cases} \quad (3.48)$$

При переміщенні в ламінарно-турбулентних потоках відбувається сепарація газо-пилового ротору. Сепарований в зовнішні шари ротора мінеральний пил і сажа аерозолі контактує з поверхнями (механічними бар'єрами), які утворюють елементи ландшафту природно-техногенної геоекосистеми, а газова складова аерозолі, яка міститься переважно в центральних шарах ротору мігрує в напрямках ламінарної складової повітряних потоків.

В процесі динамічного контакту мінеральної частинки аерозолі з механічним бар'єром граничною умовою адгезії цієї частинки, як початкової стадії депонування мінеральної складової газо-пилової хмари викиду, який продукується автотранспортним потоком, є:

$$E_a = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3.49)$$

де E_a – енергія адгезії;

m – маса мінеральної частинки в аерозолі;

v – нормальна (до поверхні механічного бар'єру) обертова швидкість мінеральної частинки в роторі аерозолію.

У виразі (3.49) енергія адгезії мінеральної частинки ротора аерозолію, тобто робота, яка витрачається на подолання сил адгезії, за різного значення шорсткості поверхні механічного бар'єру, становитиме:

$$E_a = \int_{i=1}^k F_a \cdot dh \quad (3.50)$$

де F_a – гранична сила адгезії;

dh – шорсткість поверхні механічного бар'єру в лінійних одиницях;

k – кількість мінеральних частинок в роторі аерозолію (густина мінеральної складової аерозолію).

З виразу (3.50) походить, що із збільшенням значення шорсткості dh адгезійні властивості поверхонь ландшафтних об'єктів зростають. Враховуючи фрактальну організацію роторів турбулентності аерозолів газо-пилової хмари викиду (рис.3.10), значення dh суттєво збільшується на поверхнях ландшафту (механічних перешкод), які окреслено фрактальними границями. В межах смуг відведення автомобільних доріг такою поверхнею є аверсна сторона газо-пилозахисної лісосмуги, яка сформована гілчасто-листяною кроною деревних і чагарникових насаджень (рис.3.13). Характер руйнування периферійних шарів ротора турбулентності (рис.3.10) з наступною адгезією мінеральної диспергованої складової аерозолі газо-пилової хмари викиду при контактуванні з фрактальною границею аверсної поверхні газо-пилозахисної лісосмуги автомобільної дороги наведено на рис.3.17 [223, 279].

Перколяційна структура фрактальної організації газо-пилозахисної лісосмуги визначає топологію її лакунарних порожнин, яка є аналогом “лабіринтного ущільнення”

аеродинамічного потоку поміж двома поверхнями (рис.3.18) [57].



Рис.3.17. Адгезія мінерального пилу фрактальному роторі аерозолі газо-пилової хмари викиду з фрактальною поверхнею аверсної сторони газо-пилезахисної смуги, який змодельовано регулярними фракталами

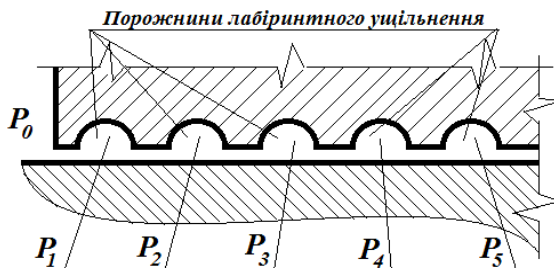


Рис.3.18. “Лабіринтне ущільнення” поверхонь

Особливістю наведеної на рис.3.18 конструкції є покрокове зменшення вихідного динамічного тиску P_0 за рахунок різниці поміж об’ємами робочих зазорів (“проходів” лабіринту) та об’ємами порожнин лабіринту. Отже:

$$P_0 > P_1 > P_2 > \dots > P_n \quad (3.51)$$

де P_i – тиск у порожнинах лабіринту;
 n – кількість порожнин лабіринту).

Таким чином, наявність лабіринту лакунарних порожнин у фрактальному масиві газо-пилрозахисної лісосмуги автомобільної дороги, забезпечує каскадне (покрокове) зменшення швидкості v , а отже і динамічного тиску аерозолів ламінарно-турбулентних повітряних потоків. Зменшення динамічного тиску в лакунарних порожнинах лісосмуги призводить до інтенсифікації процесів осадження сажі та мінерального пилу диспергованих в аерозолі газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, з подальшим їх депонуванням ґрунтовою поверхнею безпосередньо в межах масиву газо-пилрозахисної смуги (додаток X).

Для аналізу аеродинамічних властивостей фрактальних лабіринтів газо-пилрозахисної лісосмуги лабіринтного типу (рис.3.17) скористаємось формулою А.Стодола [62], яку засновано на припущенні про часткове зменшення швидкості v повітряного потоку в комірках лабіринту лакунарних порожнин:

$$G = f \cdot \sqrt{\frac{P_0^2 - P^2}{Z \cdot P_0 \cdot w_0}} \quad (3.52)$$

де G – масова витрата повітряного потоку;

$f = \pi \cdot d \cdot \delta$ – прохідний переріз зазору δ умовного діаметру d ;

Z – кількість лакунарних порожнин (комірок лабіринту) у вертикальному поперечному перерізі лісосмуги;

P – тиск аерозольного повітряного потоку на аверсному боці лісосмуги;

P_0 – тиск аерозольного повітряного потоку на реверсному боці лісосмуги;

w_0 – питомий об'єм аерозолі.

Відповідно до (3.52) уточнена формула для розрахунку проточок аерозолі в лакунарному перколяційному масиві газо-пилрозахисної лісосмуги, з урахуванням кута α_0 нахилу повітряного аерозольного потоку до аверсної сторони смуги, а також бічних траєкторій руху ламінарно-турбулентних повітряних потоків у лакунарних порожнинах в горизонтальному напрямі, набуде вигляду [276]:

$$G = \alpha_0 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\frac{P_0^2 - P^2}{Z \cdot P_0 \cdot w_0}} \quad (3.53)$$

де $f_0 = \pi \cdot d \cdot \delta_0$ – прохідний переріз зазору δ_0 умовного діаметру d , який становить:

$$\delta_0 = \beta \cdot \left[\delta + \frac{d}{2} \cdot (1 - \cos \theta_0) \right] \quad (3.54)$$

β , θ_0 – вертикальний і горизонтальний кути напрямку траєкторії повітряних потоків до аверсних сторін лакунарних порожнин;

α_0 – коефіцієнт витрати повітряного потоку аерозолів, який залежить від β , θ_0 і становить в нашому випадку:

$$\alpha_0 = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 - \bar{v}^2}} \quad (3.55)$$

μ_0 – коефіцієнт звуження перерізу на реверсному боці лакунарної порожнини:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{01} = \frac{1 + v_1 / \vec{v}_1}{2} \\ \mu_{02} = \frac{1 + v_2 / \vec{v}_2}{2} \\ \dots \dots \\ \mu_{0z} = \frac{1 + v_z / \vec{v}_z}{2} \end{array} \right. \quad (3.56)$$

Відношення швидкостей повітряного потоку безпосередньо до v і після $\vec{v}$ лакунарної порожнини лабіринту становить:

$$\bar{v} = \frac{v}{\vec{v}} = \varphi(\bar{l}) \quad (3.57)$$

де $\bar{l}$ – відносна довжина траєкторії аерозольного потоку, яка дорівнює:

$$\bar{l} = \frac{2 \cdot l}{\delta'} \quad (3.58)$$

δ' – відносна ширина вузького перерізу поміж лакунарними порожнинами:

$$\delta' = \delta_0 \cdot \mu_0 \quad (3.59)$$

Збільшення об'ємів лабіринтних комірок в масиві газопилозахисної лісосмуги дозволяє оптимізувати значення $P_0^2 - P^2$ у (3.53) шляхом створення штучної лакуарності і, як наслідок, підвищити рівень адгезійних властивостей смуги, що має забезпечити надійність процесів депонування мінеральних забруднень і сажі в межах смуги відведення автомобільної дороги.

Аерозоль газопилової хмари викидів, які продукуються автотранспортним потоком, переміщуються за певними траєкторіями, які в загальному випадку описуються як $x_i(t; x_i^{(0)}; t')$ і в деякий момент часу t' проходять через точку з координатами $x_i^{(0)}$ [213]. Забруднена область, яка визначається статистичною сукупністю координат $x_i^{(0)}$ може бути визначена як:

$$\sigma_{x_i}^2 = \overline{|x_i(t_1 - t'; x_i^{(0)}; -x_i^{(0)})|^2} \quad (3.60)$$

де $t_1 - t' = t$ - час міграції елементарного об'єму аерозолю після викиду з точки $x_i^{(0)}$. Отже, швидкість v_i переміщення цього елементарного об'єму буде:

$$v_i(t_1) = \frac{dx(x_1, x_i^{(0)}, t')}{dt} \quad (3.61)$$

а її прискорення становитиме:

$$a_i(t_1) = \frac{dv_i(t_1)}{dt} \quad (3.62)$$

Траєкторія поширення аерозолі, швидкість та прискорення в просторі є функціями часу $a_i(t)$, $v_i(t)$ і початкових координат $x_i(t)$, яка відповідно (3.24) описується за допомогою змінних Лагранжа, і є:

$$\begin{cases} B_v^i = \overline{v_i(t; x_i^{(0)}, t') v_i(t + \tau; x_i^{(0)}, t') = B_v^i(\tau)} \\ B_a^i = \overline{a_i(t; x_i^{(0)}, t') a_i(t + \tau; x_i^{(0)}, t') = B_a^i(\tau)} \end{cases} \quad (3.63)$$

Швидкість $v_i(t)$ і прискорення $\frac{\partial v}{\partial t}$ елементарного об'єму газо-пилової хмари викиду у змінних Лагранжа є похідними від їх траєкторії. А отже, структурні функції для швидкостей $v_i(t)$ і прискорень $a = \frac{\partial v}{\partial t}$ можна представити у вигляді:

$$D_v^i(\tau) = \overline{[v_i(t; x_i^{(0)}, t') - v_i(t + \tau; x_i^{(0)}, t')]^t} \quad (3.64)$$

Введемо позначення:

$$\begin{cases} a = v_i(t; x_i^{(0)}, t') \\ b = v_i(t + \tau; x_i^{(0)}, t') \end{cases} \quad (3.65)$$

З урахуванням (3,65) права частина (3,64) є біномом Ньютона вигляду $(a + b)^i$, який розкладається в суму одночленів, що є добутками степенів порядку i його доданків a і b :

$$\begin{aligned} (a + b)^i = & C_i^0 \cdot a^i + C_i^1 \cdot a^{i-1} \cdot b^1 + C_i^2 \cdot a^{i-2} \cdot b^2 + \dots + \\ & + C_i^{i-1} \cdot a^1 \cdot b^{i-1} + C_i^i \cdot b^i \end{aligned} \quad (3.66)$$

де біноміальні коефіцієнти визначаються як:

$$C_i^k = \frac{(i)!}{(k)! \cdot (i-k)!} = \frac{i \cdot (i-1) \cdot (i-2) \cdot \dots \cdot (i-(k-1))}{(k)!} \quad (3.67)$$

i є по суті сполученнями з i по k , де $k = 0, 1, 2, \dots, i$.

Якщо представити розподілення біноміальних коефіцієнтів в графічному вигляді, отримуємо, так званий, арифметичний трикутник Паскаля [29] у вигляді графу, де позначкою $+$ позначені місця розташування непарних біноміальних коефіцієнтів (рис.3.19). Фрактальна розмірність трикутника Паскаля визначиться як [127]:

$$\mu_{\text{на площині}} = \mu_{\text{просторове}} - 1 = 2,8797 - 1 = 1,8797 \quad (3.68)$$

Якщо для топологічного (фрактально-геометричного) моделювання лакунарних порожнин газопилозахисної лісосмуги використати фрактальний ансамбль складений з геометричної множини фракталів розмірності $\mu=1,8928$ (рис.3.20), то відносна погрішність моделювання не перевищуватиме:

$$\Delta = \frac{|\mu_{\text{лакунарної порожнини}} - \mu_{\text{моделі}}|}{\mu_{\text{лакунарної порожнини}}} \cdot 100\% < 0,7\%, \quad (3.69)$$

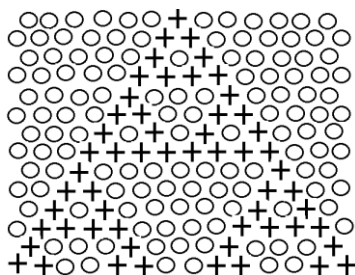


Рис.3.19. Класичний трикутник Паскаля
(фрактальна розмірність $\mu=1,8797$)

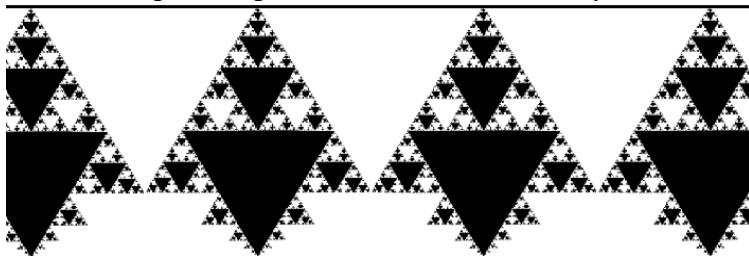


Рис.3.20. Фрактальний ансамбль моделі лабіринту лакунарних порожнин газо-пилозахисної смуги автомобільної дороги (фрактальна розмірність $\mu=1,8928$)

Представимо сукупність точок a_i посадки дерев і чагарників лісової газо-пилозахисної смуги (рис.3.20) у вигляді множини X , тобто $a \in X$, а сукупність C_i^k – у вигляді порожньої множини $Y - C_i^k \in Y$. Тоді X і Y є топологічним простором з топологічною структурою T . При цьому, $Y \in \emptyset$, а відображення множин X та Y з точки зору топології є гомеоморфізмом $f: X \rightarrow Y$, а отже:

$$\begin{cases} X \cong X \\ X \cong Y \Rightarrow Y \cong X \\ X \cong Y \wedge Y \cong Z \Rightarrow X \cong Z \end{cases} \quad (3.70)$$

і сукупність, а отже і кожен з обох топологічних просторів (типів) X та Y є гомеоморфним і обидва вони мають однакові топологічні типи.

Наведений топологічний аналіз множин X та Y є достатньою підставою для використання топології розподілення біноміальних коефіцієнтів біному Ньютона у вигляді арифметичного трикутника Паскаля для моделювання горизонтальної структури лабіринту лакунарних порожнин фітоценозів газо-пилозахисних лісосмуг автомобільних доріг.

Таким чином встановлено, що характер процесів сепарації мінеральних забруднювачів аерозолію газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортним потоком, в ламінарно-турбулентних повітряних потоках та процесів їх адгезії ландшафтними поверхнями і депонування

безпосередньо в межах газо-пилозахисної лісосмуги визначається особливостями конструкції структури лабіринту лакунарних порожнин смуги, які мають бути топологічно “організовані” в горизонтальній площині за принципом геометричного аналогу розподілення біноміальних коефіцієнтів.

3.6. Результати експериментальної ідентифікації динаміки ламінарно-турбулентних повітряних потоків аерозолію

Для експериментальної перевірки викладених вище аналітичних досліджень був використаний ефект преципітації (лат. *praecipitatio* –стрімке осадження) твердого грубодисперсного індикатору повітряного аерозолію у вигляді вільнодиспергованих в атмосферному повітрі снігових опадів [226].

Візуальні спостереження характерних особливостей міграції та поверхневої адгезії вільнодиспергованого у повітрі “снігового” грубодисперсного аерозолію здійснювались протягом зимових періодів 2015-2017 років на відкритому майданчику з спеціально обладнаними механічними перешкодами та окремих ділянках автомобільних доріг H03, E50, P05.

Відповідно рівнянню (3.22) було встановлено, що у випадку компенсування стоків і джерел $\operatorname{div} F = 0$ в газо-пиловому аерозолі хмари викидів, яка продукується автотранспортним потоком, формуються ротори турбулентності, які довільно орієнтовані у просторі до окремих об’єктів ландшафту. Ротори турбулентності виникають на зрізах швидкості повітряних потоків, які виникають на зустрічних смугах руху автомобільних доріг, або в місцях дотику вектору ламінарно-турбулентних повітряних потоків до поверхонь нерухомих ландшафтних об’єктів, в тому числі і штучно створених (рис.3.21) [280].

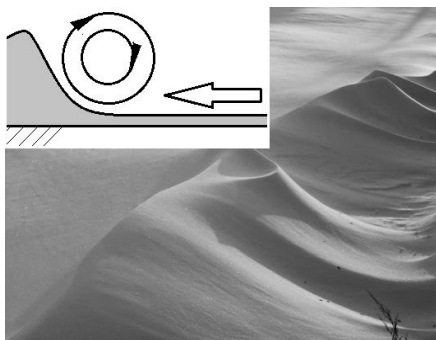


Рис.3.21. Індикація утворення ротору турбулентності на поверхні ландшафту

Поле швидкостей турбулентних роторів (в тому числі ненульових) газо-пилової хмари викиду продукowanego автотранспортним потоком відносно центра мас газо-пилової хмари визначається не лише динамічними характеристиками повітряного аерозолі, але і просторовими координатами та формою (конструкцією) поверхонь механічних перешкод, які сформовані елементами ландшафту природно-техногенної геоекосистеми. Якщо напрям ламінарно-турбулентного повітряного потоку спрямувати за напрямом однієї з координатних осей (в даному випадку за віссю x , яка лежить в горизонтальній площині ландшафту), то відповідно (3.36) виникає вертикально спрямований градієнт імпульсу швидкості mv повітряного потоку dv . При цьому, в зонах утворення роторів турбулентності процес переносу домішок аерозолі визначається коваріацією $Cov(v, u)$ вертикальної u та горизонтальної v складових повної швидкості повітряних потоків. В залежності від напрямку вектора швидкості фонового повітряного потоку і орієнтації (відносно цього вектору) поверхонь механічних перешкод, які утворені елементами ландшафту, в місцях дотику ротору турбулентності до поверхні перешкоди спостерігається два варіанта адгезії диспергованих частинок повітряного аерозолі (рис.3.22 та рис.3.23).

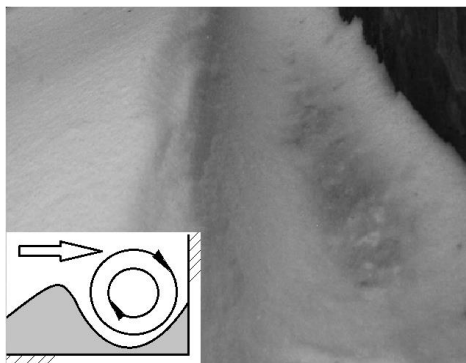


Рис.3.22. “Закритий” ротор турбулентності поблизу поверхні вертикальної механічної перешкоди, яка розташована з підвітряного боку

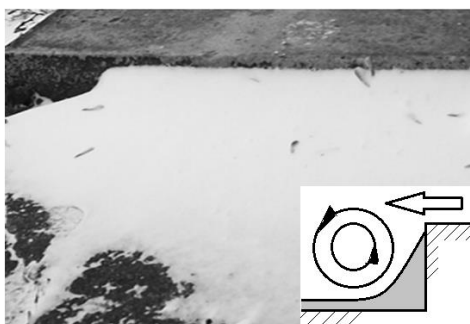


Рис.3.23. “Відкритий” ротор турбулентності поблизу поверхні вертикальної механічної перешкоди, яка розташована з навітряного боку

У випадку розташування механічної перешкоди на підвітряному боці напрямку руху фоновго повітряного потоку (рис.3.22) при контактуванні ротору аерозолі з перешкодою відбувається активне руйнування периферійних шарів ротору, в яких зосереджено переважна частка диспергованої мінеральної складової аерозолі. В зруйнованих турбулентних потоках, які контактують з поверхнею ландшафтного об'єкту, інтенсифікуються процеси адгезії мінеральних забруднювачів. В подальшому, в залежності від характеристик шорсткості

поверхонь ландшафтних об'єктів, відбувається або преципітація мінеральних забруднювачів на цих поверхнях або, в разі контакту з аверсною стороною газо-пилрозахисної лісосмуги, диспергований мінеральний пил і сажа в складі турбулентних потоків надходять до лакунарних порожнин смуги і депонуються масивом деревних і чагарникових насаджень.

В іншому випадку, якщо поверхня механічної перешкоди розташована з навітряного боку фонового повітряного потоку (рис.3.23), формується “відкритий” ротор турбулентності. Дисперговані у повітрі мінеральний пил і сажа дифундують в цьому випадку не лише на поверхні перешкоди, але і на горизонтальних поверхнях ландшафту, які розташовані безпосередньо перед ландшафтною перешкодою. При цьому, в обох випадках адгезійні процеси мінеральних забруднювачів і технічного вуглецю, які продукуються автотранспортними потоками, визначаються характеристиками шорсткості поверхонь ландшафтних об'єктів, які контактують з ламінарно-турбулентними потоками повітряних аерозолів.

Ландшафтні топологічно-геометричні особливості смуги відведення автомобільної дороги значною мірою визначають характер преципітації і подальшого депонування пилових забруднювачів, які продукуються автотранспортними потоками, що і засвідчено візуальними методами індикації вільнодиспергованого у повітрі “снігового” грубодисперсного аерозолі. Так, у випадку розташування земляного полотна автомобільної дороги у виїмці, преципітація переважної маси пилових забруднювачів і подальше їх депонування відбувається на бічних поверхнях виїмки, що ускладнює міграцію сажі і продуктів дезінтеграції матеріалів конструкції автомобільної дороги за межі смуги відведення (рис.3.24). Ландшафтным розвитком наведеного на рис.3.24 варіанту є варіант облаштування профілю автомобільної дороги двобічною газо-пилрозахисною смугою, яка виконує функції двобічного лінійного геохімічного бар'єру (рис.3.25). В цьому випадку, завдяки формуванню “долинних” вітрових потоків та інверсійного шару на зрізі швидкостей фонового і “долинного” вітру, забезпечується надійне транспортування турбулентних роторів газо-пилових аерозолів, які продукуються автотранспортними потоками, до аверсних сторін газо-пилрозахисних лісосмуг.

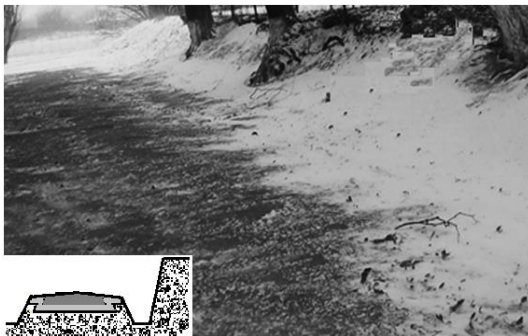


Рис.3.24. Характер преципітації вільнодиспергованого у повітрі “снігового” грубодисперсного аерозолі при розташуванні автомобільної дороги у виїмці

Адгезійні та лакунарні властивості деревних і чагарникових насаджень газо-пилрозахисних лісосмуг зумовлюють інтенсивне депонування пилових забруднювачів масивом смуги і, як наслідок, гарантований захист прилеглих до дороги об'єктів природно-техногенної геоекосистеми.



Рис.3.25. Двобічна газо-пилрозахисна лісосмуга автодороги, як розвиток розташування автомобільної дороги у виїмці

Штучно створювані ландшафтні елементи автотранспортної мережі природно-техногенних геоекосистем мають передбачати детальне їх обґрунтування на стадії розробки проектної документації. Адже конструкційні

параметри транспортної мережі (в тому числі і параметри, що визначають рівень екологічної безпеки), закладені на стадії проектування на подальших стадіях циклів задоволення потреб (стадії виготовлення та експлуатації) можливо лише зберегти, але ніяк не покращити. Так, типові помилки при проектуванні деревно-чагарникових газо-пилозахисних смуг (зокрема, проектування одnobічних геохімічних бар'єрів) не лише зумовлюють погіршення транспортно-експлуатаційних характеристик автодорожньої мережі, але і призводять до зниження екологічної безпеки природно-техногенної геоекосистеми в цілому (рис.3.26). В цьому випадку виникають додаткові "коридори" інтенсивної неконтрольованої міграції газо-пилових викидів автотранспортних потоків, які поширюються на значні відстані. До того ж, в разі необґрунтованих рішень при проектуванні газо-пилозахисних лісосмуг автодорожньої мережі, в зимовий період року під час інтенсивних хуртовин на поверхні полотна проїжджої частини автодороги виникають численні снігові "перемети", які не лише погіршують транспортно-експлуатаційні умови руху автотранспортних потоків, але і призводять до інтенсифікації дезінтегрування (руйнування) конструкційних матеріалів автодороги.



Рис.3.26. Приклад нераціональної ландшафтної організації смуги відведення автомобільної дороги з одnobічним геохімічним бар'єром

Найнебезпечнішим варіантом, з точки зору неконтрольованої міграції забруднювачів в межах природно-техногенної геоекосистеми з розвиненою автотранспортною

мережею, є варіант який передбачає наявність значної кількості розривів в неперервних масивах газо-пилрозахисних лісосмуг, що зумовлює виникнення, так званих “крайових ефектів” (рис.3.27). “Крайові ефекти” в місцях розриву суцільної деревно-чагарникової посадки призводять не лише до виникнення додаткових зон турбулентності, але і створюють “коридори” інтенсивного неконтрольованого перенесення забруднювачів, а в зимовий період року сприяють утворенню “переметів” на проїжджій частині автомобільних доріг.



*Рис.3.27. Утворення снігового “перемету”
внаслідок впливу “крайового ефекту” в зоні розриву
суцільності масиву газо-пилрозахисної смуги автомобільної
дороги*

На відміну від розглянутого вище варіанту розташування автомобільної дороги у виїмці, специфічні ландшафтні умови вимагають також і спорудження окремих ділянок автомобільних доріг на насипу. В цьому випадку утворювані турбулентні ротори аерозолі газо-пилової хмари викидів автотранспортного потоку залучаються до фонових повітряних потоків і мігрують не лише за межі смуги відведення, але і далеко за межі резервних смуг автодорожньої мережі. Саме про такий характер міграційних процесів свідчить їх індикація, яку виконано на підставі аналізу преципітації снігових опадів в межах смуги відведення автомобільної дороги (рис.3.28).



Рис.3.28. Характер преципітації вільнодиспергованого у повітрі “снігового” грубодисперсного аерозолю при розташуванні автомобільної дороги на насипу (<https://www.ukrinform.ua>)

Результати опосередкованої ідентифікації аерозолю газо-пилової хмари викидів, яка продукується автотранспортним потоком, в межах смуги відведення (резервно-технологічної смуги) автомобільної дороги, отримані методом індикації вільнодиспергованого у повітрі “снігового” грубодисперсного аерозолю, є адекватними результатами аналітичних досліджень і визначають залежність характеру міграції, адгезії та депонування забруднювачів конкретним ландшафтним умовам природно-техногенної геоекосистеми.

3.7. Розроблення інформаційної моделі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги

На підставі аналітичних та експериментальних досліджень динаміки процесів масопереносу і депонування забруднювачів, продукуваних автотранспортними потоками, розроблено інформаційно-графічну модель і вербальний опис процесів міграції, адгезії та депонування диспергованих у повітряному аерозолі речовин газо-пилової хмари викидів в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг [250]. Найтиповішим варіантом такої моделі є інформаційно-графічна модель резервно-технологічної смуги автомобільної дороги, яка містить двобічну газо-пилозахисну лісосмугу деревно-чагарникових насаджень у вигляді лінійного двобічного геохімічного бар'єру. Зазначену модель наведено на рис.3.29 –

план резервної смуги автодороги і рис.3.30 – поперечний переріз її (смуги) профілю. Вербальний опис такої моделі полягає в наступному.

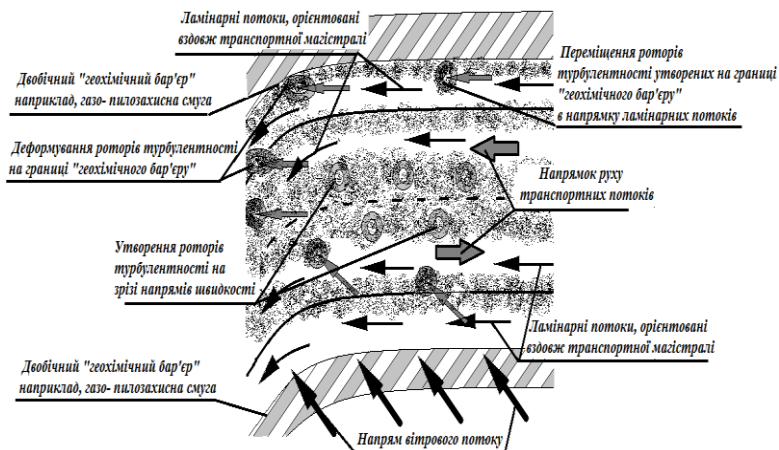


Рис. 3.29. Характер ламінарно-турбулентної міграції та дифузії повітряного аерозолі газо-пилової хмари викиду в плані проїжджої частини автодороги

Фонові повітряні потоки (рис.3.29) в поєднанні з переміщеннями повітряних мас, які виникають в результаті руху автотransпортних потоків, формують ламінарну складову рухів повітря, яка орієнтована вздовж проїжджої частини автомобільної дороги, так званий "долинний вітер". Навіть за умови повного штилю фонових вітрів, "долинний вітер" завжди виникає внаслідок механічного переміщення повітряних мас, який зумовлено динамікою протилежно спрямованих автотransпортних потоків.

На зрізі швидкостей зустрічних автотransпортних потоків виникають зони турбулентності, які призводять до виникнення роторів (див. п.3.1), в яких відбувається початкова дифузія дисперсної фази газо-пилової хмари викиду продукovanого автотransпортними потоками. Аналогічний процес формування роторів турбулентності спостерігається і на зовнішніх сторонах автотransпортних потоків (з боку обочин проїжджої частини автодороги), що зумовлено різницею швидкостей повітряних мас прилеглих до поверхонь

ландшафту і швидкостей автотранспортних потоків. Динамічні характеристики роторів турбулентності аерозолів газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортними потоками, значно інтенсифікуються в результаті взаємодії з окремими елементами ландшафту в межах резервно-технологічної смуги автомобільної дороги (рис.3.30).

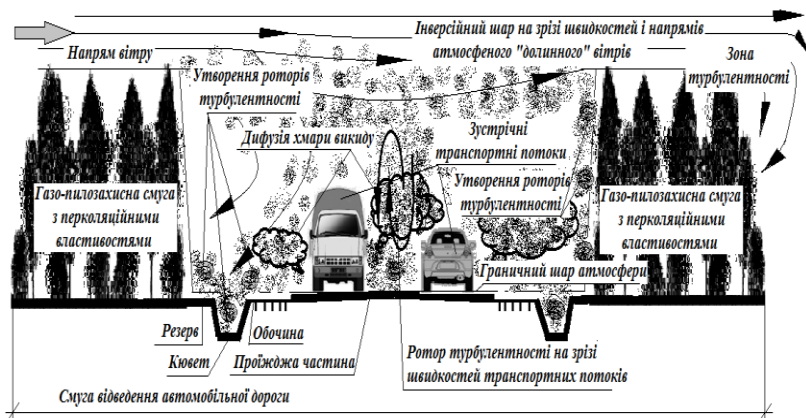


Рис. 3.30. Характер ламінарно-турбулентної міграції та дифузії повітряного аерозолу газо-пилової хмари викиду в профілі поперечного перерізу автодороги

Ротори аерозолу газо-пилової хмари викидів, продуковані автотранспортними потоками, під дією ламінарної складової повітряного потоку (під дією "долинного вітру") переміщуються в горизонтальних площинах до контакту з поверхнями бічних елементів ландшафту резервно-технологічної смуги автомобільної дороги, якими в даному випадку є двобічний геохімічний бар'єр, утворений аверсними сторонами захисних лісосмуг. Окрім горизонтальних переміщень, аерозоль газо-пилової хмари викиду набуває вертикальних прискорень внаслідок впливу вертикального градієнту імпульсу швидкостей, який зумовлено різницею температур по висоті профілю ландшафту автомобільної дороги (температура аерозолу газо-пилової хмари викиду завжди суттєво більша за температуру навколишнього повітря). При цьому, в процесі переміщення роторів аерозолу газо-пилової хмари викидів, під

дією відцентрових сил у роторі відбувається дифузія аерозолію. Мінеральна складова аерозольного ротору, яка має масу більшу за масу газо-повітряної суміші хмари, зосереджується на периферії ротора і залучається до процесу адгезії на поверхнях ландшафтних об'єктів.

Внаслідок вертикальних переміщень елементарних об'ємів роторів газо-пилової хмари викиду з від'ємним прискоренням ($\left(\frac{dv_i}{dt}\right)_{\Delta h} < 0$), стратифікація атмосфери у профілі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги визначається як стійка на відміну від байдужої стратифікації атмосфери ($\left(\frac{dv_i}{dt}\right)_{\Delta h} = 0$), яка розташована над верхнім зрізом профілю автодороги (окреслено верхівками гілчасто-листяної крони дерев головної породи газо-пилізахисної лісосмуги автодороги). В результаті у вертикальному профілі поперечного перерізу резервно-технологічної смуги автомобільної дороги утворюються дві зони, які відрізняються за характером стратифікації, границю поміж якими є умовна площина “зрізу” поміж напрямком фонових повітряного потоку і напрямком “долинного вітру”.

Перебуваючи під дією гравітаційних, інерційних та відцентрових чинників, мінеральна фаза ротору аерозолію газо-пилової хмари викиду, яка динамічно контактує з фрактальними поверхнями ландшафтних об'єктів різної шорсткості (dh), залучається до процесів адгезії на цих поверхнях. В разі контакту аерозолію газо-пилової хмари викиду з аверсною поверхнею захисної смуги (рис.3.17), під дією динамічного тиску повітряних потоків (W), аерозоль залучається до переміщення (V) в лакунарних порожнинах деревно-чагарникових насаджень смуги, яка має перколяційну структуру (рис.3.31).

Послідовне покрокове зниження динамічного тиску P в лабіринті лакунарних порожнин газо-пилізахисної лісосмуги (ф-ла 3.51) зумовлює інтенсифікацію процесів преципітації та адгезії мінеральної складової аерозолію з подальшим її депонуванням безпосередньо в межах лісозахисної смуги.

Газова складова газо-пилової хмари викиду, після сепарації з неї диспергованих мінерального пилу і сажі, під дією різниці температур газо-повітряної суміші і повітря в профілі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги, переміщується доверху де контактує з інверсійним шаром, який утворено на “зрізі” швидкостей і напрямків фонових повітряного потоку і “долинного вітру” (рис.3.30).

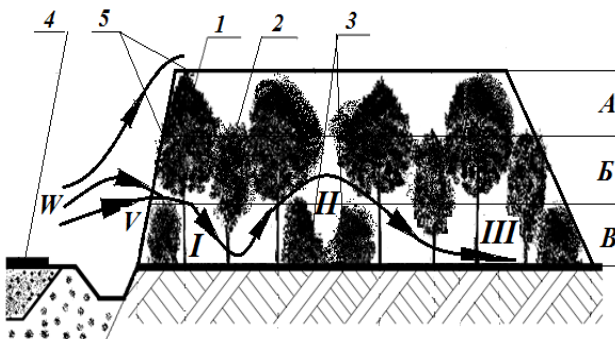


Рис.3.31. Газо-пілозахисна смуга з перколяційною організацією структури: 1 – головна порода; 2 – супутня порода; 3 – чагарник; 4 – полотно автомобільної дороги; 5 – трапецієвидний контур поперечного профілю смуги V, W – траєкторії повітряного потоку; →II→III – лабіринт лакунарних порожнин; А, Б, В – фітогоризонти лісосмуги

Переважно ламінарний характер руху фонових вітрів за байдужої стратифікації атмосфери ($\left. \frac{dv_i}{dt} \right|_{\Delta h} = 0$) зумовлює інтенсивну дифузію шкідливих газоподібних викидів, які продукуються автотранспортними потоками, у фонових повітряних масах. При цьому, для забезпечення максимально можливої інтенсивності відновлення газового складу “стандартної атмосфери” необхідною умовою є дотримання чіткого (з точки зору морфології дерев головної породи) верхнього контуру газопілозахисної лісосмуги.

Отже, розробка моделі оптимальної (з точки зору екологічної безпеки природно-техногенної геоекосистеми) конструкції ландшафту резервно-технологічної смуги автомобільної дороги має забезпечити максимально інтенсивне депонування викидів автотранспортних потоків по таких інгредієнтах як мінеральний та аерозольний пил і сажа в залежності від категорії автомобільної дороги та інтенсивності автотранспортних потоків. Разом з тим, газоподібні викиди, які продукуються автотранспортними потоками (CO , CO_2 , N_xO_y , ароматичні та поліциклічні вуглеводні приведені до $C_{20}H_{12}$) мають бути максимально повно залучені до процесів дифузії у фонову атмосферу, склад якої за межами резервно-технологічної смуги автодороги має максимально наближатись до значень

“стандартної” атмосфери. Значення граничних річних мас викидів, які продукуються автотранспортними потоками (в залежності від категорії автомобільної дороги та інтенсивності автотранспортного потоку), визначені на підставі теоретичних та експериментальних досліджень в розділі II, наведено відповідно в таблиці 2.7 і в таблиці 2.9.

Сніговий покрив у зимовий період року зумовлює і специфіку процесів депонування пилових забруднювачів, які продукуються автотранспортними потоками. Мінеральний пил і сажа депонуються в масиві снігового (кріогенного) покриву з подальшою міграцією талими водами, яка передбачає не лише вертикальну, але і горизонтальну фільтрацію колоїдних розчинів забруднюючих інгредієнтів, накопичених у сніговому масиві протягом зимового періоду. Рідкі розчини забруднювачів надходять в низовини рельєфу (в тому числі і штучно створені, наприклад у кювети конструкції автомобільної дороги), де відповідно акумулюються протягом всього періоду експлуатації автодороги.

3.8. Висновки за розділом III

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень динаміки процесів масопереносу і депонування викидів забруднюючих речовин, які продукуються автотранспортними потоками, в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг можна зробити такі висновки:

1. Результатом сукупності неперервних термодинамічних циклів згоряння паливних матеріалів і взаємодії рушіїв з робочою поверхнею автодороги, які забезпечують транспортно-технологічне функціонування автотранспортних потоків, є множина одномоментних викидів в атмосферне повітря у вигляді хмари газо-пилового аерозолі. Мірою дифузії газо-пилового аерозолі в атмосферне повітря є маса диспергованих у хмарі викиду мінеральних і газоподібних речовин, яка зазнає дифузійного розсіювання за одиницю часу через одиницю площі хмари.

2. Дивергентний характер дифузійного потоку диспергової фази аерозолі визначає умови формування каскаду роторів турбулентності газо-пилової хмари викидів, які продукуються автотранспортними потоками. При цьому, ротори турбулентності аерозолі формуються на “зрізах” швидкостей і

напрямків зустрічних автотранспортних потоків та на поверхнях рельєфу окремих об'єктів ландшафту резервно-технологічних смуг автомобільних доріг.

3. Ротори турбулентності аерозолів газо-пилових хмар викидів, які продукуються автотранспортними потоками, відрізняються каскадною фрактально-інваріантною організацією структури і мігрують (в складі повітряних ламінарно-турбулентних потоків) в горизонтальному і вертикальному напрямках до контакту з поверхнями рельєфу ландшафту природно-техногенної екосистеми або з інверсійними шарами атмосфери.

4. Обертовий рух ротору аерозолі зумовлює інтенсифікацію процесу інерційної сепарації мінеральної складової газо-пилової хмари викиду. Динаміка механічних режимів роторів турбулентності газо-пилових повітряних аерозолів в визначається геометричними параметрами та взаємним розташуванням поверхонь окремих об'єктів ландшафту резервно-технологічної смуги автомобільної дороги.

5. Внаслідок трансформації ландшафту і термодинамічних умов атмосфери, які зумовлені штучною деформацією рельєфу автодорожньою мережею і транспортно-технологічними особливостями функціонування автотранспортних потоків, порушується загальна фонові (в тому числі і температурна) стратифікація атмосфери, що призводить до переорієнтації природних ламінарно-турбулентних напрямків повітряних потоків. При цьому, виникають додаткові (наприклад "долинні") вітрові потоки, зони інтенсифікації турбулентності, спостерігається утворення нехарактерних інверсійних шарів атмосфери тощо.

6. Для забезпечення надійного депонування пилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками, та для забезпечення умов відновлення структури газового складу фонові атмосфери до параметрів властивостей "стандартної" атмосфери, ландшафтні параметри конструкції автодороги мають реалізовувати оптимальну стратифікацію граничних шарів атмосфери прилеглих до поверхонь рельєфу окремих ландшафтних об'єктів, в тому числі і штучно створюваних, в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг.

7. Процеси адгезії та депонування мінеральної складової аерозолі газо-пилової хмари викиду, яка продукується автотранспортним потоком, визначається шорсткістю поверхонь

не лише природних ландшафтних об'єктів, але і поверхонь штучно створюваних об'єктів конструкції поперечного профілю резервно-технологічної смуги автодороги, топологічна структура яких має бути фрактально узгодженою.

8. Основна особливість динаміки міграції та депонування забруднювачів, які продукуються автотранспортними потоками, в зимовий період полягає в інтенсифікації процесів атмосферного масопереносу в природно-техногенних геоекосистемах, що пов'язано з ритмікою циклічної зміни показника ажурності крон деревних і чагарникових насаджень та зміною шорсткості підстильних поверхонь ландшафту внаслідок формування снігового покриву.

IV. ЕКОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ АВТОТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

4.1. Функціональні ознаки автотранспортного потоку

Автотранспортним потоком є множина (С) автотранспортних засобів, які беруть участь у спільному русі вздовж деякої ділянки автомобільної дороги і характеризуються такими фізичними ознаками як габарит (Γ), динамічний габарит ($\Gamma Д$), інтервал руху (I), протилежно напрямлені підмножини (C_1 і C_2) транспортних засобів тощо [145]. Рух автотранспортного засобу в складі автотранспортних потоків значно відрізняється від руху відособленого транспортного засобу, що зумовлює зміну навантажувально-швидкісних режимів роботи двигунів, а отже і показників витрат палива та викидів шкідливих речовин [242]. Основними чинниками, які спричиняють вплив автотранспортних потоків на навколишнє середовище є: склад і структура автотранспортних засобів у потоці, швидкість, навантажувальний режим, інтенсивність і щільність руху, технічний стан і експлуатаційні властивості окремих фізичних одиниць потоку, хімічний склад пального.

Окрім суто технічних чинників автотранспортного потоку, визначальним чинником міграційних процесів забруднювачів в межах природно-техногенної геоекосистеми (смуги впливу автомобільної дороги) є характеристики автотранспортної мережі. До цих характеристик необхідно віднести: показник автотранспортної ємності території природно-техногенної геоекосистеми, ландшафтні особливості трасування та конструкційні параметри автомобільної дороги, її технічний стан (в тому числі за показником пошкодження дорожнього покриття) та експлуатаційні показники, відповідність щодо рівня інтенсивності автотранспортного потоку і питомого навантаження на дорожнє покриття, наявність газо-пилозахисної інфраструктури в межах резервно-технологічної смуги, локальна варіативність (деформація) усталеного функціонального стану автотранспортного потоку на ділянках автомобільної дороги з особливими умовами руху (перехрестя та вузли автотранспортної мережі, спуски-підйоми, серпантини, тунелі, мостові переходи, екодуки).

Розглянемо фрагмент автотранспортного потоку, як спрямовану сукупність (множину) автотранспортних засобів на

автодорозі (за віссю x - x), підмножини (C_1 і C_2) яких рухаються в протилежних напрямках (рис.4.1). При цьому вважаємо, що внесок підмножин C_1 і C_2 дорівнює кількості частки їх по довжині, які припадають на ділянку A_x - B_x автомобільної дороги. Позначимо цю кількість через $R(t, x_{A-B})$.

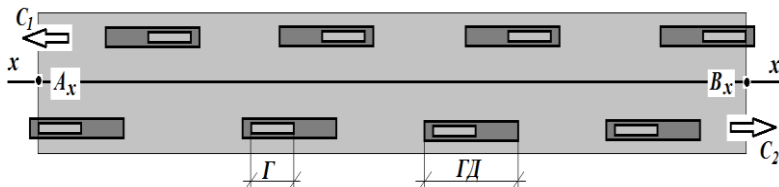


Рис.4.1. Фрагмент автотранспортного потоку, підмножини (C_1 і C_2) якого рухаються вздовж x - x

Оскільки кожний транспортний засіб з $R(t, x_{A-B})$ визначений множиною дійсних чисел на заданому інтервалі, то функція $R(t, x_{A-B})$ неперервна по t , є гладкою, а отже має кусочно-неперервні похідні першого і другого порядків. Таким чином $R(t, x_{A-B})$ є кусочно-лінійною по t (за умови усталеної швидкості автотранспортного потоку). В цьому випадку:

- інтенсивність автотранспортного потоку:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = q(t, x) \quad (4.1)$$

- щільність автотранспортного потоку:

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \rho(t, x) \quad (4.2)$$

Звідси швидкістю автотранспортного потоку є функція:

$$V(t, x) = \frac{q(t, x)}{\rho(t, x)} \quad (4.3)$$

Якщо швидкість V автотранспортного потоку є відомою функцією його щільності ρ , отримуємо:

$$V = f(\rho) \quad (4.4)$$

Будемо вважати вираз (4.4) функцією стану автотранспортного потоку. Тому:

$$q(t, x) = \rho(t, x) \cdot f[\rho(t, x)] \quad (4.5)$$

а також:

$$\frac{\partial R}{\partial t}(t, x) = \frac{\partial R}{\partial x}(t, x) \cdot f[\rho(t, x)] \quad (4.6)$$

Відповідно (4.6) необхідно розрізняти три основних режими руху автотранспортних засобів:

- вільний рух – характеризується малими інтенсивностями, відсутністю взаємних перешкод поміж окремими автотранспортними засобами і відповідною швидкістю V_c . Незначна щільність автотранспортних засобів зумовлює нещільну кореляцію поміж V_c та ρ ;
- колективний рух (колективний потік) – визначається зростанням щільності ρ автотранспортного потоку, колективна швидкість V_k автотранспортних засобів визначається проектною пропускною здатністю автодороги. Кореляційний зв'язок V_c та ρ є достатньо щільним;
- насичений (синхронізований) потік – характеризується суттєвим взаємовпливом окремих автотранспортних засобів, швидкість автотранспортного потоку V_n тісно корелює з інтенсивністю q та щільністю ρ . Характерною рисою синхронізованого автотранспортного потоку є суттєве варіювання значення середньої швидкості потоку. Визначального значення набуває технічний та експлуатаційний стани автомобільної дороги.

Для подальшого аналізу режимів колективного руху автотранспортних засобів узгоджуємо відповідність розрахункової інтенсивності q потоку з технічною класифікацією автомобільних доріг за ДБН В.2.3-4:2007. Представивши значення щільності ρ , інтенсивності q та характерної швидкості V сукупності автотранспортних засобів на фрагменті A_x-B_x автомобільної дороги (рис.4.1), відповідно ДБН В.2.3-4:2007 С.158, в основних одиницях Sl (метр, секунда), функція стану автотранспортного потоку (4.4) може бути представленою у матричній формі у вигляді таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Функціональні ознаки стану автотранспортних потоків

Категорія автомобільної дороги	Швидкість автотранспортного потоку, м/с	Інтенсивність потоку, 1/с	Щільність потоку, 1/м
1-а	41	> 0,17	> 0,005
1-б	38	> 0,17	> 0,004
2	33	0,17	0,005
3	27	0,07	0,003
4	25	0,03	0,001
5	25	0,003	0,0001

Якщо визначити категорію автомобільної дороги деяким бальним показником K , який набуває значень $K = 1a; 1б; 2; 3; 4; 5$ і враховуючи кусочно-лінійний характер функцій (4.3) і (4.4) за числовими значеннями матриці, які наведено в таблиці 4.1, може бути побудована поверхня відгуку в координатах $K \sim \rho \sim q$ (рис.4.2).

Графічний аналіз висхідного лівостороннього тренду значень q та ρ (рис.4.2) в напрямку зворотному зростанню координаті K чітко визначає координати характерної площини Φ , яка відокремлює режим вільного руху автотранспортних засобів від колективного та синхронізованого автотранспортних потоків. Координати цієї площини за значеннями q та ρ становлять:

$$\begin{cases} q = 0,035 [1/c] \\ \rho = 0,0021 [1/m] \end{cases} \quad (4.7)$$

Наведені в (4.7) значення інтенсивності q та щільності ρ автотранспортного потоку визначають мінімальну швидкість V автотранспортних засобів, за якої відбувається перехід від вільного руху до колективного та синхронізованого потоків, яка відповідно до (4.3) становитиме:

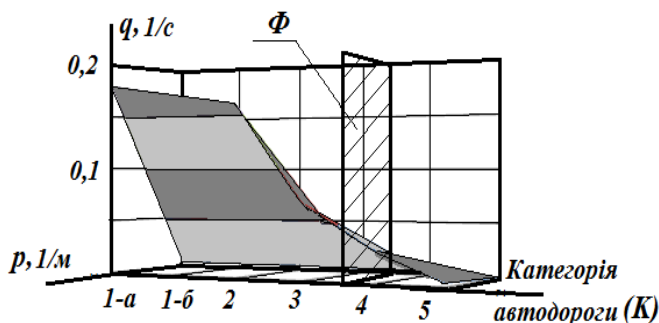


Рис.4.2. Поверхня відгуку функціональних ознак стану автотранспортних потоків в координатах: категорія автодороги (K) ~ щільність автотранспортного потоку (p) ~ інтенсивність автотранспортного потоку (q)

$$V = \frac{q}{p} = \frac{0,035}{0,002} = 17,5 \text{ [м/с]} \quad (4.8)$$

Мінімальні значення V , q та p , за яких характер руху автотранспортних засобів набуває ознак колективного руху з подальшою синхронізацією автотранспортного потоку, наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.
Мінімальні значення щільності p , інтенсивності q та швидкості V , за яких автотранспортний потік набуває характерних ознак

Інтенсивність автотранспортного потoku, авт./добу	Щільність автотранспортного потoku, авт./км	Швидкість автотранспортного потoku, км/год.
3024	2,1	63,0

Аналіз даних за показниками інтенсивності q , щільності p та швидкості V автотранспортних потоків, які наведено в таблиці 4.2, свідчить про те, що лише автомобільні дороги категорій 1-а, 1-б, 2 і 3 можуть бути віднесені, в строгому розумінні, до автодоріг з колективним синхронізованим автотранспортним потоком у

відповідності до ДБН В.2.3-4:2007 С.161 “Споруди транспорту. Автомобільні дороги”. Отримані результати щодо мінімальної межі характерних ознак автотранспортного потоку повністю збігаються з результатами розрахунків категорії небезпечності автомобільних доріг, як об’єктів господарської діяльності (див. таблиця 2.8) і відповідають вимогам галузевих будівельних норм України ГБН В.2.3-218-007:2012 “Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування”.

4.2. Еколого-технологічна оптимізація опорного каркасу автодорожньої мережі

Одним з найінформаційніших методів аналізу територіальних структур (в тому числі і комунікаційних структур) є аналіз опорного каркасу [253]. З точки зору системного аналізу територіальної комунікаційної структури, однією з визначальних ознак цієї структури є автодорожня мережа, як складова транспортно-комунікаційних транзитних “коридорів” обміну енергією і речовиною в системі, які визначають деяку природно-техногенну геоекосистему як єдине геодинамічне ціле. Загалом “транспортні функції” в природно-техногенних геоекосистемах виконують як природні об’єкти: долини річок, вододіли, інші елементи ландшафту, так і штучні споруди: автомобільні та залізничні шляхи сполучення, лінії електропередач, газопроводи та нафтопроводи, інші транспортні магістралі, які формують демографо-економічний каркас. Функціонування демографо-економічного каркасу неминуче призводить до негативної трансформації функціонування природного каркасу, в результаті чого порушується екологічний баланс всього природно-територіального комплексу. Отже, головною задачею еколого-технологічної оптимізації опорного каркасу автодорожньої мережі природно-техногенної геоекосистеми є забезпечення екологічної рівноваги (екологічної безпеки) природно-територіального комплексу [220].

Структуру опорного каркасу мережі транспортно-комунікаційних зв’язків території України наведено на рис.4.3 [238]. В даному випадку опорний каркас є гіперграфом $G := (V, E)$, для якого виконуються умови: V – множина вершин або вузлів, E – множина ребер. Геометричною реалізацією такого графа є плоска фігура, що складається з непорожньої скінченної множини V точок (вершин) і скінченної множини E неорієнтованих

(орієнтованих) відрізків ліній (ребер), які з'єднують деякі пари вершин V .

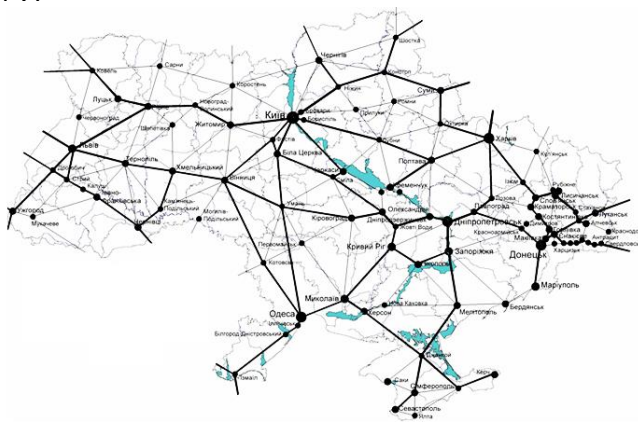


Рис.4.3. Граф транспортно-комунікаційного опорного каркасу природно-територіального комплексу території України

Еколого-технологічну оптимізацію опорного каркасу автодорожньої мережі (як приклад) виконуємо для Подільського регіону Хмельницької області, як для однієї з найбільш типових областей України за протяжністю автомобільних доріг .

Остовним підграфом автодорожньої мережі Хмельницької області початкового графу, який наведено на рис.4.3, є суграф, який містить визначену множину вершин і всі ребра інцидентні множині вихідного графу. Виокремлений підграф (суграф – в подальшому граф) автодорожньої мережі Хмельницької області з ребрами, які враховують автомобільні дороги категорій 2 і 3, наведено на рис.4.4 і може бути означений як:

$$\begin{cases} V \ni \{A, B, C, D, E, F, G, K, R\} \\ E \ni \{AB, AF, AG, AD, AC, BE, CR, CK, CF, BF, BG\} \end{cases} \quad (4.9)$$

В межах графа функціонування розглядуваної природно-техногенної геоекосистеми чітко виокремлюється не повною мірою регулярний граф з розімкненим в CD та DG циклом, який в загальному вигляді може бути описаний як (рис.4.5):

$$\begin{cases} V \ni \{A, B, C, D, F, G\} \\ E \ni \{AB, AF, AC, AD, AG, CF, BF, BG\} \end{cases} \quad (4.10)$$

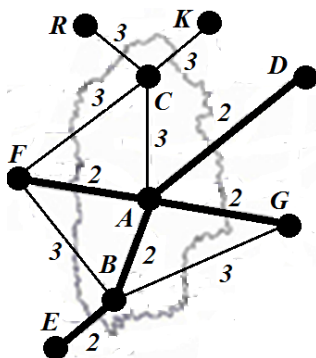


Рис.4.4. Граф автодорожньої мережі Хмельницької області з ребрами на яких визначено категорії автомобільних доріг

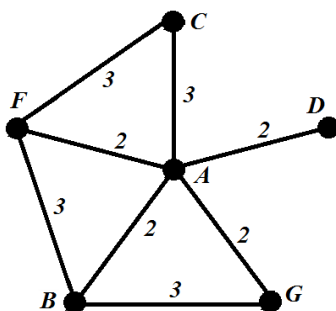


Рис.4.5. Суграф автодорожньої мережі Хмельницької області

На підставі правила доповнення графів, яке полягає в тому, що доповнення реалізується над тією самою множиною вершин, що і в початковому графі, а вершини з'єднуються ребром тоді і лише тоді, коли в початковому графі цього ребра немає, початковий суграф (рис.4.5) доповнюється ребром суміжного графу (рис.4.6).

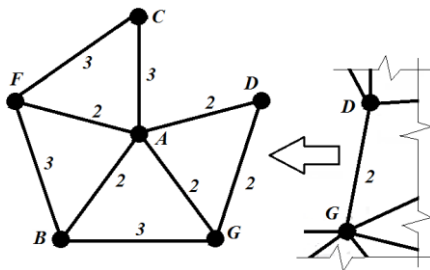


Рис.4.6. Доповнений суграф автодорожньої мережі Хмельницької області

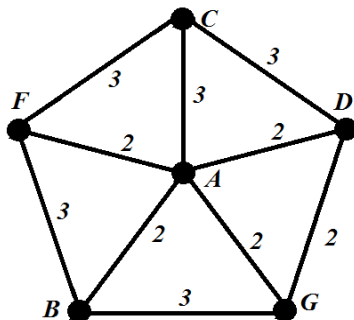
Суграф, наведений на рис.4.6, описується як:

$$\begin{cases} V \ni \{A, B, C, D, F, G\} \\ E \ni \{AB, AF, AC, AD, AG, CF, BF, BG, DG\} \end{cases} \quad (4.11)$$

Для отримання повного регулярного суграфу автодорожньої мережі Подільського регіону Хмельницької області необхідним є доповнення суграфу, який наведено на рис.4.6 ребром CD , який в даному випадку має сполучити вершини D (м. Житомир) та C (м. Шепетівка) відповідно до рис.4.3. Для реалізації такого варіанту може бути запропоновано транспортно-технологічну раціоналізацію маршруту: Житомир–Дениші–Дубрівка–Шепетівка. При цьому, ділянки зазначеного маршруту Житомир–Дениші протяжністю 21 км є частиною автомобільної дороги Н03 категорії 2 та Дубрівка–Шепетівка протяжністю 38 км – частиною автомобільної дороги Р49 категорії 3, а ділянка Дениші–Дубрівка протяжністю 77 км є автодорогою районного значення Т0612, Т0618 категорії 4. За умови проведення транспортно-технологічної оптимізації ділянки маршруту Дениші–Дубрівка, яка передбачатиме реконструкцію автомобільної дороги Т0612, Т0618 до категорії 3, довжина проєктованого ребра (рис.4.6) становитиме 136 км, що на 41 % менше за використовуваний в даний час маршрут Житомир–Бердичів–Гриців–Шепетівка протяжністю 229 км. Тим самим еколого-транспортна раціоналізація автотранспортної мережі Подільського регіону Хмельницької області, яка передбачає організацію мережі автомобільних доріг у відповідності до 5-регулярного суграфа (рис.4.7):

$$\begin{cases} V \ni \{A, B, C, D, F, G\} \\ E \ni \{AB, AF, AC, AD, AG, CF, BF, BG, DG, CD\} \end{cases} \quad (4.12)$$

дозволяє підвищити загальний рівень автотранспортної ємності регіону на 15,2 % (таблиця 4.3).



*Рис.4.7. Регулярний суграф автодорожньої мережі
Хмельницької області*

Наведений на рис.4.7 суграф автодорожньої мережі Подільського регіону Хмельницької області є частковим підграфом гіперграфа транспортно-комунікаційного опорного каркасу природно-територіального комплексу території України і може бути визначений як повна регулярна планарна 4-гратка (кубічний граф), що є графом мінімальної ваги за показником суми зваженостей ребер. Тому, організація автотранспортної мережі будь-якої природно-техногенної геоекосистеми за принципом наведеного суграфа (рис.4.7) забезпечує мінімізацію витрат енергії автотранспортних потоків, які рухаються поміж множиною вершин V вздовж множини ребер E . Тим самим досягається мінімізація сумарних витрат палива (енергетична насиченість) автотранспортним комплексом і, як наслідок мінімізуються викиди шкідливих речовин в межах розглядуваної природно-техногенної геоекосистеми.

Інші варіанти організації транспортно-комунікаційного каркасу автотранспортних мереж в межах визначеної природно-техногенної геоекосистеми за принципом суграфів у вигляді повної регулярної планарної n -гратки наведено на рис.4.8.

Таблиця 4.3

Показники автотранспортної ємності
Подільського регіону Хмельницької області

Позначення ребра суграфа	Довжина ребра, км		Узагальнена інтенсивність автотранспортних потоків $\times 10^{-6}$	
	Контрольний варіант	Пропонований варіант	Контрольний варіант	Пропонований варіант
AB	97	97	1,4	1,4
AF	112	112	1,6	1,6
AC	101	101	0,7	0,7
AD	184	184	2,7	2,7
AG	120	120	1,8	1,8
BF	148	148	0,9	0,9
FC	170	170	1,2	1,2
CD	229	136	3,5	0,9
DG	128	128	1,8	1,8
GB	180	180	1,2	1,2
Σ	1469	1376	16,8	14,2
Підвищення загального рівня автотранспортної ємності природно-техногенної геоекосистеми, %				15,2

Наступний етап еколого-технологічної оптимізації опорного каркасу автодорожньої мережі полягає у раціоналізації “пропускної здатності” ребер графу, яка має передбачати синхронізацію колективного руху автотранспортних засобів (п.4.1) в складі автотранспортних потоків за показником їх усередненої швидкості. Для цього представимо граф наведений на рис.4.4 та рис.4.5 у вигляді фізично реалізованої моделі графу, яка представляє собою горизонтальну плоску стержньову ферму з шарнірним з’єднанням ребер у вузлах графа (рис.4.9).

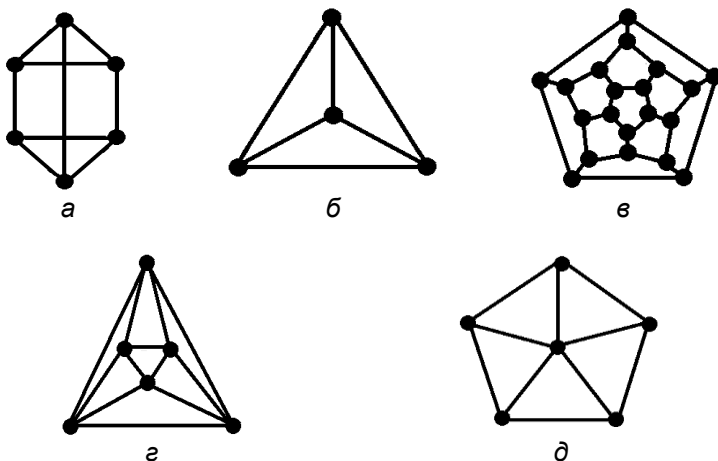


Рис.4.8. Варіанти організації транспортно-комунікаційного каркасу автотранспортних мереж у вигляді повної регулярної планарної n -ґратки

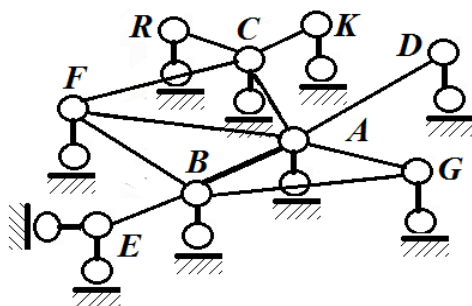


Рис.4.9. Модель фізичної реалізації суґрафу автотранспортної мережі

Розглянемо ребро AB графа, який наведено на рис.4.9, як окрему балку, що навантажується на суцільну пружну основу, реакція якої в кожній точці основи може бути з деяким наближенням обране як пропорційне пружному прогину балки [278]. При цьому, зовнішнє розподілене навантаження на зазначену балку імітується значенням питомої інтенсивності q автотранспортного потоку, який рухається вздовж окремих ділянок автомобільної дороги, яка змодельована ребром AB розглядуваного суґрафа (рис.4.10-а).

Зазначене твердження відповідає фізичній моделі, в якій пружна основа може бути змодельованою безкінечною кількістю пружин, які не пов'язані поміж собою і характеризуються абсолютною пружністю (рис.4.10-б).

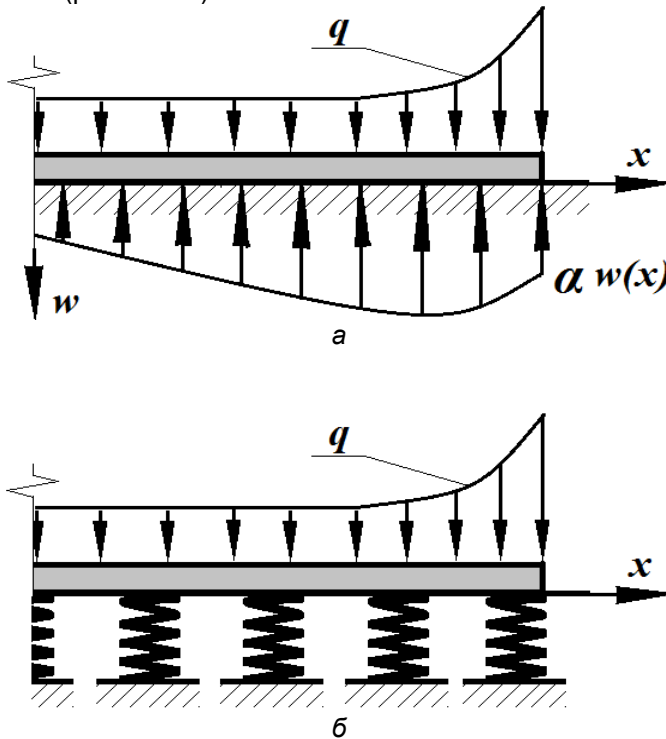


Рис.4.10. Схема фрагмента ребра графа автодорожньої мережі з інтенсивністю q автотранспортного потоку (а) та його відповідна фізична модель (б)

Розглянемо деякий відрізок ребра графа, який є суміжним з його вершиною (рис.4.11). В загальному випадку універсальними рівняннями, які отримано методом початкових параметрів для ділянки балки на пружній основі, будуть:

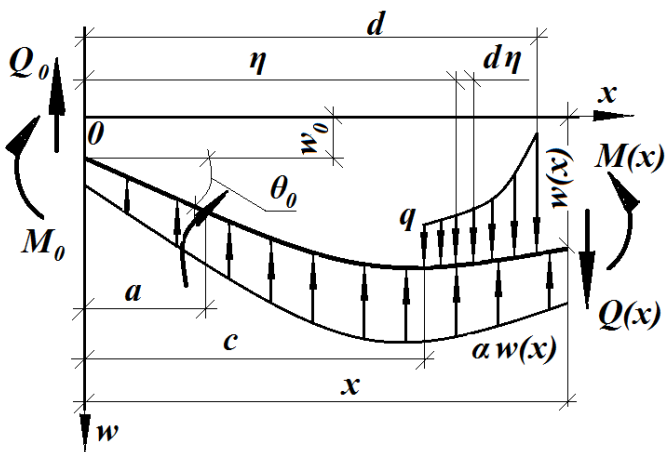


Рис. 4.11. Розрахункова схема ребра графа автодорожньої мережі

$$\begin{aligned} \Theta(x) = & \Theta_0 Y_1 \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{1}{EJ} \left\{ M_0 L Y_2 \left(\frac{x}{L} \right) + Q_0 L^2 Y_3 \left(\frac{x}{L} \right) + \right. \\ & + \alpha L^3 w_0 Y_4 \left(\frac{x}{L} \right) + L \sum M_i Y_2 \left(\frac{x - a_i}{L} \right) - L^2 \sum P_i Y_3 \left(\frac{x - b_i}{L} \right) - \\ & \left. - L^3 \sum q_i \left[Y_4 \left(\frac{x - c_i}{L} \right) - Y_4 \left(\frac{x - d_i}{L} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} M(x) = & M_0 Y_1 \left(\frac{x}{L} \right) + Q_0 L Y_2 \left(\frac{x}{L} \right) + \alpha L^2 w_0 Y_3 \left(\frac{x}{L} \right) + \\ & + \alpha L^3 \Theta_0 Y_4 \left(\frac{x}{L} \right) + \sum M_i Y_1 - L \sum P_i Y_2 \left(\frac{x - b_i}{L} \right) + \\ & L^2 \sum q_i \left[Y_3 \left(\frac{x - c_i}{L} \right) - Y_3 \left(\frac{x - d_i}{L} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned}
Q(x) = & Q_0 Y_1 \left(\frac{x}{L} \right) + \alpha L w_0 Y_2 \left(\frac{x}{L} \right) + \alpha L^2 \Theta_0 Y_3 \left(\frac{x}{L} \right) - \\
& - \frac{4M_0}{L} Y_4 \left(\frac{x}{L} \right) - \frac{4}{L} \sum M_i Y_4 \left(\frac{x - a_i}{L} \right) - \sum P_i Y_1 \left(\frac{x - b_i}{L} \right) + \\
& + L \sum q_i \left[Y_2 \left(\frac{x - c_i}{L} \right) - Y_2 \left(\frac{x - d_i}{L} \right) \right]
\end{aligned} \quad (4.15)$$

де q – зовнішнє розподілене (розосереджене) навантаження, яке імітує (симулює) інтенсивність автотранспортного потоку;

P – зовнішнє зосереджене навантаження, яке в даному випадку (рис.4.9) $P = 0$;

$Q(x)$, $M(x)$ – реакція системи на зовнішні навантаження q у вигляді внутрішніх сил і моментів;

Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 – функції Крилова, які в даному випадку характеризують деформаційні властивості системи до зовнішнього навантаження q в безрозмірних геометричних одиницях довжини

розглядуваної ділянки ребра графу, як x/L ;

Θ – деформаційний критерій у вигляді кута повороту віртуальної пружної лінії ребра графа;

З точки зору подальшого аналізу “деформаційного” відгуку ділянки автомобільної дороги автотранспортної системи на зовнішній вплив у вигляді автотранспортного потоку з інтенсивністю q , найбільш інформативним є рівняння (4.13), яке і визначає “деформаційну” міру Θ залежно від показника q . Визначаємо, що в крайньому лівому перерізі ребра графа відповідно до схеми фрагмента автодорожньої мережі, яку наведено на рис.4.10, інтенсивність $q = Q$ автотранспортного потоку є деякою усталеною величиною і відповідно вважаємо, що лівий торець розрахункової схеми (рис.4.11) виконано у вигляді абсолютно жорсткої заготовки. В даному випадку в рівнянні (4.13) $\Theta_0 = 0$; $M_0 L Y_2 \left(\frac{x}{L} \right) = m$; $Q_0 L^2 Y_3 \left(\frac{x}{L} \right) = n$; $w_0 = 0$ і за відсутності зосереджених P_i та M_i ($P_i = 0$; $M_i = 0$), з урахуванням зазначеного, отримуємо:

$$\Theta(x) = \frac{1}{EJ} \left\{ am + bn - L^3 \sum q_i \left[Y_4 \left(\frac{x - c_i}{L} \right) - Y_4 \left(\frac{x - d_i}{L} \right) \right] \right\} \quad (4.16)$$

Якщо для аналізованого ребра AB графу (рис.4.10) характеристика пропускної здатності автомобільної дороги (категорія автодороги) є величиною сталою, тобто $1/EJ = const = Z$, то отримуємо:

$$\Theta(x) = Z \left\{ K - L^3 q_i \frac{\partial x}{L} Y_4 \right\} = Q - q_i L^2 \partial x Y_4 \quad (4.17)$$

де Q – інтенсивність автотранспортного потоку відповідна категорії автомобільної дороги вздовж ребра AB .

Функція Y_4 за А.М. Криловим визначається як [106]:

$$\begin{aligned} Y_4(\zeta) &= \frac{1}{4} (ch\zeta \cdot \sin\zeta - ch\zeta \cdot \sin\zeta) = \\ &= \frac{1}{8} [(e^\zeta + e^{-\zeta})\sin\zeta - (e^\zeta - e^{-\zeta})\cos\zeta] \end{aligned} \quad (4.18)$$

де за означенням ζ :

$$\zeta = \frac{x}{L} = 1 \quad (4.19)$$

Відповідно до таблиць для $\zeta = 1$ $Y_4 = 0,1659$ і відповідно до (4.17) отримуємо:

$$\Theta(x) = Q - 0,17 \cdot q_i L^2 \partial x \quad (4.20)$$

Отже, підтримання транспортно-технологічної рівноваги шляхом синхронізації колективного руху автотранспортних потоків за умови збільшенні їх інтенсивності Δq при наближенні до вузлів графу (рис.4.9) передбачає виконання умови:

$$\Delta Q = 0,17 \cdot \Delta q \cdot L^2 \quad (4.21)$$

Для конкретизації (4.21) визначимо значення “пропускної здатності” ребра AB графу (рис.4.4) автомобільної дороги Н03 категорії 2 на ділянці яка межує з вузлом А (м. Хмельницький),

модель фізичної реалізації якого наведено на рис.4.9. Автомобільна дорога Н03 характеризується вцілому інтенсивністю автотранспортного потоку $q \leq 0,17 \left[\frac{1}{c} \right]$ і його щільністю $\rho \leq 0,005 \left[\frac{1}{m} \right]$. При наближенні до вузла А графу (рис.4.12) з відстані ~ 35 км (с.м.т. Ярмолинці) інтенсивність автотранспортного потоку лінійно зростає до $q = 0,5 \left[\frac{1}{c} \right]$, а його щільність до $\rho = 0,02 \left[\frac{1}{m} \right]$. Синхронізація колективного руху автотранспортних засобів в цьому випадку може бути забезпечена лише за рахунок будівництва додаткових смуг руху (збільшення “пропускної здатності” ребра АВ графу при наближенні до вузла А). Відповідно до (4.21) можна встановити ландшафтно-геометричні параметри розвитку (збільшення смуг руху) ділянки Хмельницький – Кам’янець-Подільський автомобільної дороги Н03 категорії 2, яка є прилеглою до м. Хмельницький.

Пропонований метод аналітичної оптимізації інтенсивності автотранспортних потоків за допомогою фізичної симуляції транспортно-технологічного процесу, дозволяє оптимізувати “пропускну здатність” конкретної ділянки автомобільної дороги, забезпечити синхронізацію швидкості колективного руху автотранспортних засобів в межах $V = 30-35$ м/с та показник щільності потоку однією смугою, який не перевищує $\rho = 0,0025-0,003$ 1/м (рис.4.12).

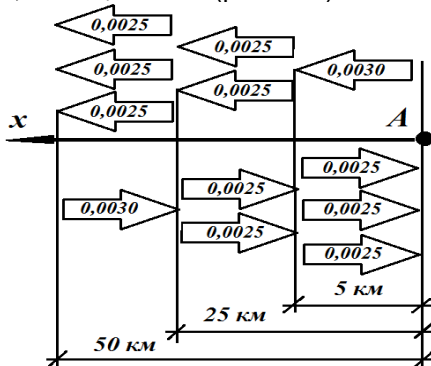


Рис.4.12. Синхронізація автотранспортних потоків за показником щільності потоку в кожній смузі руху автомобільної дороги

Синхронізація колективного руху автотранспортних засобів у потоках дозволяє стабілізувати режими роботи двигунів, що зумовлює зменшення обсягів газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками.

4.3. Екологічна оптимізація динаміки автотранспортних потоків на ділянках автомобільних доріг з особливими умовами руху

До специфічних ділянок автомобільних доріг з особливими умовами руху мають бути віднесені всі ділянки, на яких відбувається розсинхронізація колективного руху автотранспортних засобів в складі транспортного потоку. Зокрема, це в першу чергу вузли автотранспортної мережі, де відбувається перехрещення декількох автотранспортних потоків, різного роду “серпантини” і звивисті ділянки автодоріг зумовлені особливостями мезорельєфу, що визначає рух автотранспортних потоків у так званих “шпильках”, а також, певною мірою лісові ділянки автомобільних доріг, де обмежено візуальне сприйняття дорожніх умов. Розсинхронізація колективного руху автотранспортних засобів в складі потоків на таких ділянках автомобільних доріг призводить не лише до порушення усталеної роботи двигунів, що збільшує обсяги викидів відпрацьованих газів, але і до інтенсифікації процесів руйнування конструкційних матеріалів автомобільних доріг, що зумовлює підвищення рівнів пилового забруднення придорожніх ландшафтів природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею.

4.3.1. Синхронізація колективного руху автотранспортних потоків у вузлах автотранспортної мережі

Характер колективного руху автотранспортних засобів у потоці загалом визначається його (поток) швидкістю $V(t, x)$, яка відповідно (4.3) є функцією інтенсивності $q(t, x)$ і щільності $\rho(t, x)$ автотранспортного потоку. В умовах наближення до вузла автотранспортної мережі зростає ймовірність виконання маневрів окремими автотранспортними засобами, які мають бути розцінені як випадкові події. Відповідно відбувається розсинхронізація колективного руху автотранспортних засобів у потоці, а отже зростає значення дисперсії σ_V^2 швидкості $V(t, x)$ потоку.

Найпомітнішою є розсинхронізація колективного руху автотransпортних засобів при перехрещенні двох (або декількох) транспортних потоків, які є сумірними за показниками їх інтенсивності $q(t, x)$ та щільності $\rho(t, x)$. В цьому випадку необхідно розрізняти [239]:

- $V(t, x)$ – синхронізовану просторову швидкість потоку, тобто усереднену швидкість автотransпортних засобів, які перебувають на заданій ділянці автомобільної дороги у визначений момент часу t ;
- V_D – середню миттєву швидкість автотransпортного засобу, тобто усереднену швидкість n автотransпортних засобів, які переміщуються через визначений поперечний переріз автомобільної дороги (в даному випадку через точку перехрещення потоків) за визначений проміжок часу t .

При цьому:

$$V(t, x) = V_D \left[1 + \left(\frac{\sigma_D^2}{V_D} \right) \right] \quad (4.13)$$

З (4.13) походить, що для забезпечення синхронізації колективного руху автотransпортних засобів у складі перехрещуваних потоків має бути забезпечено умову:

$$V(t, x) = V_D \quad (4.14)$$

що досягається при дотриманні:

$$\lim_{V_D \rightarrow V(t, x)} \sigma^2 = 0 \quad (4.15)$$

Таким чином, синхронізація колективного руху автотransпортних засобів у вузлах автодорожньої мережі забезпечується дотриманням синхронізованої просторової швидкості кожного з потоків, які мають рухатись не залежно один від одного з послідовною дотичною перебудовою траєкторій руху. Розглянемо перехрещення траєкторій mm' та nn' руху автотransпортних потоків під довільним кутом α в деякій прямокутній системі координат xOy (рис.4.13).

Якщо визначити, що прямі mm' та nn' траєкторій руху автотransпортних потоків є асимптотами кривих другого порядку

на координатній площині xOy , то відповідно отримуємо сімейство спряжених гіпербол (рис.4.14), які в загальному випадку описуються рівнянням:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4.16)$$

де a та b – дійсна та уявна напівосі гіперболи (рис.4.15).

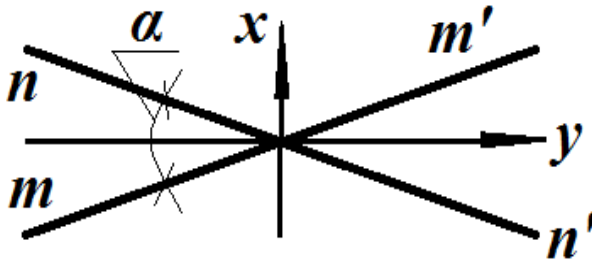


Рис.4.13. Траєкторії mm' та nn' руху перехрещуваних автотранспортних потоків на координатній площині xOy

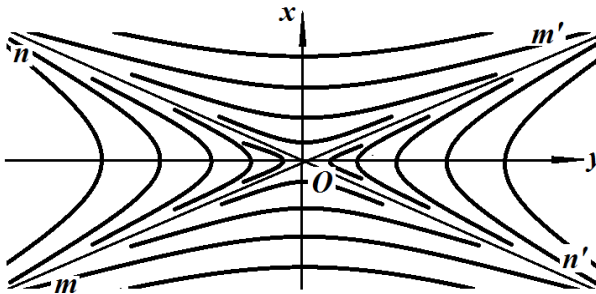


Рис.4.14. Сімейство спряжених гіпербол з асимптотами mm' та nn'

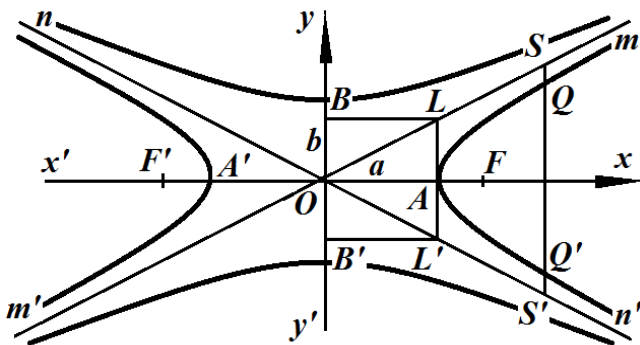


Рис.4.15 Геометричні ознаки спряжених гіпербол

Основними характеристиками гіперболи є відрізок FF' , який визначає її фокусну відстань c (точки F та F' – фокуси параболи), а саме $FF'=2c$; дійсна вісь гіперболи $2a$, яка визначена точками A та A' , які є вершинами обох гілок гіперболи, тобто $AA'=2a$; уявна вісь гіперболи $BB'=2b$, які пов'язані відповідно (4.16) рівнянням:

$$b^2 = c^2 - a^2 \quad (4.17)$$

При цьому завжди виконується $c > a$, а гілки гіперболи є симетричними відносно точки O , яка визначає центр гіперболи. Траєкторії напрямків руху автотранспортних потоків mm' та nn' є асимптотами гіперболи, проходять через центр O гіперболи, описуються рівняннями $y=k \cdot x$, при чому $|k| \geq b/a$, а отже рівняннями асимптот гіперболи є $y = \frac{b}{a}x$ та $y = -\frac{b}{a}x$. Отже, якщо деяку пряму SS' , яка є паралельною до координатної осі yy' , необмежено віддаляти від центра O гіперболи (вправо або вліво), то відрізки QS та $Q'S'$ поміж гілками гіперболи і траєкторіями mm' та nn' руху автотранспортних потоків будуть необмежено зменшуватись (точки Q та Q' належать прямій SS').

На підставі вищевикладених ознак гіперболи, запропоновано варіант (рис.4.16) синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у вузлі перехрещення для рівнозначних за інтенсивністю q транспортних потоків (автомобільні дороги категорії 2).

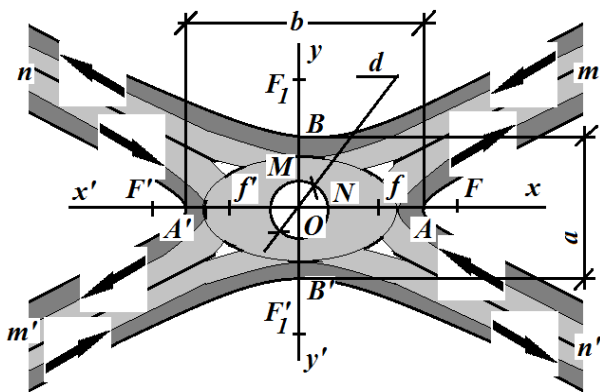


Рис.4.16. Перехрещення автотранспортних потоків у вузлах автодорожньої мережі

Форма внутрішньої зони вузла перехрещення автотранспортних потоків визначається еліпсом з фокусами, які розташовано в точках f та f' . Контур (повнота) еліпсу залежить від кута α і у випадку $\alpha = \frac{\pi}{2}$ перетворюється на коло. Для забезпечення максимально можливої синхронізації колективного руху автотранспортних засобів з інтенсивністю q у вузлі автодорожньої мережі визначальними є розміри дійсної $2a$ та уявної $2b$ осей спряжених гіпербол, тобто розміри відрізків NA та MB . Розміри NA та MB для автомобільних доріг категорій 1-а, 1-б, 2 і 3 визначається як:

$$NA(MB) = k \cdot s \quad (4.18)$$

де k – кількість смуг руху;
 s – ширина смуги руху, м.

Розміри проїжджої частини (NA та MB) для автомобільних доріг відповідних категорій і наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4.

Мінімально допустима ширина проїжджої частини
у вузлах автомобільної мережі
для автотранспортних потоків визначеної інтенсивності q , м

Категорія автодороги (ДБН В.2.3-4:2007)	1а, 1б	2	3
Мінімально допустима ширина проїжджої частини у вузлах перехрещення автотранспортних потоків, м	11,3 (7,5)	11,3 (7,5)	10,5 (7,0)
<i>В дужках наведено значення ширини проїжджої частини в напрямку, який орієнтовано вздовж меншої з осей спряжених гіпербол</i>			

На підставі вищевикладених досліджень запропоновано принципові схеми руху автотранспортних потоків у вузлах автотранспортної мережі з варіантами організації напрямків руху автотранспортних засобів (рис.4.17).

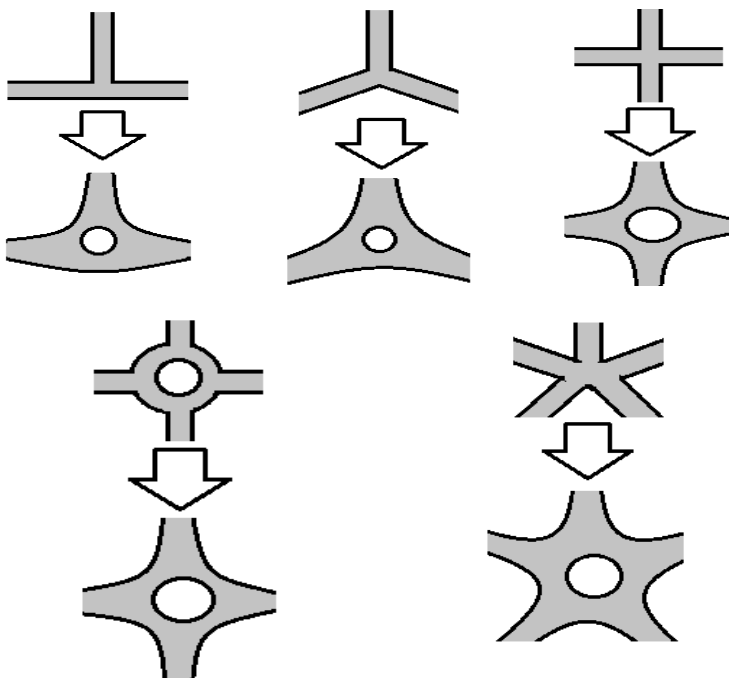
Пропонована оптимізація конструкційних параметрів автодорожньої мережі у вузлах перехрещення автотранспортних потоків передбачає можливість синхронізації колективного руху автотранспортних засобів у складі транспортних потоків, що забезпечує стабілізацію режимів роботи двигунів цих засобів, а отже, як наслідок, зменшує обсяги газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками.

4.3.2. Синхронізація колективного руху автотранспортних потоків на ділянках серпантину (у шпильках) автомобільних доріг

Загалом ділянки серпантину застосовують при трасуванні автомобільних доріг в умовах складного рельєфу природно-техногенних геоекосистем для дотримання оптимальних ухилів поздовжнього профілю автодороги. Розрізняють два види серпантинів:

- серпантини I роду – у яких допоміжні криві траси автомобільної дороги розташовано опуклостями в різні боки.

- Такі серпантини можуть бути як симетричними, так і асиметричними;
- серпантини II роду – у яких допоміжні криві розташовані по один бік траси автомобільної дороги. Такі серпантини можуть бути повними, коли центр основної кривої зміщений відносно вершини кута повороту і напівсерпантинами, для яких центр основної кривої розташовано на лінії, яка є перпендикулярною до однієї з сторін кута повороту автомобільної траси.



*Рис.4.17.Варіанти транспортно-екологічної оптимізації
автодорожньої мережі у вузлах перехрещення
автотранспортних потоків*

Як приклад серпантину, може бути наведено ділянку автомобільної дороги Н-03 поблизу населеного пункту с. Гуменці (рис.4.18).



Рис.4.18. Ділянка серпантину на автомобільній дорозі Н-03 (drive2.com)

Ділянки автомобільних доріг з серпантиним обох типів з достатньою точністю аналітично описуються раціональними функціями n -го ступеня:

$$y = a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x + a_0, \quad a_n \neq 0 \quad (4.19)$$

де $n \geq 0$ – ціле.

Графіки функцій (4.19) – це криві без особливих точок та без асимптот, які мають не більше за n точок перехрещення з віссю x , не більше як $n - 1$ екстремумів та не більше як $n - 2$ точок перегину (рис.4.19). При цьому, у випадку декількох екстремумів максимуми та мінімуми є почерговими.

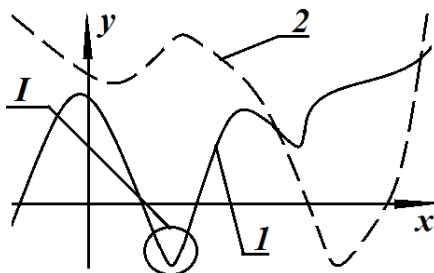


Рис.4.19. Раціональні функції n -го порядку:
1 – n парне, 2 – n непарне, I – екстремум (шпилька серпантину)

Основним чинником розсинхронізації колективного руху автотранспортних засобів в складі транспортного потоку є необхідність їх складного маневрування з малими неусталеними швидкостями в зонах, так званих, “шпильок” серпантину (наприклад, зона / рис.4.22), які є точками перегину траси автомобільної дороги. Поблизу точки перегину траси автомобільної дороги форми трасування автодороги у вигляді параболи, гіперболи, еліпса з ексцентриситетом ~ 1 відповідно (4.30) практично не відрізняються (рис.4.20).

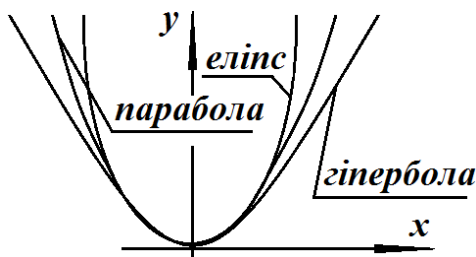


Рис.4.20. Трасування автомобільної дороги у “шпильці” у вигляді гіперболи, параболи або еліпсу з ексцентриситетом кривих ~ 1

Маневрування транспортного засобу у “шпильках” серпантину ускладнюється умовами обмеження сприйняття візуальної інформації, що зумовлено наявністю природних або штучних об’єктів ландшафту (наприклад аверсних поверхонь газо-пилрозахисних лісосмуг), які розташовано у створах “шпильок”. [38, 39, 40].

4.4. Автодорожня мережа, як термодинамічна система

З точки зору системного термодинамічного аналізу динаміки процесів енерго-масопереносу, система мережі автомобільних доріг є відкритою термодинамічною системою, для якої відбувається обмін енергією і речовиною з навколишнім середовищем, а отже закон не спадання ентропії S (другий закон термодинаміки) є несправедливим, як для системи, що перебуває у стані далекому від стану макроскопічної рівноваги. Надходження енергії до автодорожньої мережі у вигляді хімічної

енергії палива автотранспортних засобів і зумовлює, в першу чергу, синергетичні процеси організації автотранспортних потоків.

Макроскопічний стан термодинамічної системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” в певний момент часу визначається n параметрами стану залежності поміж $n+1$ термодинамічних параметрів залежністю [18, 141, 156 241]:

$$f(Z_1, Z_2, \dots, P_i, E_i, \dots, Z_n, Z_{n+1}) = 0 \quad (4.20)$$

де Z – узагальнені координати або потенціали термодинамічної системи;

P – потенціали системи, які є однозначними функціями координат E стану системи:

$$P_i = \varphi'(E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (4.21)$$

і навпаки, E – координати стану системи однозначно визначаються через їх потенціали:

$$E_i = \varphi''(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (4.22)$$

В рівнянні (4.20) величини Z можуть бути як координатами, так і потенціалами термодинамічної системи, але як мінімум одна з пар Z , а саме P_i, E_i має бути суміщеною. Рівняння (4.20), (4.21), (4.22) визначають, що різниця потенціалів P по обидва боки контрольної поверхні системи призводять до зміни координат E стану системи і тому, по суті є рушійними силами динамічних змін стану системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”. При цьому під категорією “контрольна поверхня системи” розуміємо умовну граничну поверхню на якій відбувається зміна величини потенціалів P , які мігрують в систему ззовні і в зворотному напрямку з системи в навколишнє середовище.

Зміна внутрішньої енергії системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”, яка відбувається з одного боку в результаті хімічних реакцій спалювання автотранспортними засобами палива, що призводить до виконання механічної роботи руху автотранспортних потоків, а з іншого – зумовлена процесами енерго-масопереносу через контрольну поверхню за межі розглядуваної системи (за межі смуги відведення автомобільної дороги), призводить до зміни потенціалів P по обидва боки

контрольної поверхні системи. Якщо сукупність координат стану системи E виразити через певний узагальнений заряд U як:

$$U = \varphi'''(E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (4.23)$$

то значення U є по-суті внутрішньою енергією системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”.

В результаті переносу зарядів через контрольну поверхню системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” відбувається зміна внутрішньої енергії системи, яка вимірюється добутком різниці потенціалів P на величину перенесеного заряду. Цей добуток є узагальненою роботою функціонування системи. Елементарна кількість роботи dA буде:

$$dA = P \cdot dE \quad (4.24)$$

де P – різниця потенціалів;

dE – перенесений заряд.

В залежності від знаку P та dE визначається і знак dA .

Робота не є властивістю системи, а характеризує лише процес переносу заряду через контрольну поверхню системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”. Як тільки припиняється процес переносу заряду, припиняється і виконання роботи. Тому, при застосуванні позначення dA , воно розглядається не як диференціал A , не як приріст A , а лише як деяку елементарну кількість виконуваної роботи.

Диференціальне рівняння стану системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” в нашому випадку (dU – приріст внутрішньої енергії системи) буде:

$$dU = P \cdot dE \quad (4.25)$$

При цьому швидкість V_{E_i} зміни координати стану (узагальненого заряду) системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” – це потік цієї координати (заряду). Потік заряду і різниця потенціалів, яка викликає цей потік є спряженими величинами. За Л. Онзагером – потік є похідною параметру стану системи (узагальненого заряду):

$$V_{E_i} = \dot{E} \quad (4.26)$$

При цьому, система яка перебуває в стані динамічної рівноваги з навколишнім середовищем може розглядатись як ізольована внаслідок усталеності ΔP , що підтримує стабільність (незмінюваність) координат E стану системи, тобто $E_i = const$. З точки зору захисту природно-техногенної геоекосистеми від впливу автодорожньої мережі необхідно мінімізувати перенос зарядів dE_i , які визначають структуру та обсяги шкідливих викидів, за межі контрольної поверхні системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” (в даному випадку – за межі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги). Разом із цим, необхідно враховувати, що до системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” безперервно надходить із зовнішнього середовища деяка маса речовини у вигляді маси палива, яке споживається автотранспортним потоком і перетворюється в енергію з приростом dU . Безперервний відтік зарядів dU_i в навколишнє середовище призводить до невинного зростання ентропії S природно-техногенної геоекосистеми вцілому. Таким чином, виходячи з вище викладеного походить, що застосування будь-яких систем інженерного захисту автодорожньої мережі в жодному разі не дозволяють ізолювати (відокремити) підсистему “автодорожня мережа – автотранспортний потік” від природно-техногенної геоекосистеми.

Очевидно, що у випадку, коли на підставі рівняння (4.6) на певній визначеній ділянці автомобільної дороги відбувається синхронізація колективного руху автотранспортних засобів, в системі “автодорожня мережа – автотранспортний потік” відбувається процес самоорганізації, який виявляється у зрівноваженості характеристики інтенсивності q автотранспортного потоку. В цьому випадку маємо розглядати координату стану системи $E_{палива}$ як таку, що є заданою частиною розглядуваної системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”. Тобто, приріст $dU_{палива}$ з зовнішнього середовища до системи відсутній ($E_{палива}$ є ознакою системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”). Це твердження базується на висновку Г. Хакена про те, що “довготривалі системи підпорядковують собі системи з коротшим періодом існування” [189]. Отже, система “автодорожня мережа – автотранспортний потік” має розглядатися як така, для якої обмін зарядами dU_i з навколишнім середовищем через контрольну поверхню відбувається виключно через процеси масообміну (міграції) викидів, які продукуються автотранспортним потоком.

Таким чином, максимально можливий захист природно-техногенної системи від газо-пилових викидів, які продукуються автотранспортним потоком, має передбачати наявність такої контрольної поверхні системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”, яка б задовольняла умові мінімізації потоку dU_i за межі резервно-технологічної смуги автомобільної дороги. При цьому, як оптимальне рішення щодо конструкції такої контрольної поверхні, має розглядатись варіант в якому було б максимально використано природні ландшафтні об’єкти природно-територіального комплексу (особливості рельєфу території смуги впливу автодороги, наявність лісових масивів, напрям водотоків та контури берегів поверхневих водних об’єктів тощо).

Найхарактернішими прикладами використання елементів природного ландшафту, як контрольної поверхні системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” є ділянки автомобільних доріг, які перетинають лісові масиви.

За результатами картографічного оцінювання встановлено, що при загальній залісненості території України 15,9 % [79], протяжність автомобільних доріг, які лежать в межах лісових масивів, є безпосередньо дотичними (суміщеними) до них, або перетинають ці масиви, становить близько 1,5 % (без урахування газо-пилрозахисних лісосмуг). Це, в першу чергу такі автомобільні дороги міжнародного значення як: М01 (Е95), М02 (Е101, Е391), М06 (Е40, Е471), М07 (Е373), М08, М09 (Е372), М10, М11, М12 (Е50), М23 (Е58, Е81) тощо. Приклад поперечного профілю автомобільної дороги, яка розташована в межах лісового масиву наведено на рис.4.21.

Конструкційним розвитком найефективнішого (з точки зору захисту природно-техногенної геоекосистеми від впливу автотранспортної мережі) ландшафтного варіанту комунікаційної системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік”, яка передбачає прокладення траси автомобільної дороги за лісовим масивом, є варіант створення штучних лінійно-двобічних геохімічних бар’єрів у вигляді газо-пилрозахисних деревно-чагарникових лісосмуг, як складової частини інженерної інфраструктури автомобільно-комунікаційного комплексу.

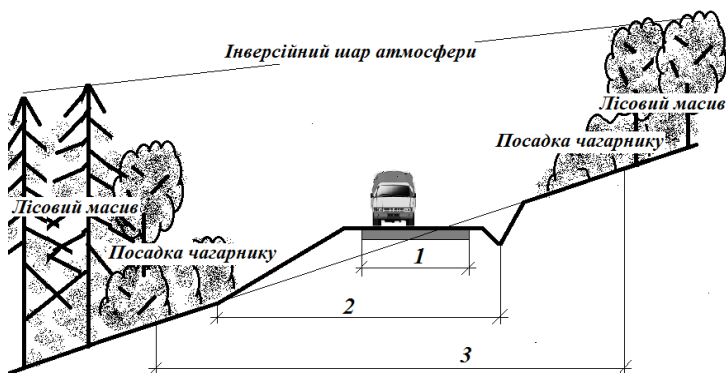


Рис.4.21. Поперечний профіль автомобільної дороги, яка розташована в лісовому масиві: 1 – проїжджа частина, 2 – земляне полотно, 3 – резервно-технологічна смуга

4.5. Дотримання екологічної безпеки ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автотранспортною мережею

Метою ландшафтного проектування є не лише створення автомобільної дороги, яка забезпечувала б її високі транспортно-експлуатаційні властивості, зручність і безпеку руху, але і сприяла б збереженню природних ознак та властивостей ландшафту природно-техногенної геоекосистеми вцілому [273, 289].

Узгодження траси автомобільної дороги з ландшафтними ознаками має бути засноване на вимогах (розділ I) фрактальної інваріантності природних об'єктів ландшафту та штучних споруд інженерної інфраструктури автотранспортної мережі, тобто мають бути дотримані, так звані вимоги масштабності. При цьому, необхідно враховувати, що автомобільна дорога, як правило, є екологічним бар'єром [103, 108, 110], тобто межевою лінійною спорудою, яка не лише розчленовує ландшафт природно-територіального комплексу, але і призводить до трансформації всіх без винятку природних процесів в межах всієї природно-техногенної геоекосистеми (рис.4.22).

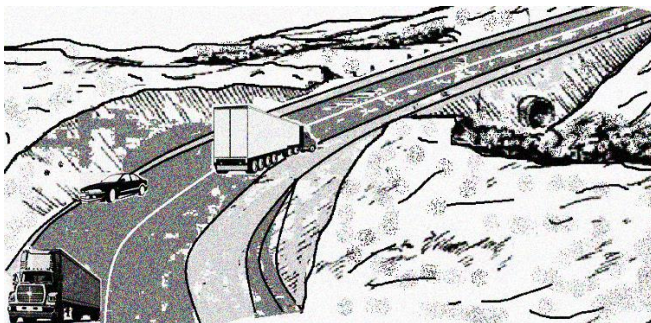


Рис.4.22. Характер розчленування ландшафту природно-територіального комплексу трасою автомобільної дороги

Загалом, ландшафтна організація природно-техногенної геоекосистеми з розвиненою автодорожньою мережею має розглядатись, як деякий мозаїчний комплекс складений з окремих ландшафтно-архітектурних (ландшафтно-територіальних) басейнів [101, 114], які характеризуються єдністю спільних ландшафтних ознак (сумірністю фрактальних розмірностей природних об'єктів і штучних споруд інженерної інфраструктури автодорожньої мережі). Кожний ландшафтно-територіальний басейн топологічно має характеризуватись головними осями і геометричним центром цих осей, і обмежуватись деякими домінантами басейнового фрагменту природно-техногенної геоекосистеми. Максимальний лінійний розмір L_6 ландшафтно-територіального басейну (вздовж траси автодороги) має визначатись характером візуального сприйняття єдності архітектурного сприйняття ділянки дороги і для автомобільних доріг різних категорій визначається як:

$$L_6 = v_{\text{тп}} \cdot t \quad (4.27)$$

де $v_{\text{тп}}$ – швидкість автотранспортного потоку;

t – час подолання автотранспортним потоком ландшафтно-територіального басейну, який відповідно до рекомендацій [132] має бути $t \leq 10$ хв.

Максимальний лінійний розмір L_6 ландшафтно-територіального басейну для автомобільних доріг різних категорій наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Максимальний лінійний розмір L_6
ландшафтно-територіального басейну трасування
автомобільних доріг, м

Категорія автодороги (ДБН В.2.3-4:2007)	1а, 1б	2	3
Максимальний лінійний розмір L_6 ландшафтно-територіального басейну трасування автомобільних доріг, м	22×10^3	19×10^3	16×10^3

Мінімізація впливу автомобільної дороги, як екологічного бар'єру, на ландшафт природно-техногенної геоекосистеми має передбачати топографічне виявлення деякого екологічно безпечного "коридору", в якому траса перебувала б у найменшому конфлікті з морфологічними ознаками ландшафтно-територіального басейну. Особливо помітним протиріччя природного ландшафту і техногенної інфраструктури автомобільної дороги спостерігається в рівнинному рельєфі, де будівельна висота конструкції автодороги практично сумірна з вертикальними розмірами мезорельєфу території.

Характерним прикладом узгодження траси автомобільної дороги з ландшафтними ознаками природно-техногенної геоекосистеми є ділянка автодороги Н-03, яка перетинає Подільський Кряж в межах Національного природного парку (НПП) "Подільські Товтри" (рис.4.23).

В межах ландшафтно-територіального басейну природно-техногенної геоекосистеми, який лінійно обмежено домінантами 4-4 (межа міста Кам'янець-Подільський та улоговина пасма Подільського кряжу 2-2) обираємо вісь 5-5, як головний напрямок трасування автомобільної дороги та допоміжну вісь 6-6. При цьому, напрям осі 5-5 співпадає з поздовжнім напрямком екологічно-безпечного "коридору", який топологічно визначений поперечним до 2-2 напрямком. Головні осі 5-5 та 6-6 ландшафтно-територіального басейну мають не перетинати територію 3

суворого заповідання в межах НПП. Таким чином, трасування автомобільної дороги Н-03 (1-1) вздовж головної осі (5-5) забезпечує мінімізацію техногенного навантаження на об'єкти природно-територіального комплексу Національного природного парку "Подільські Товтри".

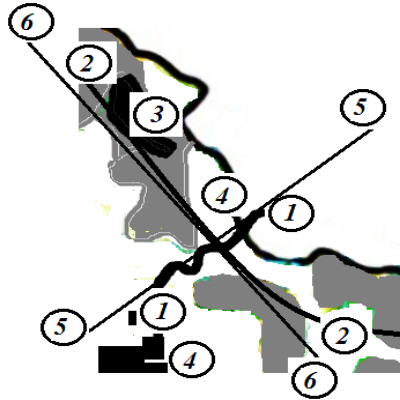


Рис.4.23. Ділянка автомобільної дороги Н-03 в межах Національного природного парку "Подільські Товтри":

1-1 – траса автомобільної дороги Н-03; 2-2 – характерна ландшафтна вісь пасма Подільського кряжу; 3 – територія суворого заповідання в межах НПП "Подільські Товтри"; 4-4 – межові домінанти ландшафтно-територіального басейну; 5-5 і 6-6 – головні осі ландшафтно-територіального басейну природно-техногенної геоекосистеми

Отже, основними принципами узгодження інфраструктури автомобільної дороги з природним ландшафтом є:

- збереження фрактально-інваріантних ознак ландшафтно-територіальної організації природно-територіального комплексу, що має бути реалізованим на стадії опрацювання варіантів плану трасування автомобільної дороги;
- інтегрування інженерної інфраструктури автомобільної дороги в ландшафт природно-територіального комплексу, як невід'ємного об'єкту природно-техногенної геоекосистеми (автодорога є елементом ландшафту, на відміну від

створення ландшафтних об'єктів, які обслуговують дорожню інфраструктуру);

- підвищення рівня автотранспортної ємності природно-техногенної геоекосистеми шляхом створення штучних об'єктів ландшафту, які системно підсилюють геоморфологічні ознаки ландшафтно-територіального басейну автомобільної дороги.

4.6. Основні принципи управління проєктами природно-техногенних геоекосистем з розвинуеною автотранспортною мережею

Для подалі зростаючою щільності та транспортно-технологічного ускладнення мережі автомобільно-комунікаційних структур природно-техногенних геоекосистем саме стадія їх проектування визначає тривалість циклів задоволення попиту, які визначаються показниками якості (в тому числі екологічної якості), як окремих техногенних об'єктів, так і всієї природно-техногенної геоекосистеми в цілому. Стадія проектування (ландшафтного узгодження) техногенних об'єктів є особливо важливою тому, що якість будь-якого технічного об'єкту (споруди), яку закладено при її проектуванні, на наступних стадіях циклу задоволення потреб (стадії виготовлення, будівництва, експлуатації) можна лише зберегти, але ніяк не підвищити. Факторологічні дослідження [150] діяльності проектних установ та організацій, які займаються розробкою та проектуванням автотранспортних мереж, свідчать, що одним з основних факторів розробки ними проєктів з фіксованими рівнями якості технічних об'єктів (в тому числі і за показниками їх екологічної безпеки) є потужність бази використовуваних даних. Використовувана при проектуванні база даних разом із алгоритмом формальних методів проектування є основою для забезпечення необхідного рівня екологічної безпеки проєктованої автомобільно-комунікаційної системи. Загалом, структура розв'язку проектної задачі конструювання природно-техногенної геоекосистеми з розвинуеною автодорожньою мережею може бути представлена у вигляді блок-схеми, яку наведено на рис.4.24.

Рівень техногенного впливу автодорожньої мережі на природно-територіальний комплекс, який виникає в процесі її будівництва (реконструкції), експлуатації та ремонтних робіт, залежить, в першу чергу, від інженерних рішень, які приймаються

при трасуванні структури та розробленні конструкції автомобільних доріг (в тому числі за ландшафтними ознаками природно-техногенної геоекосистеми, використовуваними ресурсами та робочими матеріалами, способами переробки та використання цих ресурсів і матеріалів, застосуванням захисних споруд тощо). Ці інженерні рішення, які безпосередньо впливають на стабільність рівнів екологічної безпеки природно-техногенної геоекосистеми, необхідно розглядати як комплексну задачу створення системи задоволення транспортно-комунікаційних потреб з високою екологічною якістю. Екологічна раціональність автотранспортного комплексу є сукупністю тих його властивостей, які виражають зазначену раціональність з точки зору відповідності прийнятих конструкційних рішень як умовам будівництва, експлуатації та ремонту автодорожньої мережі, так і природним умовам природно-територіального комплексу. Отже, для забезпечення необхідного (фіксованого) рівня екологічної безпеки природно-техногенної геоекосистеми (зокрема її транспортно-комунікаційної складової) ці умови (з достатнім ступенем точності і деталізації) мають бути сформульованими ще до початку розробки і проектування всієї інфраструктури автотранспортно-комунікаційної системи.

Умови розробки, проектування, будівництва (реконструкції) та експлуатації автотранспортної мережі конкретної природно-техногенної геоекосистеми є досить динамічними, а тому екологічна раціональність (екологічна безпека) цієї системи має розглядатись та оцінюватись відповідно до обмежень визначеного діапазону цих умов, а саме обмежень за часом, простором, конкретними екологічними та ландшафтними ознаками тощо. Рівень фіксації екологічної безпеки автотранспортного комплексу, як підсистеми природно-техногенної геоекосистеми має безперервно змінюватись відповідно до того, як змінюються екологічні ознаки природно-територіального комплексу, умови, засоби і конструкційні матеріали будівництва (реконструкції) автомобільних доріг, їх експлуатації та ремонту. Саме ця особливість задоволення циклів транспортно-комунікаційних потреб зумовлює спадковість ознак екологічної безпеки підсистеми мережі автомобільних доріг в межах розглядуваної природно-техногенної геоекосистеми.

Спадковість показників екологічної безпеки транспортно-комунікаційної підсистеми природно-техногенної геоекосистеми визначається сукупністю тих її властивостей, які виражають

екологічну раціональність автотранспортної мережі з точки зору єдності, повторюваності та змінюваності конструкційних рішень для нової проекрованої автотранспортної підсистеми. Ці властивості зокрема характеризують:

- єдність повторюваності окремих складових автотранспортного комплексу в даному виконанні геоекосистеми вцілому або в розглядуваній множині її виконання і застосування в ній нових складових частин або об'єктів, які зумовлено новизною вимог до природно-техногенної геоекосистеми або множини її виконання за функціональними призначеннями, умовами її будівництва (реконструкції) або експлуатації – конструкційна спадковість проекрованої системи;
- єдність повторюваності та змінюваності технологічних методів будівництва (реконструкції), підтримання в робочому стані і поновлення елементів та об'єктів автотранспортного комплексу, які враховуються при розробленні та конструюванні природно-техногенної геоекосистеми – технологічна спадковість техногенної системи.

Спадковість властивостей підсистеми автотранспортного комплексу природно-техногенної геоекосистеми набуває визначального значення, як основного принципу екологічної раціональності конструкторської підготовки, спорудження та функціонування автодорожньої мережі регіону.

Використання цього принципу дозволяє забезпечити спадковість параметрів та рівнів екологічної безпеки транспортно-комунікаційних мереж та їх інженерної інфраструктури, оптимізувати процес конструкторського і технологічного проектування, максимально використати попередні напрацювання науково-дослідних, дослідно-конструкторських та дослідно-технологічних розробок, результатів експериментальної реалізації проектів при будівництві (реконструкції) окремих ділянок автомобільних доріг, їх перевірки в умовах експлуатації, технологічного обслуговування та ремонту конкретних автотранспортних мереж.

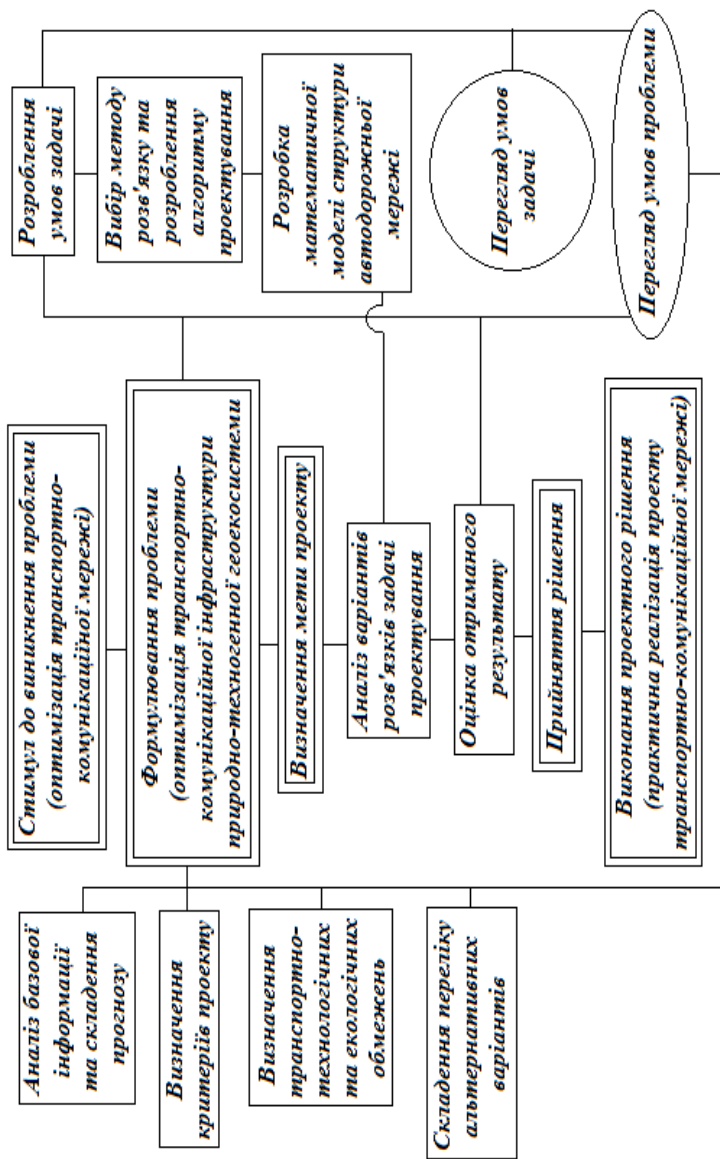


Рис. 4.24. Структурна блок-схема розв'язку проектної задачі конструювання природно-техногенної геоекосистеми

У зазначеному ракурсі спадковість автотранспортної підсистеми природно-техногенної геоекосистеми рівнозначна її екологічній раціональності, оскільки характеризує можливість багатократного застосування окремих інженерних рішень, які попередньо уже були забезпечені у сферах будівництва, експлуатації та ремонту автодорожньої мережі відповідними ресурсами, матеріалами та засобами. Тим самим спадковість конструкцій автодорожніх мереж, як і їх екологічна безпека, визначає не лише можливість розробки і реалізації нових автотранспортних систем з фіксованими, підвищеними та прогресуючими рівнями їх екологічної безпеки, але і зменшення екологічних ризиків техногенних підсистем в цілому в межах територіальних природно-техногенних геоекосистем з розвиненими автотранспортними та іншими комунікаційними мережами.

4.7. Еколого-економічне оцінювання проєктів будівництва та реконструкції автодорожніх мереж

Результатом інтенсифікації транспортно-комунікаційних систем є трансформація природно-територіальних комплексів, які сформовано в межах окремих геоморфологічних систем, в природно-техногенні геоекосистеми, що призводить до деградації природних ландшафтів і опосередковано може бути оціненим як певні екологічні збитки у грошовому еквіваленті. Загалом, величина економічних збитків, які викликані антропогенними порушеннями рівноваги природно-територіальних комплексів, є деяким інтегральним показником, який може відображати ефективність заходів щодо їх стабілізації. При цьому, визначального значення набуває еколого-економічне оцінювання порушуваних властивостей природно-територіального комплексу, які мають бути визначені параметрами екологічної безпеки автомобільно-комунікаційної складової природно-техногенної геоекосистеми та можливістю їх програмування на стадії розроблення проєкту [163, 164].

Підтримання природно-ресурсного потенціалу природно-територіальних комплексів на певному оптимальному рівні вимагає значних матеріальних витрат, а отже сутність еколого-економічного оцінювання проєктів природно-техногенної геоекосистеми полягає у відображенні вартості заходів, які спрямовані на забезпечення стабільності геоморфологічних

властивостей трансформованих природних ландшафтів. Зазначені матеріальні (економічні) витрати поділяють на такі дві категорії:

- витрати на природоохоронні заходи безпосередньо на трансформованих територіях, де потенційно можуть виникати порушення властивостей природно-територіального комплексу;
- економічні збитки від можливих екологічних наслідків техногенної трансформації природно-територіальних комплексів, зокрема витрати на компенсації втрат природних ресурсів, а також витрати на ліквідацію негативних впливів на довкілля (зокрема, розчленування природних ландшафтів мережею автомобільних доріг).

Загалом еколого-економічні збитки E можуть бути обчислені як [144]:

$$E = V_{\text{природоохоронних заходів}} + Z_{\text{фактичні}} \quad (4.28)$$

де $V_{\text{природоохоронних заходів}}$ – витрати на здійснення природоохоронних заходів;

$Z_{\text{фактичні}}$ – фактичні збитки після проведення (або в результаті не проведення природоохоронних заходів).

Якщо $V_{\text{природоохоронних заходів}}$ залежать від масштабів і характеру їх проведення за проектним рішенням, а отже їх можна визначити із певним ступенем достовірності, то фактичні збитки ($Z_{\text{фактичні}}$) однозначному визначенню не підлягають і можуть не збігатися за місцем і часом їх виникнення. Обидві вищенаведені категорії економічних витрат (збитків) перебувають поміж собою у функціональній залежності. Так, при збільшенні витрат на природоохоронні засоби (I-а категорія) відбувається зниження витрат щодо збитків через втрату природних ресурсів (II-а категорія економічних витрат).

Зазначені економічні (матеріальні) збитки в загальному випадку можна поділити на прямі та опосередковані. За характером дії еколого-економічні збитки поділяють на явні (чітко визначаються за допомогою загальноприйнятих експериментальних та розрахункових методів) та приховані (для їх виявлення необхідно застосовувати спеціальні опосередковані методи). За часом виявлення еколого-економічні збитки

поділяють на поточні та прогнозовані, які виявляються у віддаленій перспективі. З точки зору еколого-економічного оцінювання природоохоронних заходів надзвичайно важливою є категорія попереджених збитків. Попередженими збитками є різниця між можливими збитками від техногенної діяльності і фактичними витратами на природоохоронні заходи, які здійснено на даний момент часу [98, 169, 180]. Таким чином, при порівнянні варіантів проектів конструкції природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею за критеріями еколого-економічної ефективності потрібно керуватись принципом “витрати (збитки) – негативні наслідки”.

Порядок оцінки прямих еколого-економічних збитків, які зумовлено викидами шкідливих речовин, які продукуються автотранспортними потоками, наведено в таблиці 4.6.

При цьому, обсяги викидів M_i (кг/год×км) шкідливих речовин автотранспортним потоком можуть бути визначені (без урахування технічного стану автотранспортних засобів) як:

$$M_i = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j \sum_{k=1}^k w_j \cdot P_{ki} \cdot q_a \quad (4.29)$$

w_j – викиди забруднюючих речовин j -м автотранспортним засобом, кг/км;

P_{ki} – ймовірність потрапляння k -ї групи автотранспортних засобів в i -й діапазон швидкостей руху автотранспортного потоку;

q_a – інтенсивність автотранспортного потоку, автомобілів/год.

Аналіз результатів порівняльного оцінювання варіантів проекту еколого-транспортної оптимізації автодорожньої мережі Подільського регіону Хмельницької області свідчить про доцільність проведення транспортно-технологічної оптимізації ділянки Дениші-Дубрівка автомобільної дороги Т0612, Т0618 (див. розділ 4.2), яка передбачає реконструкцію цієї ділянки і переведення її в автомобільну дорогу категорії 3.

Отже підтримання визначеного екологічно безпечного рівня природно-техногенної геоекосистеми з розвинутою автотранспортною мережею вимагає значних фінансових і матеріальних витрат, які мають бути спрямовані на стабілізацію всіх геоморфологічних ознак цієї системи.

Таблиця 4.6.

Порядок оцінки прямих еколого-економічних збитків
від забруднення атмосферного повітря автотранспортними
потоками

Назва показника	Розрахункова формула	Використовувані параметри
1. Збитки від забруднення (грн.)	$Y_3^B = Y_{B,3}^B \cdot \sigma_{B,н.з}^B \cdot M_{пр.}^B$	$Y_{B,3}^B$ (грн./ум. т) – відносні збитки від викиду однієї умовної тони забруднюючих речовин; $\sigma_{B,н.з}^B$ – відносна небезпека забруднення природно-техногенної геоекосистеми; I_j – обсяги викидів j-тої шкідливої речовини; $(1 - \delta_j)$ – емпіричний коефіцієнт, що визначає частку шкідливих викидів, яка депонується елементами ландшафту природно-техногенної геоекосистеми
2. Приведена маса річних викидів забруднюючих речовин (т/рік)	$M_{пр.}^B = \sum_{i=1}^l A_{jв}^B \cdot M_{jд}^B$	
3. Маса домішок j-того виду, що надходять в атмосферне повітря природно-техногенної геоекосистеми (т/рік)	$M_{jд}^B = I_j \cdot (1 - \delta_j)$	
4. Показник відносної агресивності j-тої речовини, що надходить до атмосферного повітря	$A_{jв}^B = \frac{1}{ГДК_{ш.р.}^B}$	

Процедурою поетапної підготовки проекту на будівництво (реконструкцію) автодорожньої мережі (таблиця 4.7) в обов'язковому порядку передбачається розроблення оцінки впливу на довкілля (ОВД). Відповідно до змісту Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» «...необхідно здійснювати організаційні заходи, які спрямовані на запобігання шкоди довкіллю, забезпечення екологічної безпеки, охорони довкілля, раціонального використання і відтворення природних ресурсів...».

Здійснення оцінки впливу на довкілля є обов'язкова для об'єктів, які віднесені до першої категорії об'єктів планованої діяльності, тобто таких, що становлять підвищену екологічну небезпеку: будівництво автомагістралей, автомобільних доріг першої категорії, автомобільних доріг загального користування

державного та місцевого значення, які мають чотири чи більше смуги руху, або реконструкція або розширення наявних смуг руху до чотирьох і більше, за умови їхньої безперервної протяжності 10 кілометрів і більше [97]. При цьому, характер розгалуженості та протяжності автотранспортної мережі зумовлює, як правило, її вплив на території суміжних регіонів (в окремих випадках на території суміжних країн), а отже відповідно до міжнародної Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті.

Таблиця 4.7

Процедура поетапного розроблення проекту
будівництва (реконструкції) автомобільної дороги

Етап (стадія) екологічного оцінювання проекту	Мета виконання екологічного оцінювання проекту	Передбачуваний результат екологічного оцінювання
Ідентифікація мети	Виявлення характеру впливу ділянки автотранспортної мережі на природно-техногенної геоекосистеми	Формалізація передбачуваних наслідків трансформації природно-техногенної геоекосистеми
Прогнозування	Екологічна раціоналізація екологічних наслідків реалізації проекту	Мінімізація техногенної трансформації природно-техногенної геоекосистеми автотранспортною інфраструктурою
Інтерпретація результатів прогнозування	Узгодження екологічних, технічних, економічних, господарських тощо розбіжностей проекту	Моніторинг та консультування з питань нормативної процедури затвердження проекту будівництва (реконструкції) автотранспортної мережі
Остаточне оцінювання проектного рішення	Визначення господарської та екологічної значущості проекту	Остаточне затвердження проектних рішень.

4.8. Висновки за розділом IV

За результатами розглянутих методів еколого-технологічної оптимізації функціонування об'єктів інфраструктури автотранспортних мереж встановлено:

1. Визначене за критеріями неперервності кусочно-лінійної функції, мінімальне значення інтенсивності руху автотранспортних засобів, за якого режим вільного руху сукупності фізичних автотранспортних одиниць набуває ознак колективного синхронізованого (когерентного) руху в складі автотранспортного потоку становить $3,0 \times 10^3$ авт./добу, що відповідає нормованим значенням інтенсивності руху для автомобільних доріг категорій 1-а, 1-б, 2, 3.

2. Основними чинниками, які визначають динаміку забруднення природно-техногенних геоекосистем внаслідок функціонування автотранспортного комплексу, є показник автотранспортної ємності території та ландшафтні особливості трасування і конструкційні параметри автодорожньої мережі, її технічний стан та експлуатаційні показники, наявність газопилозахисної інфраструктури в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг та синхронність (когерентність) колективного руху автотранспортних потоків на всіх без винятку ділянках автодорожньої мережі.

3. Пропонований метод оптимізації автотранспортних мереж та конструкційних параметрів профілю поперечних перерізів резервно-технологічних смуг автомобільних доріг, який полягає у графо-аналітичному моделюванні структури і складу автотранспортних потоків, дозволяє підвищити "пропускну здатність" конкретних ділянок автотранспортних мереж, в тому числі і на ділянках з особливими умовами руху, забезпечити синхронізацію колективного руху автотранспортних засобів, що зумовлює стабілізацію режимів роботи їх двигунів і, як наслідок, забезпечує зменшення обсягів газопилових викидів, які продукуються автотранспортними потоками.

4. Для мінімізації ефекту "розсинхронізації" колективного руху автотранспортних засобів у вузлах автодорожньої мережі та на ділянках автомобільних доріг з великою кривизною траси (серпантини, "шпильки" тощо) траєкторії руху основних автотранспортних потоків мають бути окреслені в плані спряженими кривими другого порядку, як правило спряженими гіперболами.

5. Екологічна оптимізація конструкційних рішень комунікаційної системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” має передбачати максимально можливе обмеження динамічних процесів енерго-масопереносу через контрольну поверхню цієї системи, яка визначена розмірами резервно-технологічної смуги автомобільної дороги. При цьому, обов’язковою умовою конструкційної оптимізації системи “автодорожня мережа – автотранспортний потік” є узгодження інженерної інфраструктури автодорожньої мережі з територіально-ландшафтними ознаками природно-територіального комплексу природно-техногенної геоекосистеми вцілому.

6. Основним принципом узгодження інфраструктури автомобільної дороги з об’єктами природного ландшафту є узгодження фрактально-інваріантних ознак ландшафтно-територіальної організації природно-територіального комплексу та об’єктів інженерної інфраструктури автодорожньої мережі, що має бути реалізованим на стадії опрацювання варіантів плану трасування автомобільної дороги.

ВИСНОВКИ

В даній монографії розглянуто теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної науково-практичної проблеми, яка полягає у підвищенні рівнів екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з високою щільністю автодорожньої мережі та підвищення якості ландшафтних елементів навколишнього середовища в межах резервно-технологічної смуги автомобільної дороги. До основних науково-практичних результатів необхідно віднести:

1. Інтенсифікація автокомунікаційного комплексу в сучасних умовах зумовлює динамічну розбудову мережі автомобільних доріг з відповідною супутньою інфраструктурою, що призводить до незворотної трансформації природно-територіальних комплексів у вигляді штучних деформацій ландшафту, розчленування території, порушення фоновієї стратифікації атмосфери і, як наслідок, до змін мезоклімату придорожніх територій.

2. Транспортно-технологічні умови експлуатації автодорожніх мереж, що характеризуються функціональними ознаками сукупності термодинамічних циклів згоряння паливних матеріалів, які забезпечують колективний рух автотransпортних засобів, зумовлюють множину одномоментних викидів в атмосферне повітря хмари газо-пилового аерозолі. Дивергентний характер дифузії емісії газо-пилового аерозолі визначає формування роторів турбулентності на “зрізах” швидкостей зустрічних автотransпортних потоків та на поверхнях рельєфу окремих об’єктів ландшафту резервно-технологічних смуг автомобільних доріг.

3. Визначене за критеріями неперервності кусочно-лінійної функції, мінімальне значення інтенсивності руху автотransпортних засобів, за якого режим вільного руху сукупності фізичних автотransпортних одиниць набуває ознак колективного синхронізованого (когерентного) руху в складі автотransпортного потоку становить $3,0 \times 10^3$ авт./добу (автомобільні дороги категорій 1-а, 1-б, 2, 3).

4. Обсяги газо-пилових викидів, які продукуються автотransпортними потоками, їх структура та хімічний склад визначаються складом, щільністю, інтенсивністю та когерентністю руху автотransпортних засобів, ландшафтними особливостями трасування і конструкційними параметрами автодорожньої

мережі, її технічним станом та експлуатаційними характеристиками. Для найхарактерніших за впливом на природно-територіальні комплекси автомобільних доріг з інтенсивністю автотранспортних потоків > 3000 авт./добу питомі річні обсяги цих викидів досягають: мінерального пилу – 12 т/рік $\times$ км; сажі (аморфного вуглецю) – 10 т/рік $\times$ км; чадного газу (CO) – > 100 т/рік $\times$ км; оксидів нітрогену (N_xO_y) – 11 т/рік $\times$ км; ароматичних та поліциклічних вуглеводнів ($C_{20}H_{12}$) – 18 т/рік $\times$ км.

5. Еколого-ландшафтна оптимізація трасування автодорожньої мережі, відповідних об'єктів інженерної інфраструктури та конструкційних параметрів поперечного профілю резервно-технологічних смуг (смуг впливу) автомобільних доріг за принципом узгодження їх фрактально-інваріантних ознак з ознаками ландшафтно-територіальної організації природно-територіальних комплексів забезпечує максимально можливе обмеження процесів енерго-масопереносу (запобігання міграційним процесам емісії забруднювачів) за межі резервно-технологічної смуги автодороги. Порівняльна оцінка проєктів будівництва (реконструкції) мережі автомобільних доріг свідчить, що розроблені методи еколого-ландшафтної оптимізації автодорожньої мережі дозволяють на порядок покращити комплексну інтегральну оцінку екологічної безпеки природно-техногенних геоекосистем з розвиненими автотранспортними мережами з урахуванням їх автотранспортної ємності.

6. Ефективність захисту природно-техногенної геоекосистеми від впливу шкідливих викидів, які продукуються автотранспортними потоками, має забезпечуватись інтенсифікацією процесів депонування пилових викидів в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг з одночасним відновленням структури та хімічного складу атмосфери до параметрів її “стандартних” (фонових) властивостей, що досягається оптимізацією ландшафтних параметрів конструкції профілю резервно-технологічної смуги автодороги. Проєктовані ландшафтні параметри повинні забезпечувати стійку мезокліматичну раціональну стратифікацію приземних шарів атмосфери прилеглих до поверхонь рельєфу окремих ландшафтних об'єктів, в тому числі і штучно створюваних, топологічна структура яких має бути фрактально узгодженою з ландшафтом резервно-технологічної смуги автомобільної дороги.

7. Одним з найефективніших заходів забезпечення екологічної рівноваги природно-техногенних геоекосистем з високою щільністю автотранспортних мереж є створення штучних лінійно-двобічних геохімічних бар'єрів у вигляді лісових газопилозахисних смуг деревно-чагарникового типу, структура посадки яких передбачає наявність лабіринту штучно створюваних лакунарних порожнин у вигляді фітоценотичних ніш, які обмежують міграцію пилових викидів автотранспорту за межі резервно-технологічних смуг автодоріг.

8. Розроблений алгоритм визначення впливу на довкілля проекту будівництва (реконструкції) автомобільної дороги є підставою для розроблення відповідних систем автоматизованого проектування (САПР) як окремих ділянок автодоріг, так автотранспортно-комунікаційної мережі регіону в цілому і забезпечує можливість неперервної оптимізації конструкційних параметрів автомобільних доріг відповідних категорій в умовах зміни властивостей і ознак техногенно трансформованих ландшафтів та динаміки транспортної і технологічної інфраструктури природно-техногенної геоекосистеми.

9. Реалізація пропонованих науково-методологічних основ та заходів, щодо практичної реалізації екологічної безпеки автодорожніх мереж, забезпечує еколого-технологічну оптимізацію функціонування автотранспортного комплексу, зменшення транспортно-техногенного тиску на природно-техногенні геоекосистеми та стабілізацію ландшафтних і екологічних ознак природно-територіальних комплексів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абраменко С.В. Апарин Г.П., Крючков А.Н. Географические информационные системы. Создание цифровых карт. Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – 276 с.
2. Автомобильные дороги общего пользования. Методические рекомендации по озеленению автомобильных дорог. ОДМ 218.011-98 (Утв. Приказом ФДС РФ от 05.11.1998 № 421).
3. Адаменко О.М., Міщенко Л.В. Екологічний аудит територій. Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 342 с.
4. Адаменко О.М. Наш майбутній дім – Екоєвропа. Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2007. – 428 с.
5. Адаменко О.М. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище : науково-теоретичні основи, практична реалізація: автореф. дис. на здобуття наук.ступ. док. техн. наук: 21.06.01 / Івано-Франк. нац. техн. ун-тет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2006. -25 с.
6. Адаменко О.М., Рудько Г.І. Екологічна геологія. Київ: Манускрипт, 1998. – 350 с.
7. Адаменко О.М. Конструктивная экология. Saarbrucken: Lap Lambert, 2014. – 122 с.
8. Адаменко О.М., Адаменко Я.О., Архипова Л.М. Екологічна безпека територій. За ред. О.М. Адаменка. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2014. – 444 с.
9. Адаменко О.М., Зоріна Н.О. Методологія та організація наукових досліджень в екології. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – 172 с.
10. Адаменко Я.О. Оцінка впливів на навколишнє середовище. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2014. – 284 с.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. – 279 с.
12. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения. Справочник. Перевод с английского В.У. Рэнкин, П.Клафи, С. Халберт и др. Москва: Транспорт, 1981. – 592 с.
13. Андрейцев В.І. Право екологічної безпеки. Київ: Знання-Пресс, 2002. – 332с.
14. Бабков В.Ф. Ландшафтное проектирование автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1980. – 189 с.
15. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1. Учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1979. – 367 с.
16. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 2. Учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1987. – 415 с.
17. Баженов В.А., Ісаєнко В.М., Саталкін Ю.М. Інженерна екологія. За заг. ред. В.П. Бабака. Київ: вид-во НАУ, 2006. – 492 с.

18. Базаров И.П. Термодинамика. Москва: Высшая школа, 2010. – 376 с.
19. Батурин В.К. Техногенное химическое воздействие автомобильных дорог на экосистемы придорожной полосы. Воронеж: изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. – 112 с.
20. Бахмат М.І., Шелудченко Екологічний фундаменталізм, як еволюція детермінованого біоцентризму. *Збірник наук. праць ПДАТУ: Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування»* Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2011. – С. 3–5.
21. Бахмат О.М., Васик Л.С., Шелудченко І.А. Моніторинг транскордонного переносу забруднюючих речовин у штучних ландшафтах автошляхової мережі. *Збірник наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету «Сучасні проблеми збалансованого природокористування – вип. IV»*. Кам'янець-Подільський, 2009. – С. 101-103.
22. Бегма И.В., Томаревская Е.С. Проектирования автомобильной дороги с учетом зрительного восприятия. Москва: Автотрансиздат, 1963. – 76 с.
23. Беккер А.А., Агаев Т.Б. Охрана и контроль загрязнений природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 56 с.
24. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
25. Білявський Г.О., Фурдуй Р.С. Основи екології. Київ: Либідь, 2004. – 408 с.
26. Білявський Г.О., Падун М.М., Фурдуй Р.С. Основи загальної екології. Київ: Либідь, 1995. – 368 с.
27. Боголюбов В.М., Клименко М.О., Мокін В.Б. Моніторинг довкілля. Херсон: Грінь Д. С., 2011. – 530 с.
28. Боков В.А., Лущик А.В. Основы экологической безопасности. Симферополь: СОНАТ, 1998. – 97 с.
29. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Москва: Наука, 1986. – 544 с.
30. Бронштейн Д.Л. Современные средства измерения загрязнения Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. – 325 с.
31. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
32. Васик Л.С., Шелудченко Б.А., Бахмат О.М., Гищук В.П. та ін. Екологічна експертиза. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2006. – 68 с.
33. Васик Л.С., Гаврилянчик Р.Ю., Шелудченко І.А. та ін. Інженерна екологія. Ч. 8. Міські екосистеми. За ред. Б.А. Шелудченко. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2010. – 136 с.

34. Васик Л.С., Павлів О.В., Каленчук Я.В. Екологічна експертиза та природоохоронне інспектування. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2010. – 112 с.
35. Васик Л.С., Овчарук О.В. Модель-імітатор лісової газопилозахисної смуги. *Наук. журнал «Екологічна безпека»*. Кременчук, 2011. – № 2/2011 (12). С. 76-79.
36. Васик Л.С. Лісова газопилозахисна смуга автомобільної дороги / Л.С. Васик. VI Всеукр. наук.-практ. конф. "Наука. Молодь. Екологія – 2010". Житомир, 2010. С. 15-16.
37. Васик Л.С., Бахмат О.М., Каленчук Я.В., Хабовський А.Е. Особливості формування крон деревно-чагарникової лісової зазопилозахисної смуги. *Матер. II-ї Міжн. наук.-практ. конф. "Сучасний стан та перспективи розвитку біо- і агроценозів в умовах постійного техногенного забруднення – 2010"*. Дрогобич-Трускавець, 2010. С. 288-291.
38. Васик Л.С. Лісова газопилозахисна смуга у вузлах автошляхових мереж. *Тезиси докл. междунар. научн. симпоз. "Неделя еколога – 2010"*. Днепродзержинск, 2010. С. 63-65.
39. Васик Л.С., Бахмат О.М. Створення шумо-газопилозахисних насаджень на територіях прилеглих до автошляхів. *Тези допов. Всеукр. наук.-практ. конф. "Регіональні та транскордонні проблеми екологічної безпеки. Горбуновські читання – 2011"*. Чернівці: 2011. С. 34-35.
40. Васик Л.С. Узгодження конструкційних параметрів лісових газопилозахисних смуг на ділянках з особливими ландшафтно-транспортними умовами ПТГЕС. *Міжн. наук.-практ. конф. "Подільські читання – 2012"*. Кам'янець-Подільський, 2012. С. 81-83.
41. Васик Л.С. Шелудченко Б.А. Результати дослідження аналітичної моделі динаміки концентрацій оксиду вуглецю на пришляхових територіях. *Матеріали III міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми збалансованого природокористування"*. Кам'янець-Подільський, 2008. С. 106-107.
42. Васильева Н.П., Каар Э.В., Васильева Н.П. Методы и направления лесовосстановления техногенных ландшафтов. Москва: 1978. С. 115–135.
43. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. Москва, 1989. - 261 с.
44. Виннер Н. Кибернетика и общество. Москва: Изд-во иностр. лит., 1958. – 200 с.
45. Внукова Н.В. Науково-методологічні основи екологічної безпеки комплексу автомобіль – дорога – середовище: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 21.06.01. Харків, 2015. – 36 с.
46. Внукова Н.В. Методологія екологічної безпеки комплексу АДС (автомобіль – дорога –середовище). Монографія. Харків: ХНАДУ, 2011. – 196 с.

47. Внукова Н.В., Желновач Г.М., Карпенко О.С. Можливість оцінки ризику забруднення атмосферного середовища та ґрунтів придорожного простору автодоріг. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. праць.* – 2010. – № 48. С. 11-14.
48. Внукова Н.В., Подригало М.А., Калініченко А.В., Коробко А.І. Аналіз та прогнозування європейських екологічних норм для автомобільного транспорту та аналогічні нормативи в Україні. *Экология и промышленность.* – 2010 № 1(22). С. 4-9.
49. Внукова Н.В. Показники впливу комплексу АДС на навколишнє середовище і методи їх оцінки. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. праць.* – 2010. – № 51. С. 173-179.
50. Внукова Н.В., Барун М.В. Аналіз методів оцінки забруднення придорожного простору. *Зб. наук. праць УкрНДІЕП «Проблеми охорони навколишнього середовища та екологічної безпеки».* 2010. С. 243-256.
51. Внукова Н.В. Вплив природно-кліматичних умов на екобезпеку транспортного комплексу. *Вісник НТУ «ХПІ» зб. наук. праць. Тематичний випуск: нові рішення в сучасних технологіях.* – 2011. – № 34. С. 3-6.
52. Внукова Н.В., Ковальова О.М., Желновач Г.М. Математичне моделювання споживання паливно-енергетичних та матеріальних ресурсів інтегрованими системами “автомобіль – дорога – середовище”. *Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць.* 2011. – Вип. 66. – С.404-410.
53. Внукова Н.В. Вплив технічного стану двигунів внутрішнього згоряння на паливну економічність і екологічну безпеку. *Вісник НТУ «ХПІ» зб. наук. праць. Тематичний випуск: нові рішення в сучасних технологіях.* – 2011. – № 53. С. 27-34.
54. Внукова Н.В. Методика оцінки техногенних та екологічних ризиків при експлуатації системи “автомобіль – дорога – середовище” // *Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции КАЗАНТИП-ЭКО-2011 “Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения г. Щелкино, АР Крым: в 3-х т., т.3 / УкрГНЦ “Енергосталь”.* – Харьков: НТМТ, 2011. С.126-136.
55. Внукова Н.В. Види впливу та методи оцінки комплексу “автомобіль – дорога – середовище” на довкілля. *IV всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю “Екологія – 2013”:* зб. наук. статей. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – С. 328-329.
56. Внукова Н.В. Желновач Г.М. Додаткові фактори збільшення негативного впливу автодоріг на навколишнє середовище. *Materialy V Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Europejska nauka XXI wieka – 2009”/ Medycyna Nauk i Chemiczne Technologie Ekologia Geografie Rolnictwo Weterynariae. Przemysl,* 2009. – Vol. 13. – P. 69-70.

57. Вознюк С.В. Обґрунтування параметрів конструкції лабіринту лакунарних порожнин в структурі газо-пилізахисних лісосмуг автомобільних доріг: дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.01. – Кам'янець-Подільський, 2017. – 180 с.
58. Вознюк С.В., Шелудченко Л.С. Аналіз впливу дорожньо-транспортного комплексу на атмосферне повітря в Хмельницькій області. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ: ВЦ НУБіП України, 2015. – Вип. 214. – С.58-64.
59. Вознюк С.В. Аналіз впливу дорожньо-транспортного комплексу на придорожній ландшафт. *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції "Екологічний стан і здоров'я жителів міських екосистем. Горбуновські читання"*. Чернівці: "Місто", 2015. – С. 44-46.
60. Вознюк С.В. Проблеми реалізації механізмів Кіотського протоколу і заходи щодо імплементації "гнучких механізмів". *Збірник наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спец. вип. – ПДАТУ*. Кам'янець-Подільський, 2009. – С. 62-64.
61. Вознюк С.В. Аеродинамічні властивості лісових газо-пилізахисних смуг із штучно створеними лакунарними порожнинами. *Тези доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції "Екологічна безпека держави"*. Київ: НАУ, 2016. – С. 3-4.
62. Вознюк С.В., Кобринська Л.В. Особливості формування штучно створюваних фітоценотичних комірок у вертикальній структурі газо-пилізахисних лісосмуг автодорожньої мережі. *Тези доповідей XIV міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми екологічної безпеки"*. Кременчук: Вид-во Щербатих, 2016. – С.109.
63. Войцицький А.П., Федішин Б.М., Борисюк Б.М. Методи та засоби вимірювання параметрів навколишнього середовища. Житомир: ДАУ, 2006. – 365 с.
64. Волова Т.Г. Экологическая биотехнология. Новосибирск: Прима-Пресс, 1998. – 152 с.
65. Волькенштейн М.В. Физика и биология. Москва: Наука, 1980. – 152 с.
66. Волошин І.М. Ландшафтно-екологічні основи моніторингу. Львів: «Ліга Прес», 1998. – 356 с.
67. Внукова Н.В. Вплив автотранспортних систем на біологічну складову придорожного простору. *Доп. І-ої Міжн. наук.-практ. Конф «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування»*. Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2012. – С. 26.
68. Гавриленко О.П. Геоекоекологічне обґрунтування проектів природокористування. Київ: Ніка-Центр, 2003. – 332 с.

69. Галузеві будівельні норми України ГБН В.2.3-218-007:2012. Споруди транспорту. Екологічні вимоги до проектування автомобільних доріг. Проектування. К.: Укравтодор. Видання офіційне.
70. Глазунов В.Н. Параметрический метод разрешения противоречий в технике. Москва: Речной транспорт, 1999. – 150 с.
71. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. Москва: Изд. лит. по строительству, 1971. – 368 с.
72. Грабар І. Г., Грабар О.І. Моделювання динаміки нелінійних систем та міри хаосу дивних атракторів. *Зб. наук. праць ПДАТУ: Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування»*. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2011. – С. 55 – 59.
73. Гриценко А.В., Соловей В.В., Внукова Н.В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктур. *Екологія та промисловість*. – 2011. – № 3(28). – С. 73-80.
74. Гриценко А.В., Внукова Н.В. Математичні методи конструювання комплексної оцінки рівня розвитку об'єкта в еколого-географічних дослідженнях. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2011. – № 6/4. – С. 4-8.
75. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. Москва: Прогресс-Традиция, 2000. – 418 с.
76. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» документ 2059-VII від 17.07.2020 із змінами і доповненнями.
77. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. ДБН В.2.3 – 4 – 2000. Видання офіційне.
78. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). № 201; прийнятий: 09-07-1997.
79. Державний стандарт України ДСТУ 7173:2010 Захист довкілля. Лісові ділянки вздовж залізничних і автомобільних доріг та у смугах їх відведення захисні. Норми виділення.
80. Державний стандарт України ДСТУ Б.В.2.7-34-2001. Щебені для строительных работ из скальных горных пород и отходов сухого магнитного обогащения железистых кварцитов горно-обогатительных комбинатов и шахт Украины. Технические условия.
81. Джигирей В.С., Сторожук В.М., Яцюк Р.А. Основи екології та охорона навколишнього природного середовища. Львів: Афіша, 2004. – 272 с.
82. Джонгман Р.Г.Г., Тер Браак С.Дж.Ф., Ван Тонгерен О.Ф.Р. , Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. Пер. с англ. Москва: Мир, 1999. – 306 с.
83. Дзенис П.Я., Рейнфельд В.Р. Пространственное проектирование автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1968. – 112 с.

84. Дорогунцов С. І., Коценко К. Ф., Хвесик М.А. Екологія. Київ: «Книжкова друкарня наукової книги», 1995. – 372 с.
85. Дорогунцов С.І., Ральчук О.М. Управління техногенно-екологічною безпекою у парадигмі сталого розвитку: концепція системно-динамічного вирішення. Київ: Наукова думка, 2001. – 172 с.
86. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. Київ: Наукова думка, 1986. – 560 с.
87. Дичко А.О., Єремєєв І.С. Організація моніторингу довкілля з використанням методів теорії фракталів. Управління розвитком складних систем. Київ: КПІ, 2014. №19. С. 150-156.
88. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Аэродинамика колесного транспорта. Минск: Белавтотракторостроение, 2001. – 368 с.
89. Экологическая энциклопедия: в 6 т. Редкол.: В.И. Данилов-Данильян, К.С. Лосев и др. Т. 1. Москва: ООО «Издательство «Энциклопедия», 2008. – 416 с.
90. Экологическая энциклопедия: в 6 т. Редкол.: В.И. Данилов-Данильян, К.С. Лосев и др. – М.: ООО «Издательство «Энциклопедия», 2010.
91. Евгенийев И.Е. Автомобильные дороги в окружающей среде / И.Е. Евгенийев, Б.Б. Каримов. Москва: Прима-Пресс, 2000. – 277 с.
92. Желновач Г.М. Заходи з забезпечення екологічної безпеки атмосферного повітря при експлуатації автомобільних доріг загального користування. *Доп. І-ої Міжн. наук.-практ. конф. «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування»*. Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2012. – С. 41.
93. Забродський П.М. Обґрунтування процесу роботи і параметрів дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь: *дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.20.01*. Житомир, 1997. – 210 с.
94. Закон України «Про автомобільні дороги» від 20 грудня 2005 р. № 3235-ІУ із змінами і доповненнями.
95. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року № 1264-ХІІ із змінами і доповненнями.
96. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707 із змінами і доповненнями.
97. Закон України «Про зону надзвичайної екологічної ситуації» від 13.07.2000 № 1908 із змінами і доповненнями.
98. Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2003 № 0962 із змінами і доповненнями.
99. Закон України «Про автомобільний транспорт» від 13.06.2001 № 3492 –ІV із змінами і доповненнями.
100. Закон України «Про автомобільні дороги» від 20.12.2005 № 3235 – ІV із змінами і доповненнями.

101. Залесская Л.С. Курс ландшафтной архитектуры. Москва: Стройиздат, 1964. – 184 с.
102. Запольський А.К., Войцицький А.П., Пількевич І.А. Моніторинг довкілля. Т.1. Кам'янець-Подільський: ПП «Медобори-2006». – 408 с.
103. Запольський А.К., Войцицький А.П., Пількевич І.А. Моніторинг довкілля. Т.2. Кам'янець-Подільський: ПП «Медобори-2006». – 360 с.
104. Золотарьов В.О., Братчун В.І., Космін О.В. Випробування дорожньо-будівельних матеріалів: Лабораторний практикум. за ред. В.О. Золотарьова. Харків: Видавництво ХНАДУ, 2006. – 352 с.
105. Іванюк Д.П., Шульга І.А. Управління природоохоронною діяльністю Київ: Алерта, 2007. – 368 с.
106. Ігошин М.І. Математичні методи і моделювання у фізичній географії. За ред. Є.Д. Гопченка, О.Г. Топчієва. Одеса: Астропринт, 2005. – 464 с.
107. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 534 с.
108. Израэль Ю.А. Проблемы мониторинга и охраны окружающей среды. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 398 с.
109. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: «Наука», 1991. – 149 с.
110. Инженерная экология: Учебник. Под ред. В.Т. Медведева. Москва: Гардарики, 2012. – 687 с.
111. Инженерная защита окружающей среды. Под общ. ред. Ю.А. Бирмана, Н.Г. Вурдовой. Москва: изд-во АСВ, 2002. – 296 с.
112. Иосилевич Г.Б., Лебедев П.А., Стреляев В.С. Прикладная механика. Москва: «Машиностроение», 1985. – 576 с.
113. Кавтарадзе Д.Н., Николаева Л.Ф., Поршнева Е.Б. Автомобильные дороги в экологических системах (проблемы взаимодействия). Москва: Че-Ро, 1999. – 240 с.
114. Казанцев Э.Ф. Технологии исследования биосистем. Москва: Машиностроение, 1999. – 177 с.
115. Кейсмер Г.Чен Ч. Теория моделей. Москва: Мир, 1977. – 614 с.
116. Канило П.М., Костенко К.В., Внукова Н.В. Канцерогенность отработавших газов автомобилей. *«Автомобильный транспорт: сб. научн. трудов. 2011. – Вып. 29. – С. 160-167.*
117. Кеплер И. Новогодний подарок, или о шестиугольных снежинках. Москва: Издательство «Наука», 1983. – 32 с.
118. Климчик О.М. Оцінка екологічного стану поверхневих водних об'єктів на меліорованих територіях: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.02. Житомир, 2003. – 195 с.

119. Кожушко Л.Ф., Скрипчук П.М. Екологічний менеджмент. Київ: ВЦ «Академія», 2007. – 432 с.
120. Кондратюк Е.Н., Тарабрин В.П., Бакланов В.И и др. Промышленная ботаника. Киев: Наук. думка, 1980. – 260 с.
121. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Москва: Постмаркет, 2000. – 352 с.
122. Куклев Ю.И. Физическая экология. Москва: Высшая школа, 2003. – 357 с.
123. Куликовский К.Л. Методы и средства измерений. Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
124. Кучерявий В.П. Урбоекологія. Львів: Світ, 1999. – 360с.
125. Литвинова Л.И., Левон Ф.М. Зеленые насаждения и охрана окружающей среды. Київ: Здоров'я, 1986. – 64 с.
126. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. Под ред. В.Н. Луканина. Москва: Высш. шк., 2001. – 273 с.
127. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
128. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. Москва: Физматлит, 2006. – 328 с.
129. Меннинг У. Дж., Федер У.А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Под ред. Л.М. Филиповой. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 356 с.
130. Міщенко Л.В., Грицюк М.Г. Екологічний аудит територій. Івано-Франківськ: ІМЕ «Галицька академія», 2008. – 272 с.
131. Моисеев Н.Н. Экология человечества глазами математика. Москва: Мол. гвардия, 1988. – 254 с.
132. Мельник А.В., Міллер Г.П. Ландшафтний моніторинг. Київ, 1993. – 148 с.
133. Міллер Г.П., Петлін В.М., Мельник А.В. Ландшафтознавство: теорія і практика. Львів: нац. ун-т ім. І.Франка, 2002. – 172 с.
134. Метеорологія і кліматологія / [під ред. С.М. Степаненка]. – Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2008. – 534 с.
135. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів / Затверджено: Наказ Держкомстату України. – 13.11.2008 №452. – <http://ukrstat.org/>.
136. Методические рекомендации по озеленению автомобильных дорог: ОДМ 218.011-98 / РосдорНИИ, Свердлов. Центр РосдорНИИ, Росгипролес, НПФ «Российские семена». – Москва, 1998. – 52 с.
137. Некос В.Ю., Некос А.Н., Сафранов Т.А. Загальна екологія та неоекологія. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2011. – 596 с.

138. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва: Машиностроение, 1980. – 136 с.
139. Новиков Ю. В. Экология, окружающая среда и человек. Москва, 1998. – 242 с.
140. Одум Ю. Основы экологии. Москва: Мир, 1975. – 740 с.
141. Озарків І.М., Сорока Л.Я., Грицюк Ю.І. Основи аеродинаміки і тепломасообміну. Київ : ІЗМН, 1997. – 280 с.
142. Орнатский Н.П. Проектирование благоустройства автомобильных дорог. Москва: Высшая школа, 1974. – 136 с.
143. Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем. Москва: Мир, 1993. – 176 с.
144. Паламарчук В.О., Кореньюк П.І. Економіка природокористування. Запоріжжя: Дике Поле, 2003. – 408 с.
145. Поліщук В.П., Кунда Н.Т. Інформаційне забезпечення учасників дорожнього руху: навчальний посібник. - Київ: ІЗМН, 1998. -132 с.
146. Патент України №56323, МПК E01F15/00 Лісова газо-пилезахисна смуга автомобільної дороги. Україна. – u201007589; заявлено 10.06.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.
147. Патент України №72240, МПК E01C1/00 Модель автодорожньої мережі. Україна. – u201201400; заявлено 10.02.2012; опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.
148. Патент України №99998, МПК E01F8/00, A01C14/00 Лісова газо-пилезахисна смуга автомобільної дороги. Україна. – u201501052; заявлено 10.02.2015; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12.
149. Патент України №109012, МПК A01G23/00, E01C1/00 Газо-пилезахисна лісосмуга автомобільної дороги. Україна. – u201601003; заявлено 08.02.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. №15.
150. Петренко Н.О., Кустріч Л.О., Гоменюк М.О. Управління проектами. Київ: «Центр учбової літератури», 2015. – 244 с.
151. Писаренко Г.С., Агарев В.А, Квитка А.Л, Попков В.Г., Уманский Э.С. Сопротивление материалов. Киев: Вища школа, 1986. – 775 с.
152. Поповичева О.Б., Персианцева Н.М., Зубарева Н.А., Шония Н.К и др. Сажевые аэрозоли в верхней тропосфере: Свойства и последствия эмиссии. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова / Препринт НИИЯФ МГУ – 2005 – 17/783. – 83 с.
153. Примаков А.В., Щербань А.Н. Методы и средства контроля загрязнения атмосферы. Київ: Наукова думка, 1980. – 296 с.
154. Присяжнюк С.О., Шелудченко Ю.А., Васик Л.С. Еколандшафтні особливості лісової рекультивації земель. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2008. – 19 с.
155. Пряхин В.Д. Декоративное озеленение автомобильных дорог. Москва: Автотрансиздат, 1958. – 57 с.
156. Путилов К.А. Термодинамика. Москва: Наука, 1971. – 376 с.

157. Радкевич В.А. Экология. Москва: Высш. шк., 1998. – 94 с.
158. Рапута В.Ф., Коковин В.В., Шуваева О.В. Математические модели длительного загрязнения окрестностей автотрасс. *Труды Международной конференции RDAMM. – 2001. – Т. 6. – Ч. 2. Спец. выпуск.* – С. 348–350.
159. Ратобыльский В.С., Лярский П.А. Общее землеведение и краеведение Минск: «Высшая школа». – 416 с.
160. Регламент створення та експлуатації автоматизованих систем екологічного контролю і моніторингу об'єктів підвищеної екологічної безпеки. Є.М. Варламов, А.В. Чорна, О.О. Калініченко та ін. Київ: Мінприроди, 2009. – 46 с.
161. Реймерс М.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). Москва: Россия молодая, 1994. – 366 с.
162. Рекомендації по застосуванню ґраток композитних при влаштуванні асфальтобетонних шарів дорожніх одягів Р В.2.7 - 31911658 - 823: 2013.
163. Рідей Н.М., Горбатенко А.А., Строкаль В.П., Гринь Д.С. та ін. Геоінформаційний моніторинг екологічного стану локальних агроєкосистем. Херсон, 2013. – 236 с.
164. Рідей Н.М., Строкаль В.П., Рибалко Ю.В. Екологічна оцінка агробіоценозів: теорія, методика, практика. Херсон: Олдіплюс, 2011. – 568 с.
165. Радовенчик В.М., Радовенчик Я.В., Качула І.Г. Доступ до екологічної інформації в Україні. Вісник НТУ «КПІ». *Серія: Хімічна інженерія, екологія та збалансоване природокористування.* Київ: НТУ «КПІ». 2016. Вип. 1. С.75-80.
166. Рудько Г.І., Конструктивна геоєкологія: наукові основи та практичне втілення. [за ред. Г.І. Рудька]. Київ: ТОВ «Маклаут», 2008. – 320 с.
167. Рудько Г.І., Адаменко О.М. Землелогія. Еколого-ресурсна безпека Землі. [за ред. Г.І. Рудька]. Київ: Академпрес, 2009. – 512 с.
168. Рудько Г.І., Гошовський В.С. Екологічна безпека техноприродних геосистем адміністративних областей (на прикладі Львівської області). Київ: «Академпрес», 2009. – 192 с.
169. Сахаєв В.Г., Шевчук В.Я. Економіка і організація охорони навколишнього середовища. Київ: Вища школа, 1995. – 272 с.
170. Сычева А.В. Охрана природы и архитектура. Минск: Высшая школа, 1976. – 207 с.
171. Сиденко В.М., Технология строительства автомобильных дорог. Ч. 1. Технология строительства земляного полотна Київ: «Вища школа», 1970. – 236 с.
172. Сиденко В.М. Батраков О.Т., Леушин А.И. Технология строительства автомобильных дорог. Ч. 2. Технология

- строительства дорожных одежд. Київ: «Вища школа», 1970. – 328 с.
173. Сидоренко В.Ф., Балакин В.В., Фельдман Ю.Г. и др. Выбор для автомагистралей конструкций полос зеленых насаждений по их газозащитным свойствам. *Гигиена и санитария*. – № 4, 1978. С. 8–12.
174. Симонин С.И., Котов Ю.В., Срулевич А.А. Наглядные изображения при проектировании автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1975. – 128 с.
175. Сльоз А.М. Шелудченко Л.С. Аналіз рівнів екологічної небезпеки автодорожньої мережі. *Зб. наук. праць ПДАТУ: Спец. вип. до VIII наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування»*. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2013. – С. 215–217.
176. Смально Я.А. Ветрозащитные особенности лесных полос разных конструкций. Киев: Гос. издат. сельхозлитерат, 1963. – 193 с.
177. Степура В.С., Белятинський А.О., Кужель Н.В. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів. Київ: НАУ, 2013. – 204 с.
178. Сторожук В.М., Батлук В.А., Назарчук М.М. Промислова екологія. Львів: Українська академія друкарства, 2005. – 547 с.
179. Сухарев С.М., Чундак С.Ю., Сухарева О.Ю. Техноекологія та охорона навколишнього середовища. Львів: «Новий світ – 2000», 2004. – 256 с.
180. Титаренко М.В. Електротехніка. Житомир: ЖІТІ, 1999. – 224 с.
181. Трескинський С.А., Кудрявцев Г.П. Эстетика автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1978. – 200 с.
182. Троянський О.І., Дашковський О.А. Моніторинг якості повітря. Житомир: «Рута», 2006. – 108 с.
183. Федер Е. Фракталы. Москва: Мир, 1991. – 262 с.
184. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем. Успехи физических наук. – 1983, октябрь. www.doskanis.ru.
185. Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. Москва: Мир, 1997. – 232 с.
186. Физический энциклопедический словарь / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 193 с.
187. Фракталы в физике / Под. ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. Москва: Мир, 1988. – 670 с.
188. Хакен Г. Синергетика. Москва: Издательство «Мир», 1980. – 404 с.

189. Екологічна безпека та економіка: монографія / М.І. Сокур, В.М. Шмандій, Є.К. Бабець, В.С. Білецький, І.Є. Мельнікова, О.В. Харламова, Л.С. Шелудченко. – Кременчук, ПП Щербатих О.В., 2020. – 240 с.
190. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація. Київ: Знання, 2005. – 242 с.
191. Чернобаев И.П. Химия окружающей среды. Киев: Вища школа, 1990. – 191 с.
192. Шабетник В.Д. Фрактальная физика. Наука о мироздании. Москва: Тибр, 2000. – 416 с.
193. Шевчук В.Я., Саталкін Ю.М. Екологічне управління. Київ: Либідь, 2004. – 432 с.
194. Шелудченко Б.А., Бахмат М.І., Войцицький А.П. та ін. Інженерна екологія. Ч. 6. Нормування якості навколишнього середовища. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2007. – 172 с.
195. Шелудченко Б.А. Методологія досліджень екосистем. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2008. – 110 с.
196. Шелудченко Б.А., Тращ С.В., Шелудченко І.А. та ін. Надзвичайні ситуації природного і антропогенного характеру. За ред. Б.А. Шелудченко. Кам'янець-Подільський: ТОВ «Каліграф», 2012. – 150 с.
197. Шелудченко Б.А., Малиновський А.С., Зосимович М.В. та ін. Інженерна екологія. Ч. 1. Основи техноекології. За ред. Б.А. Шелудченко. Житомир: «Волинь», 1999. – 216 с.
198. Шелудченко Б.А., Шелудченко І.А., Павлів О.В. та ін. Загальне землезнаство. За ред. Б.А. Шелудченко. Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011 – 164 с.
199. Шелудченко Б.А. Інженерна екологія. Ч. 5. Фізика геосфер. Житомир: «Волинь», 2004. – 136 с.
200. Шелудченко Б.А., Основні фактори техногенної трансформації та забруднення літосфери. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2006. – 39 с.
201. Шелудченко Б.А., Васик Л.С., Шелудченко І.А. Екологічне обґрунтування раціональної структури втотранспортних комплексів. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2008. – 40 с.
202. Шелудченко Б.А. Перспективи використання фізичної симуляції процесів для дослідження динаміки фрактальних структур. *Зб. наук. праць ПДАТУ: Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування»*. Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2011. С. 151–155.
203. Шелудченко Б.А. Вступ до конструювання природно-техногенних геоекосистем (ландшафтно-територіальний аспект). Кам'янець-Подільський: Вид-во ПДАТУ, 2014. – 170 с.

204. Шелудченко Б.А., Шелудченко І.А., Шелудченко Л.С., Хабовський А.Е. Інженерна екологія Ч.Х: Параметри якості довкілля: метрологія, багатопараметричність, біоіндикація, моніторинг. Кам'янець-Подільський: Вид-во ПДАТУ, 2015. – 150 с.
205. Шелудченко Б.А., Васик Л.С. Обґрунтування параметрів конструкцій лісозахисних смуг автошляхової мережі. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсозбереження: наук.-техн. журнал*. Івано-Франківськ, 2010. – № 2. С.35-41.
206. Шелудченко Б.А., Васик Л.С. Фрактально-інваріантне обґрунтування моделювання лісозахисних смуг автотранспортної мережі. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету “Сучасні проблеми збалансованого природокористування – вип. V”*. Кам'янець-Подільський, 2010. – С. 135-137.
207. Шелудченко Б.А., Зеленський В.А., Васик Л.С. Конструктивна екологія – засади та принципи конструювання ПТГЕС. *Доповіді І-ї Міжн. наук.-практ. конф. “Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування – 2012”*. Івано-Франківськ, 2012. С.159-160.
208. Шелудченко Б.А., Васик Л.С. Аналітичне обґрунтування аналітичної моделі-симулятора автотранспортної ємності території. *Матеріали III міжн. наук.-практ. конф. “Сучасні проблеми збалансованого природокористування”*. Кам'янець-Подільський, 2008. – С. 94-101.
209. Шелудченко Л.С., Шмандій В.М. До питання забезпечення екологічної безпеки територій з розвинутою інфраструктурою автодорожньої мережі. *Збірник наукових праць VII-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю*. – Вінниця: ВНТУ, 2019.- С.26.
210. Шелудченко Б.А., Шелудченко Л.С. Механіка контактного руйнування автомобільних доріг. Кам'янець-Подільський: ТОВ “Каліграф”, 2016. – 66 с.
211. Шелудченко Б.А. Агромеханіка ґрунтів. Житомир: Полісся, 1992. – 249 с.
212. Шелудченко І.А., Васик Л.С. Модель ділянки автодорожньої мережі, як статично невизначена рамна система. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету “Сучасні проблеми збалансованого природокористування – вип. VII”*. Кам'янець-Подільський, 2012. С.159-161.
213. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Вознюк С.В. Аналітичне обґрунтування параметрів лакуарності лісових газо-пилозахисних смуг автомобільних доріг. *Наук.-техн. журнал “Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування” Спец. вип. – ІФНТУНГ*, Івано-Франківськ, 2014. С.56 - 60.
214. Шелудченко Л.С. Конструкційна реалізація модельного проекту лісової газо-пилозахисної смуги автошляхової мережі. *Зб. наук. праць ПДАТУ: Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні*

- проблеми збалансованого природокористування». Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2011. С. 179 – 182.*
215. Шелудченко Л.С. Обґрунтування еколога-ландшафтних параметрів та розроблення конструкцій газо-пилезахисних смуг автодорожньої мережі: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Кам'янець-Подільський, 2013. – 181с.
 216. Шелудченко Л.С. Розроблення конструкцій газо-пилезахисних лісосмуг автодорожньої мережі. Кам'янець-Подільський: Каліграф, 2015. – 134 с.
 217. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Вознюк С.В. Антропогенна трансформація ландшафтів. Межі ергодичності процесів трансформації та усереднення за часом. *Матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування”*. Київ: ДКЗ, 2015. С. 315-316.
 218. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Вознюк С.В. Екологічна ефективність газо-пилезахисних лісосмуг в інфраструктурі автомобільних доріг. *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції “Екологічний стан і здоров'я жителів міських екосистем. Горбуновські читання”*. Чернівці: “Місто”, 2016. С. 197-198.
 219. Шелудченко Л.С., Вознюк С.В. Оцінка впливу дорожньо-транспортного комплексу на якість атмосферного повітря м. Кам'янець-Подільський. *Міжгалузевий науково-практичний журнал “Проблеми науки”*. Київ: ЦНТІ № 9-10(177-178) / 2015, 2015. С.81-87.
 220. Шелудченко Л.С. Физическая симуляция внешних воздействий на опорный каркас территории. Сб. научн. раб. *Ставропольского государственного аграрного университета “Применение современных ресурсосберегающих технологий в АПК”*. Ставрополь: 2013. С. 279-282.
 221. Шелудченко Л.С. Автоматизоване проектування деревно-чагарникової газо-пилезахисної смуги автодорожньої мережі. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спец. вип. – ПДАТУ*. Кам'янець-Подільський, 2014. С.152-154.
 222. Шелудченко Л.С., Овчарук О.В., Носко В.Л. Аналітичне моделювання обсягів диспергування мінеральних речовин автотранспортним потоком при руйнуванні автодорожнього покриття. *Науковий журнал “Екологічна безпека”*. Кременчук: КрНУ, 2017 № 1/2017 (23). С. 58-62.
 223. Шелудченко Л.С. Використання лісових газо-пилезахисних смуг автомобільних доріг, як штучних геохімічних бар'єрів. *Тези доповідей Всеукраїнської наук.-практ. конф. “Екологічний стан і здоров'я жителів міських екосистем. Горбуновські читання”*. Чернівці: “Місто”, 2015. С. 178-179.

224. Шелудченко Л.С. Експлуатаційна надійність автомобільних доріг, як чинник екологічної безпеки. *Тези доповідей X Всеукраїнської наук.-практ. конф. "Екологічна безпека держави"*. Київ: НАУ, 2016. С. 11-12.
225. Шелудченко Л.С. Склад і структура пилових викидів автотранспортних потоків. *Тези доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми екологічної безпеки"*. Кременчук: КрНУ, 2016. С. 121.
226. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А. Експериментальна індикація динаміки ламінарно-турбулентних повітряних аерозольних викидів автотранспортних потоків. *Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. "Екогеофорум – 2017. Актуальні проблеми та інновації"*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С. 158-159.
227. Шелудченко Л.С., Вознюк С.В., Кобринська Л.В. Оцінка екологічних ризиків проектів лісових газо-пилозахисних смуг. *Зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. "Аграрна наука та освіта Поділля. Ч. I"*. Кам'янець-Подільський: Крок, ПДАТУ, 2017. С. 53-55.
228. Шелудченко Л.С. Автомобільні дороги: експлуатаційна надійність та екологічна безпека. Кам'янець-Подільський: В-во ПДАТУ, 2017. – 62 с.
229. Шелудченко Л.С. Еколого-економічна ефективність газо-пилозахисних смуг автодорожньої мережі. *Міжгалузевий наук.-практ. журнал "Проблеми науки"*. Київ: ЦНТІ № 4-5(172-173) / 2015, 2015. С. 72-74.
230. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Бахмат О.М. Моделювання і прогнозування динаміки природно-техногенних геоекосистем та ін. За ред. Б.А. Шелудченка. Кам'янець-Подільський: ТОВ "Каліграф", 2017. – 216 с.
231. Шелудченко Л.С. Дослідження матеріального балансу "пальне – викиди". Склад та обсяги шкідливих викидів, які продукуються автотранспортними потоками. *Наук.-техн. журнал "Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування" Вип. № 2 (16) – ІФНТУНГ*. Івано-Франківськ, 2017. С.133-140.
232. Шелудченко Л.С., Шмандій В.М., Ригас Т.Є. Екологічна небезпека експлуатаційного руйнування автомобільних доріг: монографія. LAP LAMBERT AcademicPublishing, 2017. – 93 с.
233. Шелудченко Л.С. Аналітичне оцінювання обсягів викидів диспергованої сажі автотранспортними потоками. *Наук.-практ. журнал "Екологічні науки" Вип. №3-4 2017 (18-19)*. Київ, 2017. С. 24-27.
234. Шелудченко Л.С. Екологічна безпека ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автотранспортними мережами. *Науковий журнал "Екологічна безпека"*. КрНУ, 2017 № 2/2017 (24). Кременчук: С. 9-13.

235. Шелудченко Л.С. Екологічна безпека автодорожньої мережі, як термодинамічної системи. *Тези доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми екологічної безпеки"*. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. – С. 75.
236. Шелудченко Л.С., Кобринська Л.В., Вознюк С.В. Дослідження матеріального балансу системи "паливо – викиди автотранспортних засобів". *Збірник наукових праць міжнародної наукової конференції до 117 річниці від дня народження академіка П.М. Василенка*. Кам'янець-Подільський, Тернопіль: Крок, 2017. С. 228-230.
237. Шелудченко Л.С. Екологічна безпека ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автодорожньою мережею. *Матеріали II-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції "Ефективне функціонування екологічно стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти"*. Полтава: ПДАА, 2017. С. 169-171.
238. Шелудченко Л.С., Чинчик О.С., Овчарук О.В., Носко В.Л. Еколого-технологічна оптимізація опорного каркасу автодорожньої мережі. *Раціональне використання ресурсів в умовах екологічно стабільних територій: колективна монографія* За ред. П.В. Писаренка, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава: ТОВ НВП Укрпромторгсервіс, 2018. С. 300-310.
239. Шелудченко Л.С., Овчарук О.В., Кобринська Л.М. Синхронізація колективного руху потоків автотранспортних засобів у вузлах автодорожньої мережі. *The international research and practical conference: "The development of technical sciences: problems and solutions"*. Brno: Baltija Publishing, 2018. P. 176-180.
240. Шелудченко Л.С. Динаміка емісії пилових аерозолів внаслідок трибологічного зношування дорожнього покриття автомобільної дороги рушієм автотранспортних засобів. *Науковий журнал "Екологічна безпека"*. Кременчук: КрНУ, 2018 № 1/2018 (25). С. 69-75.
241. Шелудченко Л.С. Екологічна безпека автодорожньої мережі, як відкритої термодинамічної системи. *Наук.-техн. журнал "Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування"*. Вип. №1 (17) – ІФНТУНГ, Івано-Франківськ, 2018. С.86 - 91.
242. Шелудченко Л.С. Чинчик О.С., Поліщук Д.В. Функціональні ознаки автотранспортного потоку та шляхи забезпечення екологічної безпеки природних територій. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 29 (68) №4 2018*. Частина 2, Київ, 2018. С. 163 – 167.
243. Шелудченко Л.С. Динамика миграции газопылевых аэрозолей, произведенных автотранспортными потоками. *Ежеквартальный научно-технический журнал «Гидрометеорология и экология» № 2 (89), Министерство энергетики Республики Казахстан,*

Республиканское государственное предприятие
«Казгидромет». Алматы, 2018. С. 52-63.

244. Шелудченко Л.С., Поліщук Д.В. Екологічна оцінка шумового забруднення міста, спричиненого діяльністю автотранспортних засобів і стаціонарних джерел. *Екологічні науки: науково-практичний журнал №4 (23)*. Київ: Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, 2018. С. 10-14.
245. Шмандій В.М., Шелудченко Л.С. Екологічна оцінка та прогнозування динаміки трансформації ландшафту під впливом дії автотранспортної мережі. *Науковий журнал "Екологічна безпека"*. Кременчук: КрНУ, 2018 № 2/2018 (26). С. 70-75.
246. Шелудченко Л.С. Экологическая характеристика конструкцией газопылезащитных лесополос автомобильных дорог // О.В. Овчарук, Л.С. Шелудченко, Т.Д. Гуцол // *European Journal of Intelligent Transportation Systems* 1(1), November 2018/ Р. 7-14.
247. Шелудченко Л.С., Поліщук Д.В., Комарницький С.П., Носко В.Л., Кобринська Л.В. Забезпечення експлуатаційної надійності конструкції автомобільних доріг шляхом дослідження її реологічних властивостей. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 29 (68) №6 2018. Частина 2*. Київ, 2018. С. 163 – 167.
248. Шелудченко Б.А., Кухарець С.М., Шелудченко Л.С., Ярош Я.Д., Білецький В.Р. Аеродинаміка газо-пилових повітряних аерозолів. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 95 с.
249. Шелудченко Л.С. Сучасні тенденції екологічної безпеки будівництва автомобільних доріг в транспортно-комунікаційних системах. *Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції "Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції"*. Кам'янець-Подільський, Тернопіль: Крок, 2018. – С. 40-42.
250. Шелудченко Л.С. Інформаційна модель міграції газо-пилових викидів в межах резервно-технологічних смуг автомобільних доріг. *Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції "Автомобільний транспорт та інфраструктура"*. Київ: НУБіП, 2018. С. 132-135.
251. Шелудченко Л.С. Динаміка міграційних процесів та депонування викидів, які продукуються автотранспортними потоками. *Матеріали наукових праць II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Хімія, екологія та освіта»*. Полтава: ПДАА, 2018. С. 57-60.
252. Шелудченко Л.С., Чинчик О.С., Плахтій Д.П. Оцінка пилового забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій в результаті руйнування дорожнього покриття автомобільних доріг. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і здобувачів вищої освіти «Актуальні проблеми соціально-гуманітарних і природничих наук в контексті сучасних*

- глобальних викликів». Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2018. С. 394-397.
253. Шелудченко Л.С., Комарніцький С.П., Поліщук Д.В. Еколого-технологічна оптимізація опорного каркасу автодорожньої мережі. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека, як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи»*. Львів: ЛДУБЖД, 2018. С. 195.
 254. Шелудченко Л.С., Комарніцький С.П., Замойський С.М. Теренов Т.Б. Екологічне оцінювання обсягів викидів диспергованої сажі потоками автотранспортних засобів. *Екологічні науки: науково-практичний журнал № 25*. Київ, 2019. С.
 255. Шевченко И.В. Проблемы мониторинга сложных технологических процессов и систем. *Актуальні питання та організаційно правові основи міжнародного співробітництва у сфері високих технологій: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ, 2014. С.81-84.
 256. Шищенко П.Г. Принципы и методы ландшафтного анализа в региональном проектировании. Киев. 1999. – 284 с.
 257. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики: ГОСТ 20444-85. [действующий от 1986-01-01]. Москва: Государственный комитет по правам строительства, 1986, 14 с.
 258. Шмандій В.М., Солошич І.О. Управління природоохоронною діяльністю. Київ: Центр навчальної літератури, 2004. – 296 с.
 259. Ямборак Р.С., Шелудченко Б.А., Шелудченко І.А. Інженерна екологія. Ч. 9. Хімічна екологія. За ред. Б.А. Шелудченко. Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О. В., 2011. – 164 с.
 260. Ямборак Р.С. Автоматизоване оцінювання та прогнозування гідрохімічного стану водних ресурсів Подільського Придністер'я: дис. на ... канд. географ. наук: спец. 11.00.11. Кам'янець-Подільський, 2007. – 209 с.
 261. Grytsenko A., Vnukova N., Barun M. Scientific Bases of Environmental Security Complex "Automobile – Road – Environment". *Sustainable Development*, 2014. – Vol. 17. P. 10-14.
 262. Tsunokava K., Christopher H. Roads and the Environment. 1997. - 217 p.
 263. Naumov V., Vnukova N., Zhelnovach G. Mozliwosci zastosowania sieci neuronowych do oceny bezpieczenstwa ekologicznego dróg na Ukrainie. *Budownictwo i Architektura: Collection of Scientific Works*, 2014. – Vol. 13(1). P. 339-347.
 264. Mann R. F. Global environmental Monitoring System (GEMS). Action Plan for Phase 1. SCORE. Rep. 3 / R. F. Mann. Toronto, 1973. – 130 p.

265. Zeiler M. Modeling our World. ESRI: Redlands, USA, 1999. – 202 p.
266. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Company, 1983. – 468 p.
267. Bakker H. Springer J., Hingst S. Aesthetic Consideration in the Design of Highway Approaches to Main River Crossings. Haag: Staatsnitgeverig, 1971. – 98 p.
268. Hyde N. Some Guidelines on Road Fences in the Landscape. Dublin: Foras Forbartha, 1973. – 32 p.
269. Lorenz H. Trassierung und Gestaltung von Strassen und Autobahnen. Wiesbaden: Bauverlag, 1971. – 98 p.
270. Bondarenko Yu., Vnukova N., Fedorchenko G., Zhelnovach O. Possibilities of ecological estimation of roadside soils contaminated at highway repair works. *Innovative Technologies and Perspectives of Transport, Automobile and Road-Building Industries: Collection of Scientific Works (in foreign languages) of Kharkiv National Automobile and Highway University*. Kharkiv, 2012. P. 75-77.
271. Vnukova N.V., Voronova Ye., Bondarenko J. Estimation of soils contamination of motorways roadside area. *Integration Processes and Innovative Technologies: Achievements and Processes of Engineering Sciences: Collection of scientific works (in foreign languages) of Kharkiv National Automobile and Highway University*. Kharkiv, 2013. P. 166-170.
272. Vnukova N.V., Gelnovatch A.N., Parkhin N.V. La route d'automobile en tant qu'un moyen la fragmentation des ecosystems. *Materialy V Mezinarodni vedecko-prakticka conference "Zprave vedecke ideje – 2009"*. Lekarstvi Biologicke vedy Ekologie Ztmtpis a Geologie Zemedelstvi. Praha, 2009. Dil. 11. P. 76-77.
273. Thom D. Roads in the Landscape. New Zealand Engineering № 9, 1970. P. 232–240.
274. Sheludchenko L., Voznyuk S. The aerodynamics of polluting aerosols in the maze of lacunar cavities gas – dust proofing strip of roads. *Buletin Stintific al Centrului Universitar Nord din Baia Mare, Seria D*. – publishing house of the technical university of clujnapoca – utpess, 2014.P. 63-70.
275. Sheludchenko L., Voznyuk S., Nosko V. The theoretical basis of the process of transport of contaminants in the prideaux-roznych landscapes in the presence of the dust belts. *Scientific journal "Ecological safety"*. Kremenчук: KrNU, 2015. – Number 1/2015 (19). P. 22-25.
276. Sheludchenko L., Voznyuk S. The results of analytical investigation of aerodynamic properties forest gas-dustproofing strips with artificially created lacunar cavities. *Scientific journal "Ecological safety"*. Kremenчук: KrNU, 2016. – Number 1/2015 (21). P.81-84.
277. Sheludchenko L. Dynamics modeling of traffic-related exhaust aerosol. *Scientific journal "Environmental problems" Vol. 2, №4*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. P. 191-194.

278. Sheludchenko L. Optimization of structural parameters of the cross-sectional profile of reserve and technological lanes of highways. *Intellectual Archive Bulletin (ID 1911)*, March 2018. – 6 с.: The Library and Archives Canada: collections.canada.gc.ca/ourl/res.php?url_ver=Z39.88.
279. Ivanyshyn V., Sheludchenko L., Hutsol T., Rud A., Skorobogatov D. Mass transfer management and deposition of contaminants within car road zones. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference / Volume 1. Rezekne Academy of Technologies*, (2019). P. 70-74.
280. Justus G.G. The spectrum and scales of upper atmospheric turbulence. *J. Geophys. Rec.* 1967. Vol. 72, № 7. P. 1933-1940.
281. A working definition of a-government, The future of A-government. New York, center for Technology in Government. 2003. [Електронний ресурс].
https://www.ctg.albany.edu/publications/reports/future_of_egov?chapter=2
282. A citizens` guide to EPAS` environmental appeals board, U.S. Environmental Protection Agency`s, 2013. [Електронний ресурс]. URL: <https://yosemite.epa.gov>.
283. Війна автострад і світ вибоїн: як будуються дороги в різних країнах. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ladk.lviv.ua/vijna-avtostrad-i-svit-vybojin-yak-buduyutsya-dorohy-v-riznyh-krajinah>.

*Наукове видання
ШЕЛУДЧЕНКО Леся Сергіївна*

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ
ГЕОЕКОСИСТЕМ З АВТОТРАНСПОРТНИМИ
МЕРЕЖАМИ**

*Макет
Кафедра транспортних технологій та засобів АПК
Закладу Вищої Освіти «Подільський Державний Університет»*

*Видавництво ХХХ
(свідоцтво ДК № ХХХХ від ХХХХХХ)
Вул.*

*Підписано до друку 17.01.2022. Формат 69×90/16
Папір офсетний. Гарнітура Ариал Кир. Друк цифровий
Ум. друк. арк. 14,1. Наклад 300 примірників*