

Зеленько Ю. В., д. т. н., професор кафедри «Хімія та інженерна екологія»,
Недужа Л. О., к. т. н., доцент кафедри «Будівельна механіка»,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (ДІІТ)

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ШУМОВИХ КАРТ ЗАЛІЗНИЦЬ

В умовах інтеграції України в Європейський Союз обґрунтовується необхідність вирішення питань захисту навколишнього природного середовища та сталого розвитку суспільства, яке повинно здійснюватися на рівні міжнародного співробітництва.

Позитивний досвід активної роботи України в Організації Співдружності залізниць свідчить про доцільність та перспективу вирішення на відповідному міждержавному рівні глобальних екологічних проблем, до яких, безперечно, належать і фізичні параметричні забруднення [1–3].

Офіційною статистикою підтверджено, що найбільш значимим джерелом шуму на селітебній території є транспорт. Незважаючи на якісні зміни у складі транспортних потоків міст, що сприяють зниженню шуму від кожного окремого транспортного засобу, збільшення загальної інтенсивності руху в містах негативно позначається на акустичному комфорті територій, що прилягають до залізничних магістралей.

Слід зазначити, що ефективність шумозахисних заходів буде значно вищою, якщо враховувати можливість шумового забруднення ще на етапі проектування. Таким чином, під час планування нових транспортних магістралей, житлової забудови чи розробки планів розвитку територій необхідно здійснити оцінку можливого негативного впливу шуму на приміагстральній території та визначити відповідність його значень нормам, установленим нормативними документами [4; 5].

У тому випадку, коли потрібно оцінити вплив певного джерела шуму на прилеглу територію, достатньо виконати натурні дослідження та провести подальший аналіз. Однак при прогнозі шумового впливу на житлову будівлю, що проектується, або в тому випадку, коли джерелом є транспортна магістраль, побудова якої планується, натурні до-

слідження не допоможуть. Результати макетного моделювання досліджуваної території в заглушеній камері можуть дати уявлення про поширення на ній шуму, проте цей підхід не завжди можна застосувати для дослідження значних за площею територій, оскільки моделювання забудови на обмеженому просторі камери є складним завданням.

До цього часу для вирішення завдання побудови карт шуму переважно використовуються інженерні методи розрахунку, які передбачають ручну працю фахівця для оцінки впливу шуму. Використання з цією метою ЕОМ було запропоновано досить давно.

Сьогодні існують програмні комплекси, що дозволяють виконати комп'ютерне моделювання приміагстральної території та визначити ступінь шумового забруднення. При цьому вирішальним фактором, що перешкоджає впровадженню подібних програмних продуктів у містобудівну діяльність нашої країни, залишається відсутність детальних комп'ютерних моделей місцевості, які дозволяють зробити точне моделювання процесу поширення звуку. Крім того, висока трудомісткість існуючих методів потребує відповідного апаратного забезпечення. Ще однією негативною рисою сучасних програмних комплексів є використання традиційних інженерних прийомів, що погано піддаються алгоритмізації й не мають достатньо формальних критеріїв. Використання емпіричних алгоритмів має потенційну проблему низької точності й малої достовірності [1; 5].

Одним з альтернативних ефективних розв'язань задач моделювання транс-

портних шумів є метод прямого трасування променів на векторно-растрових моделях, що забезпечує відносно високу достовірність результатів. Такий підхід є основою для розробленого ітеративного алгоритму розрахунку еквівалентних рівнів шумового забруднення селітебної території від транспортного шуму [1–3].

Алгоритм, описаний у роботах [1; 6], завдяки детальному розгляду ключових кроків дає можливість проаналізувати різні аспекти реалізації з виділенням ключових етапів. Для базової версії алгоритму наведена оцінка максимальної трудомісткості та варіації алгоритму, що враховують додаткові критерії. Як приклад реалізації алгоритму для паралельних обчислень пропонуються варіанти алгоритму для SMP і кластерних обчислювальних систем.

Прикладом програмної реалізації запропонованого в названих роботах алгоритму є програма розрахунку еквівалентних рівнів шумового забруднення Noise Tracer. Програма розрахована на роботу з попередньо заданою векторно-растровою моделлю даних і дозволяє використовувати карту висот і поверховості для моделювання місцевості. Як атрибутивну складову використовують RGB канали растрової суб-моделі, що дозволяє задавати різні характеристики об'єктів без виділення додаткової пам'яті.

Результати роботи програми відображаються на растровій карті, на якій наведено значення еквівалентного шуму в кожній вихідній точці. Ця карта може бути подана у вигляді зображення, на якому інтенсивність каналу (червоного

кольору) відображає рівень шумового забруднення в кожній конкретній точці, або у вигляді набору ізоліній, які задають набори точок з однаковими рівнями еквівалентного шуму.

На жаль, сьогодні проведення екологічних досліджень, як і раніше, є мало автоматизованим процесом, що потребує значних витрат часу й коштів. При цьому якщо під час польових досліджень застосовувати сучасну вимірвальну техніку, то подальший аналіз зазвичай виконується експертом вручну або з використанням стандартних геоінформаційних систем (ГІС).

Сьогодні існує ціла низка причин, що перешкоджають створенню та використанню автоматизованих засобів розрахунку й моделювання забруднення навколишнього середовища. Головна причина полягає в тому, що завдання оцінки впливу на навколишнє середовище (ОВНС) характеризуються великим обсягом допоміжних обчислень. При цьому для досягнення точних результатів моделювання процес розрахунку може бути ітеративним. Для використання таких систем моделювання необхідні значні обчислювальні ресурси.

Інша можлива причина полягає у підвищених вимогах до точності вихідних картографічних даних. Створення точних моделей місцевості є досить важким завданням, а існуючі цифрові карти міст часто або відсутні, або мають низьку точність.

У той час як програмні продукти, які вирішують окремі завдання ОВНС, закордонних компаній мало поширені в нашій країні через високу вартість ліцензії, продукти власної розробки застосовуються лише проєктувальними бюро та експертними центрами. Але в цілому ця сфера автоматизованих

систем розрахунку факторів забруднення не достатньо розвинена.

Перспективним напрямком у цій галузі може виявитися створення напівавтоматизованих програмних продуктів, що прискорюють роботу експерта, однак не є повністю автономними системами. У цьому випадку може бути досягнуто певний компроміс між ефективністю розрахунку на ЕОМ без використання значних обчислювальних потужностей і необхідністю використання ручної праці фахівця.

Зараз існує два принципових підходи до вирішення завдання оцінки шумового впливу транспортних потоків на прилеглу територію. Обидва забезпечують моделювання процесу поширення шуму.

Найбільш загальним є безпосереднє моделювання фізичного процесу поширення шуму від джерела у вигляді транспортних засобів на магістралі до точок оцінювання, розташованих на прилеглий території. Математичний апарат, використовуваний у рамках цього підходу, може відрізнитися. Але в основі всіх варіантів лежить хвильове рівняння, отримане із закону рівноваги сил для нескінченно малої частки середовища (рівняння Ейлера) і закону збереження маси. Однак окремі особливості поширення звукових хвиль можуть уточнюватися окремо. Так, для оцінки впливу відбитого шуму між шумозахисними екранами й забудовою першого ешелону може бути використана дифузна модель розподілу відбитої енергії або модель, що базується на інтегральному рівнянні Куттруфа. Крім того, у рамках цього підходу беруться до уваги такі основоположні фактори:

- відбивання звукових хвиль від фасадів будівель й екранів;

- дифракція для різних довжин хвиль.

Зазначений підхід потенційно забезпечує високу достовірність отриманих результатів, оскільки передбачає точне моделювання поширення звукових хвиль. Однак цей підхід досить складний у реалізації на ЕОМ. Головним недоліком є висока трудомісткість. Застосовується алгоритмічний підхід, що дозволяє розраховувати поширення звукових хвиль на основі передачі енергії (аналог Radiosity), цей метод сам по собі є досить складним та трудомістким завданням.

Під час моделювання поширення шуму потрібно брати до уваги такі фактори: залежність процесів поширення звуку від частоти, різні характеристики атмосфери як середовища поширення шуму тощо. Для урахування більшості цих факторів потрібно розв'язати низку диференціальних та інтегральних рівнянь, що описують процес поширення звукової хвилі. Ще однією складністю на шляху використання цього підходу є те, що він досить чутливий до точності комп'ютерної моделі місцевості, на якій виконується моделювання. Урахування характеру підстильної поверхні, характеру озеленення, наявності екранувальних споруд також потребує додаткових обчислювальних ресурсів.

У тих випадках, коли безпосереднє моделювання процесу поширення шуму не є доцільним, може бути застосований інший підхід. Він базується на використанні статистичних оцінок, які характеризують типові джерела транспортного шуму в містах й особливості поширення звукових хвиль на селітебній території. Існуюча класифікація алгоритмів наведена на рисунку 1.

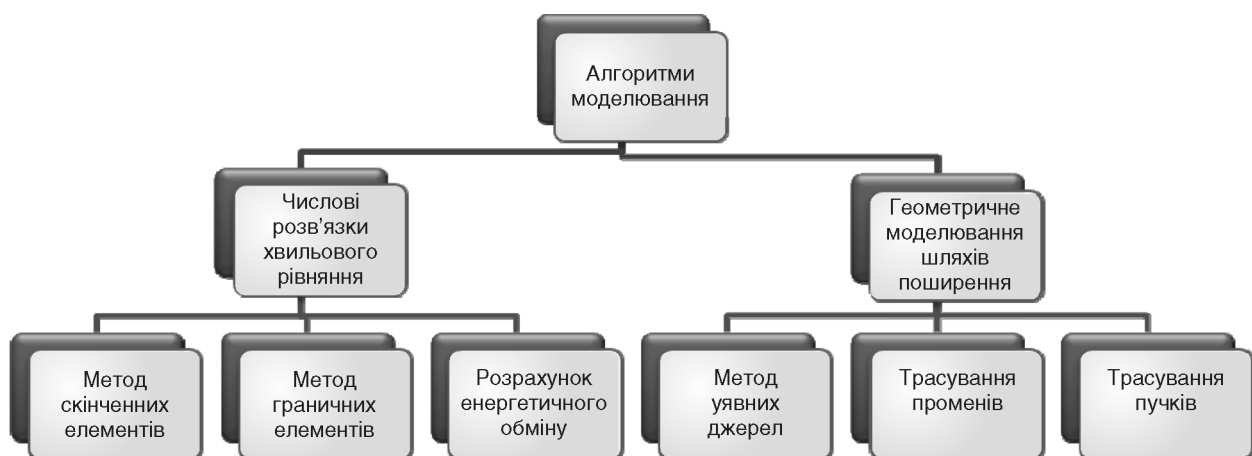


Рис. 1. Класифікація алгоритмів

Незважаючи на деякі складності використання прямого моделювання поширення звукових хвиль на ЕОМ, існує низка програмних реалізацій. Однією з перших була система макетного моделювання BRUIT, впроваджена ще у 80-х роках ХХ ст. Незважаючи на те що в цій розрахунковій системі було допущено ряд спрощень і використовувалася схематична модель місцевості, вона дозволяла ефективно моделювати процес зашумлення примігстральної території [1].

Із сучасних систем цього класу можна відзначити FHWA Traffic Noise Model, розроблену на замовлення Федерального управління магістралями (підрозділ Департаменту транспорту США). До особливостей цього програмного комплексу можна віднести моделювання п'яти різних видів автотранспортних засобів, розрахунок для безперервного й переривчастого транспортного потоку. Аналіз різного профілю дороги й урахування шумозахисних бар'єрів також передбачено цим програмним пакетом.

Серед програмних продуктів, які використовують статистичні оцінки для моделювання шумового забруднення можна відзначити продукти компанії «Інтеграл» (м. Санкт-Петербург) та «Сітіс» (м. Єкатеринбург) [1; 4; 6].

Програмний модуль «Розрахунок шуму від транспортних потоків» компанії «Інтеграл» є типовим прикладом. Цей розрахунковий модуль, призначений для розрахунків шумових характеристик автомагістралей, урахує такі види транспорту:

- легкові та вантажні автомобілі;
- трамваї;
- залізничні потяги.

Цей програмний продукт розглядає транспортну магістраль як одне або кілька лінійно-протяжних джерел шуму, характеристики яких обчислюються на основі інтенсивності й швидкості руху кожного виду транспорту. Як алгоритм розрахунку використовується підхід, регламентований СНіП у поєднанні з емпіричними алгоритмами, що спрощують процес моделювання [1].

Основні принципи моделі поширення шуму, рекомендовані чинним законодавством, описані в колективній монографії під редакцією Г. Л. Осипова та Є. Я. Юдіна [4].

Використовуючи математичний апарат монографії, можна зробити оцінку рівня зашумлення на примігстральній території й визначити межі гранично допустимих рівнів шуму, які встановлені нормативною базою.

До недоліків цього підходу можна віднести те, що він не дозволяє врахо-

увати шум, відбитий від сусідніх будівель. Відсутня й можливість урахування поширення шуму за межами прямої видимості за рахунок дифракції. І хоча запропоновані формули допускають додаткове урахування факторів, що сприяють зниженню шуму, у цілому вони не можуть забезпечити високу точність розрахунку. Авторами підходу передбачалося компенсувати це статистичними поправками, проте вони були достовірні лише на період, коли методика була розроблена, для існуючих тоді характеристик транспортних потоків. Зараз для транспортних засобів законодавчо встановлені значно жорсткіші вимоги до впливу на навколишнє середовище. Існують і якісні зміни в складі транспортних потоків за минулий період із моменту визначення цих статистичних поправок. Так, значна частина вантажного транспорту була виведена з центральних частин міста. Крім того, знизився шум від окремих середньостатистичних транспортних засобів сучасного виробництва. Але в цілому за рахунок значного збільшення інтенсивності руху транспортних потоків ситуація і сьогодні залишається складною. Таким чином, реальна картина шумового забруднення може відрізнятись від отриманих за цією методикою результатів. Для ефективного використання зазначеної методики необхідний перегляд статистичних поправок.

Специфічною особливістю програмних реалізацій різних методик вирішення завдань ОВНС є те, що якщо всі розрахунки переважно виконуються на точній векторній моделі, то кінцевий результат все одно доцільніше зображувати на растровій моделі. Це пояснюється тим, що кінцевою метою таких завдань є знаходження областей з певним значенням показника. При цьому висока точність завдання такої області часто не потрібна.

Форму комірки, оптимальної з позиції співвідношення точність / швидкість для розрахунків з ОВНС, зазвичай вибирають квадратною зі сторонами від 1 м і більше. Точний розмір залежить від вигляду розрахунку ОВНС та масштабу розв'язуваної задачі.

Таким чином, логічним є спільне застосування векторної (для завдання вихідних даних) і растрової (для представлення результатів розрахунків) моделей даних при розв'язанні однієї задачі.

У процесі виконання різних обчислень за растровою моделлю часто виникає необхідність переходу від осередків растрової моделі до вихідних векторних об'єктів. Такі можливості надаються стандартними засобами растрових ГІС.

Досвід останніх десятиліть показує, що розробки звичайних шумоізоляційних пристроїв із позиції вибору матеріалу, формоутворення й місця розташування щодо осі випромінювання звуку стали більш вдосконаленими й значно впливають на акустику.

Нові параметри шумовипромінювання, а значить, й ефективність ужитих заходів щодо зниження його рівня визначають, як уже засвідчувалося, виходячи з рентабельності й зростаючих екологічних вимог.

Цілком зрозуміло, що розрахунок потрібно починати на відповідній моделі, щоб визначити, якою мірою можна зменшити акустично активну площу шумозахисних огорожень, щоб їх дія залишалася достатньо ефективною. З цією метою в Австрії за дорученням керівництва ÖBB (Австрійська федеральна залізниця) протягом останніх років компанією-оператором інфраструктури ÖBB Infrastruktur була проведена низка досліджень, у тому числі реалізовано проект «Визначення впливу на інвестиції ÖBB Infrastruktur Bau шумозахисних заходів на вантажних поїздах».

Для сценарію «Нічний вантажний поїзд» було розглянуто 45 базових ділянок мережі ÖBB і визначено, наскільки можна скоротити акустично активну площу шумозахисних стінок за рахунок використання на рухомому складі різних пристроїв, що знижують шум (зокрема, гальмівних колодок із накладками типів K і LL).

Розрахунок на моделі для використовуваних або планованих проектів захисту від шуму на мережі ÖBB дав такі результати: за рахунок зниження рівня випромінювання шуму у всьому вантажному парку на 8 дБ (А) можна зменшити витрати більше ніж на третину (на 43%), які були б потрібні на інфраструктурні заходи шумозахисту.

За рахунок оснащення всіх видів рухомого складу сучасним шумозахисним обладнанням (дискові гальма, композиційні гальмівні накладки) можна знизити приблизно на дві третини (66%) витрати на інфраструктурні заходи та спорудження шумозахисних стінок й установку в довколишніх будинках шумоізоляційних вікон [1; 5].

У період дослідження середній розмір витрат на шумозахист становив €30 млн на рік. У перерахунку результатів дослідження на цю середню величину маємо, що залежно від сценарію економія витрат могла б скласти відповідно €10 і €17 млн.

Відповідно до директиви про оцінку та управління шумом 2002/49/ЕС, у країнах-членах Євросоюзу, у яких не розроблено свій національний метод оцінки залізничного шуму, рекомендовано до застосування нідерландський

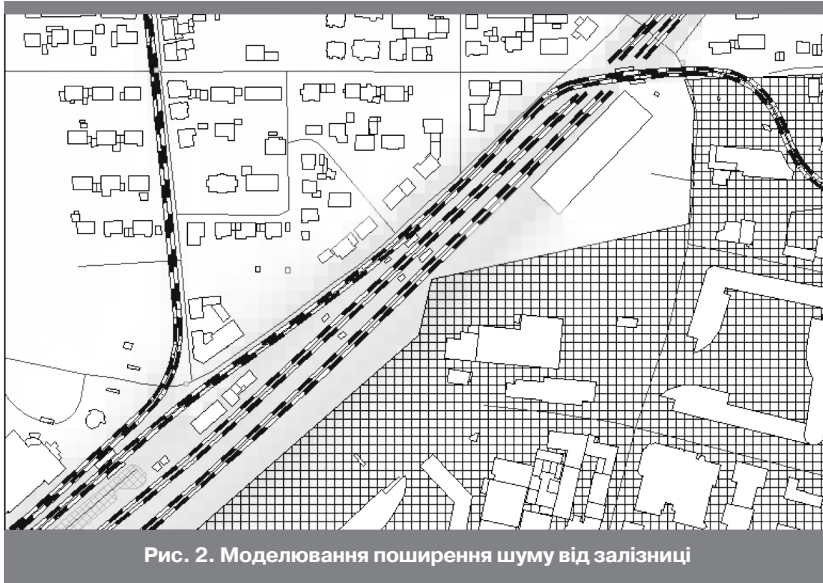


Рис. 2. Моделювання поширення шуму від залізниці

метод — RMR. Приклад моделювання поширення шуму від залізниці наведено на рисунку 2 [1].

Метою моделювання акустики є:

- оцінка рівня віброакустичних перешкод у досліджуваній точці без значних часових, ресурсних і грошових витрат, які необхідні для інструментальних вимірювань;
- забезпечення можливості аналізу різних віброакустичних сценаріїв (рис. 3);
- можливість оцінки віброакустичних параметрів для проєктованого об'єкта або потенційного джерела шуму.

Програмне забезпечення віброакустичного моделювання обчислює залізничний шум відповідно до національних та міжнародних директив або таких чинних методик і процедур, як наприклад, Schall 03 (D), NMPB-Fer (Fr), DIN 18005 (D), CRN (UK), SRM II (Interim method for EU), ÖNorm S 5011 (A), Semibel (CH) [1; 5; 7].

На рисунку 3 зображено приклад побудови шумової карти в новобудовах поруч із Мюнхенським Центральним вокзалом (Німеччина), виконаний з використанням програми CadnaA-model зі споруджуваним символом оцінки для низки будівель. Ця програма передбачає порядок виконання таких операцій: імпортування даних; перевірка та удосконалення моделі; обчислення горизонтальних решіток (для кожного шумового типу, для повного шуму — побудова стратегічних шумових карт); обчислення шумових характеристик на фасадах; імпорт або оцінка резидентів у кожній будівлі; розрахунок поширення (інтерференції і дифракції) звукових хвиль; модифікація шумової карти з використанням результатів вимірювань.

Порядок формування шумових карт базується на детальному вивченні позиціонування досліджуваного об'єкта й пошаровому накладенні організо-

ваних у бази даних обсягів інформації (рис. 4) [1].

Сьогодні найбільш перспективним є моделювання на базі геоінформаційних (GIS) систем (рис. 4).

Основна перевага шумових карт — можливість імпортування та обробки даних для об'єкта будь-якої площі, у тому числі й для держави в цілому.

На рисунку 5 наведено приклади візуалізації моделювання віброакустичних параметрів рухомого складу [1].

Крім віброакустичних параметрів, зовні рухомого складу з метою забезпечення комфорту пасажирів необхідно оцінювати й контролювати віброакустичний комфорт вагонів.

Віброакустичний комфорт усередині вагонів тісно пов'язаний із двома чинниками:

- вібраційні характеристики конструкції (структурна жорсткість кузова);
- зміна вібраційних та акустичних характеристик внутрішніх покриттів та устаткування.

Для зниження рівня вібрації й шуму компанія Talgo розробляє віброакустичні моделі, у яких ураховуються обидва чинники, і які, завдяки симуляційним методам контрастування (методи кінцевих і граничних елементів, статистичний енергоаналіз) та експериментальному аналізу реальних поїздів, дозволяють:

- спрогнозувати рівень шуму всередині вагонів;
- урахувати критерій максимального зниження шуму в процесі проєктування нової продукції;
- оптимізувати характеристики представлених на ринку поїздів, які переобладнуються.

Віброакустичні характеристики транспортного засобу значною мірою залежать від різних навантажень, яких

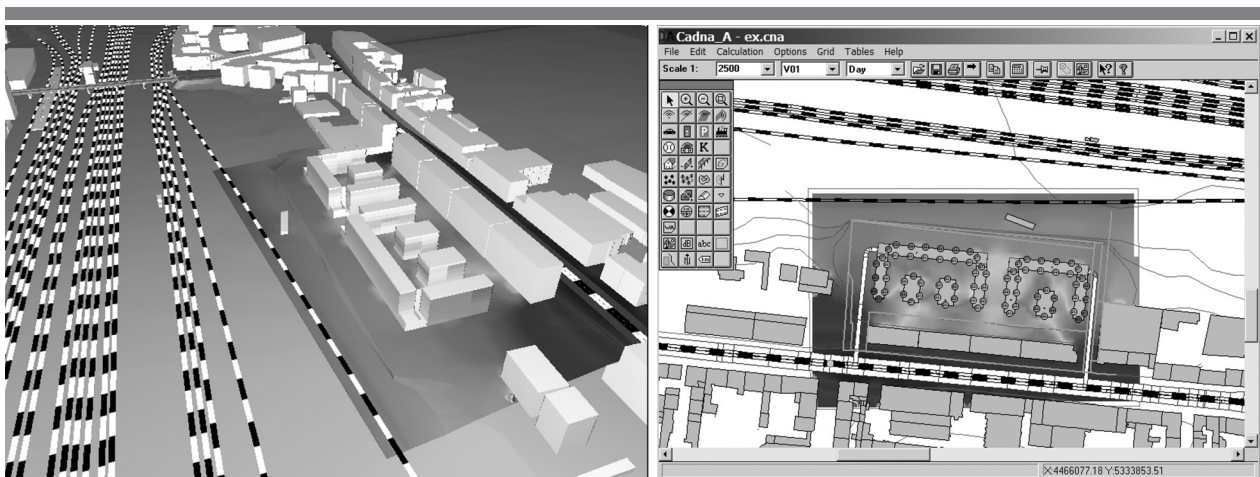


Рис. 3. Приклад результатів моделювання шуму поруч із залізничним вокзалом

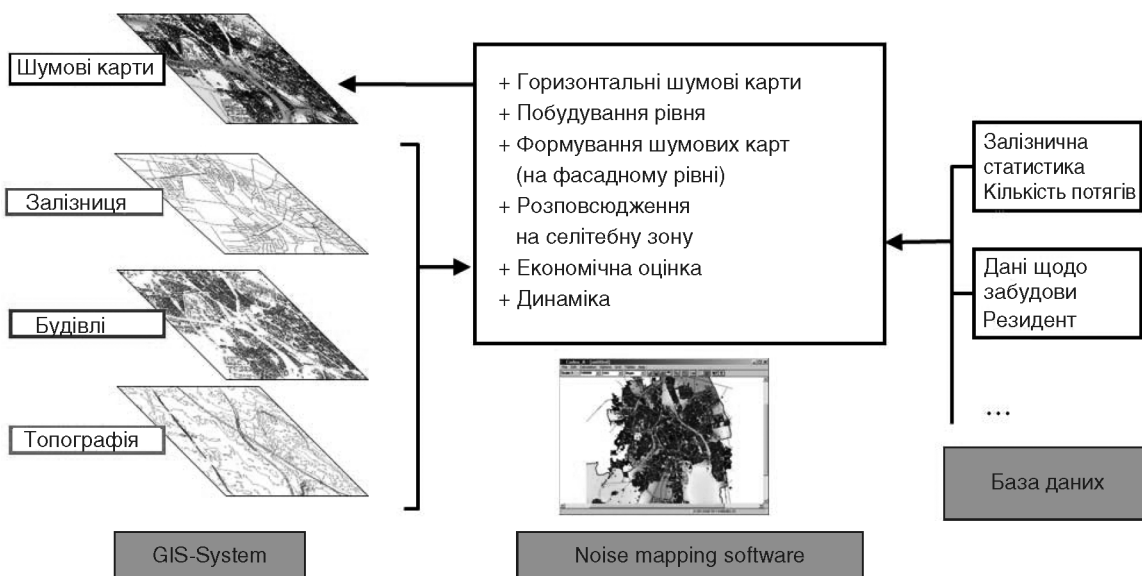


Рис. 4. Взаємодія GIS — шумові карти та їх програмне забезпечення

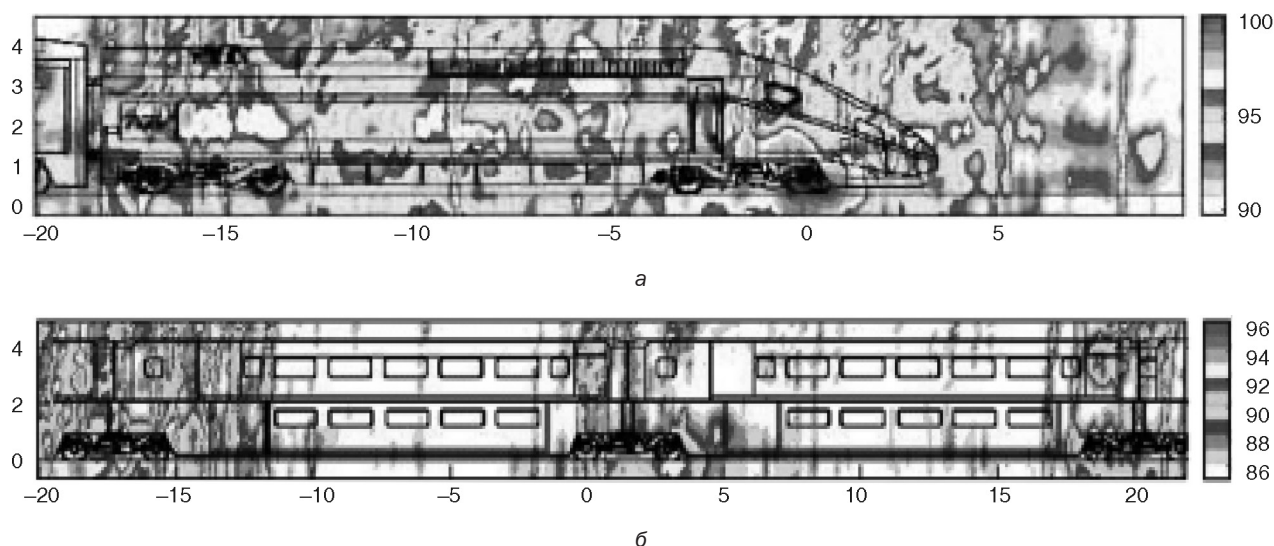


Рис. 5. Приклад побудови фронтальних шумових карт під час руху швидкісного поїзда зі швидкістю $v = 250$ км/год: а — локомотив; б — вагон

зазнає його конструкція, і від складних результатуючих взаємодій між численними компонентами та з'єднаннями. Тому правильним був би підхід до проектування з урахуванням шуму й вібрації у формі оптимізації транспортного засобу як загальної системи, починаючи з найбільш ранніх стадій розробки концепції.

Локомотив

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Мямлін С. В. Параметрична екологія на залізничному транспорті. Принципи, оцінка,

контроль, безпека : монографія / С. В. Мямлін, Ю. В. Зеленюк, Л. О. Недужа. — Д. : Літограф, 2014. — 203 с.
 2. Попов В. И., Балцкарс П. Я., Барановский А. Е. Шум от железнодорожного транспорта. Математическая модель CRN. In: 47nd. International Scientific Conference. October 11-13, 2008, Riga: Scientific proceedings of Riga Technical University, Transport and Engineering, Railway Transport, Sērija 6, Sejums 12, 2008. (CD-ROM).
 3. Шум от грузовых поездов // Железные дороги мира. — 2013. — № 8. — С. 54-56.
 4. Снижение шума в зданиях и жилых районах / под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. — М. : Стройиздат, 1987. — 558 с.

5. Шумозащитные мероприятия для зданий на приагистральных территориях городов / С. Н. Овсянников, А. С. Самохвалов, В. П. Мельник, М. С. Овсянников // Вестник Том. гос. архитектурно-строительного ун-та, 2007. — № 3.
 6. Программный модуль «Расчет шума от транспортных потоков» / Фирма «Интеграл», Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.integral.ru/program.php?action=proglis&id_rzd=13&id_prog=100
 7. Системная оценка мероприятий по защите от шума // Железные дороги мира, 2013. — № 6. — С. 72-77.

Отримано 01.06.2015