

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут екологічної безпеки
Кафедра безпеки життєдіяльності

На правах рукопису

Шевченко Юлія Сергіївна

УДК 504.055:004.94

**Розробка моделей оцінки та підвищення ефективності зниження шуму
транспортних потоків**

Спеціальність 21.06.01 «Екологічна безпека»

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор,
Токарев Вадим Іванович

**Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

Матвєєва І.В.

Київ – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПОТОЧНИЙ СТАН МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТА ЗНИЖЕННЯ МІСЬКОГО ШУМУ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ	12
1.1. Проблеми транспортного шуму у сучасному місті.....	12
1.2. Аналіз джерел шуму міського транспорту і моделей оцінки його впливу на навколишнє середовище	15
1.2.1. Проблеми моделювання шуму автомобільного транспорту.....	16
1.2.2. Аналіз методів оцінки ефектів інтерференції, дифракції, дивергенції, поглинання звуку при його розповсюдженні в умовах міста	24
ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 1	44
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ШУМУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ....	45
2.1. Розробка математичної моделі шуму транспортних потоків як лінійного некогерентного джерела шуму	45
2.1.1. Постановка задачі моделювання шуму транспортних потоків	45
2.1.2. Математична модель шуму транспортних потоків	47
2.2. Верифікація математичної моделі шуму транспортних потоків.....	54
2.2.1. Експериментальних досліджень характеристик шуму окремого транспортного засобу.....	55
2.2.2. Апробація макроскопічних залежностей розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків	61
2.2.3. Апробація розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків	64
2.3. Параметричне дослідження математичної моделі транспортного потоку	65
2.3.1. Параметричне дослідження впливу характеристик руху автомобіля на потужності окремого транспортного засобу	66
2.3.2. Параметричне дослідження макроскопічних залежностей параметрів транспортних потоків	73
2.3.3. Параметричне дослідження чисельної моделі лінійного некогерентного джерела шуму – транспортного потоку	78

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 2	80
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ШУМУ В МІСТІ.....	82
3.1. Постановка задачі оцінювання ефектів зниження шуму на шляху його розповсюдження.....	82
3.2. Розробка удосконаленої математичної моделі формування звукових полів перед напівнескінченними імпедансними відбивачами	86
3.2.1. Математична модель формування звукових полів перед напівнескінченними імпедансними відбивачами	86
3.2.2. Апробація математичної моделі формування звукових полів перед напівнескінченними відбивачами.....	90
3.3. Моделювання зниження шуму в результаті ефектів дифракції на кромках акустичних екранах.....	99
3.3.1. Удосконалена модель тонкого акустичного екрану кінцевої довжини на імпедансній поверхні	99
3.3.2. Удосконалена модель акустичного екрану кінцевої довжини та кінцевої товщини на імпедансній поверхні	102
3.3.3. Верифікація математичних моделей зниження шуму на кромках тонкого акустичного екрану та екрану кінцевих розмірів.....	104
3.4. Параметричне дослідження ефектів зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача з використанням запропонованої моделі	107
3.4.1. Дослідження формування звукового поля на вулицях міста	110
3.5. Моделювання проходження шуму в приміщення	115
ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 3	117
РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗВУКОВИХ ПОЛІВ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	119
4.1. Розробка комплексної моделі формування звукових полів у міському середовищі	119
4.1.1. Розробка моделі розрахунку рівнів шуму для міського середовища	119
ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 4.....	145
4.1.2. Порівняння розробленої комплексної моделі з результатами чисельного моделювання.....	125

4.2. Картографування шуму як інструмент забезпечення екологічної безпеки та прогнозування акустичного забруднення сучасних міст.....	129
4.2.1. Формулювання удосконаленого методу картографування шуму.....	129
4.2.2. Дослідження трьохмірних мап шуму для поздовжнього та поперечного перерізів вулиць міста.....	133
РОЗДІЛ 5.....	147
РОЗРОБКА МЕТОДУ РАНЖУВАННЯ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ШУМУ В ЖИТЛОВОМУ ПРИМІЩЕННІ ТА НА ТЕРИТОРІЇ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ.....	147
5.1. Екологічна оцінка методів зниження внеску транспортного шуму.....	147
5.1.1. Математичне формулювання задачі спільної оцінки методів зниження транспортного шуму в житловому приміщенні та на території житлової забудови.....	147
5.1.2. Дослідження ефективного часу автомобілів різних категорій.....	151
5.1.3. Дослідження відносного внеску j -го методу зменшення шуму в загальне акустичне поле.....	154
5.2. Оцінювання ризику здоров'ю населення від впливу шуму автомобільного транспорту.....	160.
ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 5.....	166
ВИСНОВКИ.....	167
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	170
Додаток А (до розділу 2).....	189
Додаток Б (до розділу 3).....	200
Додаток В (до розділу 4).....	216
ДОДАТОК Д (до розділу 5).....	218
Додаток Ж Структура програми USScare розробленої в дисертаційній роботі на основі проведених досліджень.....	221
Додаток З Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	226

ВСТУП

Актуальність теми. Постійно зростаюча інтенсивність транспортних потоків щорічно супроводжуються посиленням техногенного навантаження на населення сучасних міст. На долю автомобільного транспорту припадає 60-80 % екологічного забруднення навколишнього середовища, у тому числі й акустичного.

Для України проблема посилення шумового навантаження на навколишнє середовище та населення, що мешкає в містах, набуває особливої актуальності у зв'язку зі зростанням інтенсивності транспортних потоків, наближення житлової забудови до лінії джерела шуму, підвищення густини забудови та появи додаткових поверхонь відбивання, що призводить до підвищення рівнів шуму на 3–4 дБ. Як результат, виникла необхідність оцінювання рівнів шумового навантаження не лише для стандартної висоти оцінювання 1,2–1,5 м, але і для змінюваної висоти приймача шуму для багатоповерхових будівель.

Аналіз результатів розрахунків та експериментальних досліджень рівнів шуму в містах показав, що рівні шуму на найбільш навантажених територіях житлової забудови не відповідають встановленим санітарно-гігієнічним нормативам. Ефективним підходом до вирішення проблеми може стати подальший розвиток існуючих підходів моделювання шуму автомобільного транспорту та науково обґрунтоване використання методів зниження шумового навантаження.

Таким чином, на даний час існує необхідність вирішення актуального наукового завдання, яке полягає в удосконаленні існуючих моделей оцінювання рівнів шуму на території житлової забудови та підвищенні ефективності зниження шумового навантаження на довкілля та населення існуючими методами, що спрямовані на підвищення екологічної безпеки міського середовища.

Зв'язок роботи з науково-технічними програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною темою № 622–X09

«Обґрунтувати аналітичні матеріали для рекомендацій щодо проектування екранів для захисту від впливу дорожнього шуму» (номер держреєстрації 0109U007450), темою №661–ДБ10 «Наукові засади, методологія та рекомендації щодо оптимізації міської інфраструктури в контексті впливу на довкілля» (номер держреєстрації 0110U000214) та темою «Комплексний розвиток Бурштина: місто для життя» (проспект концепції перспективного розвитку міста та околиць) (номер держреєстрації 0110U000214). Автор брала безпосередню участь в розробці математичних моделей, проведенні експериментальних досліджень та створенні карти шуму.

Мета дисертаційної роботи – зниження шумового навантаження від автомобільного транспорту в міському середовищі шляхом удосконалення інструментарію оцінки рівнів шуму та підвищення ефективності використання методів зниження шуму.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **завдання**:

1. Удосконалити модель шуму транспортних потоків з врахуванням особливостей руху автомобільного транспорту в потоці на основі базових моделей акустичної потужності транспортних засобів з використанням чисельного моделювання лінії джерела шуму в точці прийому.

2. Розробити математичну модель для оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель для одного та двох паралельних фасадів шляхом врахування імпедансних характеристик відбиваючих поверхонь.

3. Досконалити моделі оцінювання ефективності акустичних екранів, що розташовані на імпедансній поверхні землі шляхом оцінювання додаткових шляхів поширення шуму через кромки екранів для тонкого акустичного екрану та екранів кінцевих розмірів.

4. Обґрунтувати комплексну модель оцінювання рівнів шуму в міському середовищі на основі використання уточнених моделей оцінювання шуму автомобільного транспорту та ефектів поширення шуму вздовж транспортних шляхів та на території житлової забудови.

5. Удосконалити метод картографування шуму в міському середовищі, враховуючи особливості транспортних потоків, стану дорожніх покриттів та характеристик поширення шуму в зоні високоповерхової забудови.

6. Оцінити екологічні ризики несприятливого впливу шуму автомобільного транспорту на здоров'я населення міст.

7. Обґрунтувати ефективне використання методів зниження шуму шляхом розробки методу вибору найоптимальніших з точки зору екологічної безпеки та економічної ефективності методів зниження шуму в житловому приміщенні та на території житлової забудови.

Об'єкт дослідження дисертаційної роботи – шумове забруднення навколишнього середовища від транспортних потоків на території сучасних міст.

Предметом дослідження є математичне моделювання шуму від транспортних потоків, ефектів його поширення від джерела шуму до приймача та методи зниження транспортного шуму як фактора екологічної безпеки.

Методи дослідження: технічні та програмні засоби: математичне моделювання формування звукових полів з метою оцінювання стану навколишнього середовища, розробка програмних засобів, які реалізують запропоновані алгоритми, експериментальне обґрунтування отриманих аналітичних розв'язків. При цьому використовується аналітичний та емпіричний підходи з метою дослідження шуму створюваного транспортними потоками та оцінювання екологічних ризиків; ентропійний метод моделювання складних систем використовувався для вибору оптимальних методів зниження шуму.

Алгоритми оцінювання шуму від транспортних потоків, а також ефектів поширення звукових хвиль, аналітичні перетворення, збір та обробка результатів експериментальних досліджень, побудова графіків виконані мовою технічних обчислень Matlab та реалізовані у вигляді програмного забезпечення USScape1.0. Контури рівнів шуму нанесені на план житлової

забудови за допомогою програмного забезпечення NMPLOT. Чисельне моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– розроблено нову модель шуму транспортних потоків, що відрізняється від існуючих використанням принципів макроскопічного моделювання, що дозволила врахувати такі змінювані характеристики руху автомобільного транспорту в потоці, як швидкість, густина та інтенсивність;

– удосконалено математичну модель оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель, як вертикальних напівнескінчених відбивачів для одного та двох паралельних фасадів на основі моделі Хопкінса. Розроблена модель дозволила дослідити підвищення рівнів шуму перед фасадами будівель та методи його зниження шляхом використання імпедансних характеристик відбиваючих поверхонь;

– удосконалено математичну модель оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану та акустичних екранів кінцевих розмірів, що дозволяють враховувати додаткові шляхи поширення шуму через кромки екранів, що розташовані на імпедансній поверхні землі;

– для забезпечення вимог екологічної безпеки в житловому приміщенні та на території житлової забудови розроблений новий метод ранжування засобів зниження транспортного шуму, що дозволив проводити спільну оцінку засобів зниження шуму одночасно для різних положень приймача на основі критерію використання методу «співвідношення акустична ефективність/вартість».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. В основу математичних моделей закладені рішення диференціальних рівнянь поширення звукових хвиль в пружному середовищі, а також дані, які отримані в результаті експериментальних досліджень. Достовірність підтверджено шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними в результаті вимірювань рівнів

шуму в міському середовищі, а також шляхом порівняння з результатами чисельного моделювання проведеного в дисертаційній роботі та опублікованими результатами інших авторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Розроблена удосконалена математична модель ефективності тонкого акустичного екрану на імпедансній поверхні землі реалізована у нормативному документі РВ.2.3–218–03450778–769:2010 «Рекомендації щодо проектування шумозахисних екранів» (акт впровадження ДП «Держдор НДІ» від 06.11.2012).

2. Результати дисертаційної роботи реалізовані у вигляді програмного продукту Комп'ютерна програма «Розрахунок рівнів звукового тиску в приймачі для міського середовища» USScape1.0 (Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 52940 від 08.01.2014).

3. Проведене двовимірне картографування шуму реалізовано в розробці екологічної концепції розвитку м. Бурштин (акт впровадження Бурштинської міської ради від 06.06.2013).

4. Розроблений метод ранжування методів зниження шуму на території житлової забудови та всередині приміщень (пат. 47858 Україна, МПК G01N 15/08. – u 2009 09336 «Пристрій для визначення опору провуванню потоком повітря пористих звукопоглинаючих матеріалів»).

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно розроблена нова модель шуму транспортних потоків, удосконалено моделі оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану та акустичних екранів кінцевих розмірів на імпедансній поверхні, удосконалено математичну модель оцінювання додаткових відбиттів від імпедансних вертикальних поверхонь, обґрунтовано комплексну модель оцінювання рівнів шуму на території житлової забудови та реалізовані її у вигляді програмного продукту USScape1.0, розроблено новий метод ранжування засобів зниження шуму для багатьох положень приймача. Головні результати досліджень, що викладені в дисертаційній роботі, опубліковані в наукових працях [1–21]. У роботах,

опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: у роботі [1] – обробка та аналіз результатів вимірювання часу реверберації у великій ревербераційній камері, у роботі [2] – аналіз акустичної складової формування екологічного стану урбанізованого довкілля, у роботі [4] – математична модель оцінювання впливу відбиттів від вертикальних поверхонь на формування звукового поля перед фасадом будівлі, обробка та аналіз експериментальних даних, апробація розробленої математичної моделі, у роботі [6] – математичне моделювання оцінювання ефективності акустичних екранів на автомобільних дорогах України.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації оприлюднені і обговорені на науково-технічних конференціях, а саме:

9-тій Міжнародній науково-технічна конференції «АВІА–2009»; Київ 2010;

10-ій міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Політ–2010. Сучасні проблеми науки», Київ 2010;

9-ій міжнародній науково-методичній конференції «Безпека життя і життєдіяльності людини – освіта, наука, практика», Львів 2010;

Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави», Київ 2010;

4-th World Congress “Aviation in the XXI-st Century” “Safety in Aviation and Space Technologies”, Kyiv 2010;

10-тій Міжнародній науково-технічна конференції «АВІА–2011»;

Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави», Київ 2011;

15th Conference for Lithuania Junior Researchers Science – Future of Lithuania “Transport Engineering and Management”, Vilnius, 2012;

5-th World Congress “Aviation in the XXI-st Century” “Safety in Aviation and Space Technologies”, Kyiv 2012;

международный научный семинар «Управление безопасностью сложных систем», Liptovský Mikuláš – Krakov – Киев 2013;

11-тій Міжнародній науково-технічна конференції «АВІА–2013».

Публікації. За темою дисертації опубліковано 21 наукова праця: з них 8 статей у фахових виданнях, з яких 4 одноосібних, з яких 1 в науково метричних базах даних; 2 авторських свідоцтва; 11 у збірниках матеріалів науково-дослідних конференцій.

Структура дисертації: В 1-му розділі наведений огляд літератури стосовно існуючих моделей та методів розрахунку звукових полів. Математичне моделювання рівнів шуму від транспортних потоків відбувається у 2-му розділі. Досліджено рівні звукової потужності окремих транспортних засобів, а також транспортних потоків. Враховано макроскопічні характеристики руху. 3-й розділ розглядає ефекти зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача. У 4-му приведена комплексна модель оцінювання рівнів шуму в точці прийому на основі моделей, розроблених у розділах 2 та 3. На основі розробленої моделі створені алгоритми побудови горизонтальних та вертикальних контурів шуму. У 5-му розділі показаний метод ранжування зниження шуму на території житлової забудови та всередині приміщень.

РОЗДІЛ 1

ПОТОЧНИЙ СТАН МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТА ЗНИЖЕННЯ МІСЬКОГО ШУМУ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

1.1. Проблеми транспортного шуму у сучасному місті

Шум – один із основних факторів негативного впливу на населення великих міст. Постійний цілодобовий вплив шуму підвищує нервову напруженість, знижує творчу діяльність, якість праці та відпочинку [1–3].

За останніми даними [4,5] близько 18 % населення Європейського союзу (близько 90 млн. людей) страждають від впливу шуму автомобільного транспорту, рівень якого знаходяться між 55 і 65 дБА, що перевищує максимальний допустимий. Додатково 20 млн. громадян проживає у зонах, де рівень шуму перевищує 65 дБА, що вважається неприпустимим (рис. 1.1). Близько 10 % населення страждає від впливу шуму в нічний час, рівень якого перевищує 50 дБА та ще 6 % від впливу шуму понад 55 дБА.

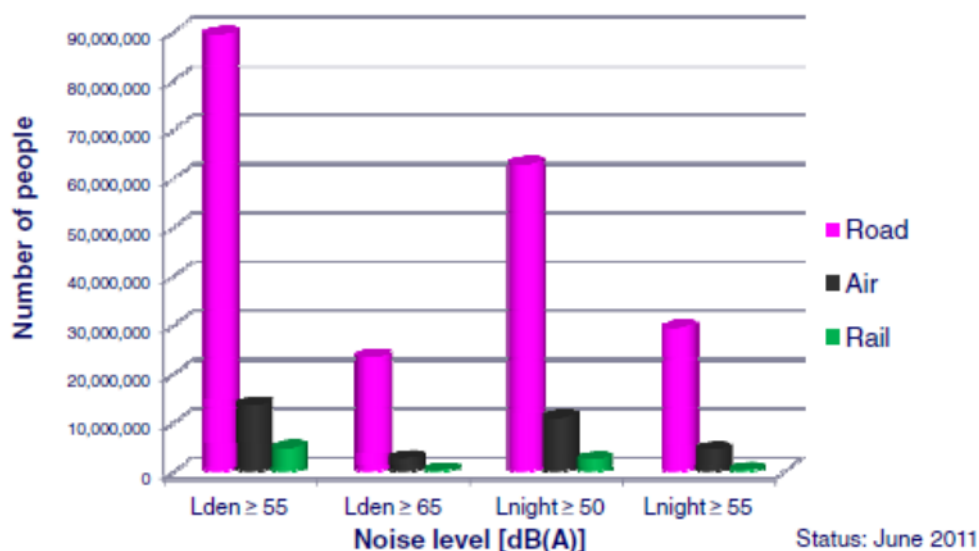


Рис. 1.1. Результати картографування шуму в Європі станом на 2011 р. для великих агломерацій та основних доріг [5]

Шум автомобільного транспорту може призвести до серйозних наслідків для здоров'я, таких як високий артеріальний тиск, інфаркти, інсульти та діабет, що викликають погіршення здоров'я та можуть призводити до передчасної смерті. За даними ВООЗ, це друга з основних проблем забруднення навколишнього середовища та впливу на здоров'я населення в Європі після забруднення повітря. Дослідження показали підвищення ризиків виникнення захворювань при проживанні на територіях, де $L_{DEN} > 55$ дБА біля фасаду будівлі, а також підвищення ризиків при збільшенні часу перебування в зоні впливу шуму [4,5].

На рис. 1.2. приведена залежність між серйозністю наслідків впливу шуму та кількістю населення, що підпадає під ці наслідки. Більшість населення страждає від роздратування [6–8], порушення сну [9–11], та можливості виникнення серйозних негативних впливів на здоров'я [12–17].



Рис. 1.2. Залежність між порушеннями здоров'я в результаті впливу шуму транспорту та кількістю населення, що підпадає під вплив [5]

Для діапазону $L_{Aeq,16h}$ 48–75 дБА, за результатами досліджень, підвищення ризику виникнення захворювання гіпертонією складає 7 % на кожні 10 дБА підвищення рівня шуму [13]; для діапазону $L_{Aeq,16h}$ 58–78 дБА підвищення ризику виникнення інфаркту міокарду складає 17 % на кожні 10 дБА підвищення рівня шуму [14]; для діапазону $L_{A,DEN}$ 53–78 дБА

підвищення ризику виникнення інфаркту міокарду складає 8 % на кожні 10 дБА підвищення рівня шуму [15]; для діапазону $L_{A,DEN}$ 53–73 дБА підвищення ризику виникнення інсультів складає 14 % на кожні 10 дБА підвищення рівня шуму [16]; для діапазону $L_{A,DEN}$ 53–73 дБА підвищення ризику виникнення цукрового діабету складає 11 % на кожні 10 дБА підвищення рівня шуму [17]. Таким чином, встановлено, що для населення, що проживає на територіях, де $L_{A,DEN} > 65$ дБА та $L_{night} > 55$ дБА, ризик виникнення серцево–судинних захворювань підвищується на 20–40 % [4,5].

Зниження шуму до допустимих рівнів є екологічною, соціальною та економічною проблемою розвитку сучасних міст. Для реалізації поставленої задачі повинна бути доступна та детальна інформація про стан шумового режиму досліджуваної території.

На найбільш шумних територіях перевищення над допустимим рівнем шуму досягає 20 дБ. Беручи до уваги цей показник зниження шуму до нормативних значень є комплексною екологічною, економічною та соціальною проблемою, проте при належному та раціональному використанні методів зниження шуму, а також інструментів контролю шумового забруднення можливо значним чином знизити рівні шумового навантаження на населення міст.

Можна констатувати факт, що при плануванні житлової забудови території міст транспортний шум не брався до уваги належним чином і, як результат, значна частина міського населення потрапила під вплив шуму від автомобільних шляхів міста. Покращене планування міського середовища є необхідним заходом для зниження впливу транспортного шуму на етапі проектування. Доступними інструментами та заходами є управління транспортними потоками, покриття поверхонь звукопоглинаючими матеріалами поверхні землі, фасадів будівель та дахів, встановлення акустичних екранів, зелені насадження, ефективне використання екранування будівлями для створення тихих територій як всередині мікрорайонів так і вздовж транспортних магістралей [1,4].

Характерною особливістю управління шумовим навантаженням є те, що лише комплексне обґрунтоване використання інструментів контролю та методів зниження шуму, а також залучення всіх відповідальних сторін, дозволить досягти необхідних результатів. [1,4,5].

1.2. Аналіз моделей оцінювання формування шумового режиму міського середовища

Моделювання рівнів шуму пов'язано з необхідністю врахування таких показників, як розрахункові рівні шуму від джерела шуму, інформація про зниження рівнів шуму на відстані, впливу будинків, споруд, екранів, зелених насаджень та інших елементів міського середовища на рівні шуму в розрахунковій точці, розподіл рівнів шуму по поверхах жилих будівель.

Узагальнюючи існуючі підходи було виділено основні етапи моделювання рівнів шуму в приймачі (рис. 1.3): (1) моделювання випромінювання шуму окремим транспортним засобом; (2) моделювання транспортного потоку; (3) моделювання ефектів поширення звукових хвиль; (4) розрахунок індикаторів шуму з метою висвітлення характерних особливостей шумового навантаження [1–3,37–40,48].

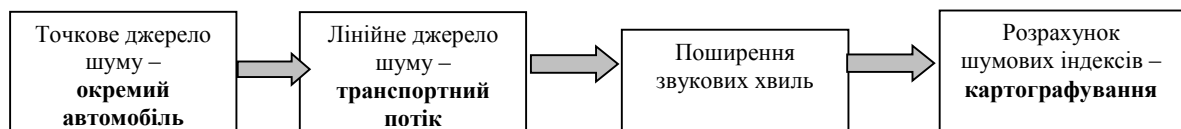


Рис. 1.3. Схематичне представлення моделювання шуму автомобільного транспорту

1.2.1. Проблеми моделювання шуму автомобільного транспорту

Як було зазначено вище, моделювання шуму автомобільного транспорту проходить в два етапи: оцінювання акустичної потужності окремого транспортного засобу та моделювання шуму транспортного потоку. Слід зазначити, що при моделювання шуму окремих автомобілів мається на увазі лише акустичне моделювання, тоді як моделювання шуму потоків вимагає досліджувати вплив залежностей руху автомобілів в потоці на формування акустичних полів, тобто, складається з двох складових – моделювання руху автомобілів в потоці та безпосередньо акустичного моделювання.

Оцінюванню рівнів шуму від автомобільного транспорту присвячено багато експериментальних [18–30] та теоретичних [31–74] робіт, що реалізовані в інженерних моделях різних країн при оцінюванні шуму транспорту [50–52].

В табл.1.1 проаналізовано основні підходи до оцінювання рівнів шуму, створюваного проїздами окремих транспортних засобів. Еволюцію моделей шуму окремого транспортного засобу можна охарактеризувати наступним чином «емпіричні бази даних – прості емпіричні моделі – складні інженерні моделі, що враховують спектральні характеристики шуму».

Основним недоліком номограм (емпіричних баз даних), що використовувалися для оцінювання рівнів шуму від окремих транспортних засобів є те, що значення були отримані на основі усереднених даних результатів експериментальних досліджень, а отже не могли враховувати змінювані характеристики руху автомобілів.

Прості емпіричні формули [1–2,32–36] дозволили точніше оцінювати рівні шуму від проїздів окремих автомобілів на основі швидкості руху [35–36] або характеристик роботи двигуна [1–2,32–33]. Проте вони, як і емпіричні залежності, не дозволяли отримувати спектральних характеристик шуму

автомобілів, а вплив експлуатаційних параметрів визначався на основі табличних поправок, що давало похибки.

Таблиця 1.1

Аналіз основних підходів моделювання шуму окремих транспортних засобів

Підхід/базова модель оцінювання рівнів шуму окремого автомобілю	Тип двигуна	Швидкість	Категорія транспортних засобів	Спектральні характеристики	Підджерела шуму	Вплив експлуатаційних факторів	Вплив типу дорожнього покриття
Емпірична база даних для різних типів двигунів/транспортних засобів [1–2, 31–34]	X		X			X	X
Базова модель [1–2, 32–33] на основі потужності P і частоти обертання колінчатого вала n_e $L_A \approx a \lg n_e + b \lg P$	X						
Базова модель [35–36] на основі швидкості руху u $L_A = a + b \lg u$		X	2			X	X
Базова модель [37,38] на основі складових шуму автомобілю, шуму взаємодії колеса та дороги та шуму двигуна $L_{A,m,f} = L_{WRN,m,f} \oplus L_{WTN,m,f}$		X	3	X	X	X	X

Нове покоління інженерних моделей для розрахунку спектральних рівнів потужності окремих транспортних засобів було запроваджено по результатам проекту Скандинавських країн Nord 2000 [39,40], а пізніше досягнення та напрацювання цього проекту використані для розроблення моделей потужності транспортних засобів в Європейському проекті Harmonoise [37,38].

Найзначнішою перевагою цих моделей стало те, що вони дали можливість оцінювати рівні шуму від окремих транспортних засобів в діапазоні частот 25–20000 Гц для п'яти категорії транспортних засобів, а також для кожного типу транспортного засобу визначено основні джерела шуму автомобіля (шум взаємодії колеса з дорожнім покриттям, шум роботи двигуна), як окремі точкові джерела. Уточнені формули були запропоновані для оцінювання впливу експлуатаційних характеристик руху автомобілів на створювані рівні шуму, а для коефіцієнту впливу дорожніх покриттів була створена детальна база даних та описані методи отримання спектральних коефіцієнтів впливу для будь-якого дорожнього покриття.

В табл.1.2 приведено аналіз моделей [41–49] шуму транспортних потоків з висвітленням основних параметрів, що впливають на створювані рівні шуму. Основними характеристиками транспортного потоку є структура парку автомобілів в потоці, його інтенсивність та швидкість руху автомобілів. Для деяких емпіричних моделей використання лише одного з цих параметрів є достатнім. Наприклад, в роботі Банерджи [41] рівні шуму визначаються на основі лише швидкості потоку, проценту важких транспортних засобів в потоці, а також ширини вулиці. Використання такої емпіричної моделі може мати місце для потоків з постійною інтенсивністю, проте не дозволить отримати необхідних результатів для змінюваних у часі потоків. Моделі Васильєва [42,43], Льюїса [44] та Танчати [45] не враховують швидкість руху автомобілів в потоці, що буде давати значні похибки для умов формування звукових полів для потоків зі змінною швидкістю руху автомобілів, наприклад, при наближенні до світлофорів, перехресть та формуванні заторів.

Таблиця 1.2

Аналіз існуючих моделей шуму транспортних потоків

Підхід/базова модель еквівалентного рівня шуму, створюваного транспортним потоком	Тип двигуна/категорія транспортних засобів, <i>m</i>	Швидкість руху потоку, <i>v</i>	Інтенсивність руху потоку, <i>Q</i>	Відсоток важких транспортних засобів в потоці, <i>P</i>	Відстань від центру автомобільного шляху до точки вимірювання, <i>D</i>	Ширина вулиці/дороги, <i>B</i>	Час доби
$L_A = 72 + 10 \lg \frac{Q}{1000}$ [42,43]	X		X				
$L_{Aeq} = \alpha + \beta \log Q + \gamma P$ [44]			X	X			
$L_{ек} = L_p + 10 \lg Q - 10 \lg v d + 10 \lg \frac{\theta}{2\pi} - 33$ [48]	X	X	X				
$L_1(t) = 10 \cdot \lg \left(\sum_{j=1}^k P_j(t) \cdot m_j(n) \cdot Q_0 \cdot v(t) \cdot \sum_{j=1}^k 10^{0,1 \cdot L_j(\sigma_j)} \right)$ [47]	X	X	X	X			X
$L'_{W,m,i} = L_{W,m,i} + 10 \lg \left(\frac{Q_m v_0}{1000 Q_0 v_{eq,m}} \right)$ [37,38]	X	X	X				
$L_{ек} = 62.903 + 0.006667v + 0.023770P + 0.107250B$ [41]		X		X		X	

Підхід/базова модель еквівалентного рівня шуму, створюваного транспортним потоком	Тип двигуна/категорія транспортних засобів, <i>m</i>	Швидкість руху потоку, <i>v</i>	Інтенсивність руху потоку, <i>Q</i>	Відсоток важких транспортних засобів в потоці, <i>P</i>	Відстань від центру автомобільного шляху до точки вимірювання, <i>D</i>	Ширина вулиці/дороги, <i>B</i>	Час доби
$L_{eq}(1h), m = L_{eq}(10s), m + 10 \log \left[\frac{D_0}{D} \right]^{1+\beta_{eff}} + 10 \log Q_m - 25.563$ [45]	X		X		X		
$L_{Aeq} = 10 \log(Q_n + kQ_g) + 20 \log v - 10 \log(D + 0.33B) + 10 \left(\frac{\Theta}{180} \right) + \Delta_H + \Delta_{II} + 14$ [46]		X	X	X	X		
$L_{Aeq} = 10 \log \left(\sum_j 10^{(L_W 10 \log 4\pi r_j^2 - A_{excess,j})/10} \delta y_j \right) + 10 \log \left(\frac{Q}{v} \right)$ [49]	X	X	X				

Використання відсотка важких транспортних засобів в потоці втрачає зміст при введенні категорій транспортних засобів, що класифікують автомобілі на 5 категорій [37–40] та дозволяють детальніше оцінювати вплив кожної з категорій, а не лише важких транспортних засобів.

Врахування таких параметрів, як ширина вулиці [41] та відстань від центру лінії джерела шуму до точки вимірювання [45,46] доцільніше враховувати при оцінюванні поширення звукових променів, так як це дасть змогу врахувати не лише дивергенцію звукових хвиль, але і вплив характеристик підстилаючої поверхні на формування звукових полів.

Модель Санника А. О. [47] дозволяє найточніше враховувати динамічні характеристики транспортного потоку, так як визначає такі параметри, як коефіцієнт, що залежить від часу доби; часовий множник, що дозволяє корегувати значення максимальної інтенсивності потоку і отримувати відповідне значення інтенсивності певного часу доби; коефіцієнт, що характеризує залежність швидкості потоку від його складу; коефіцієнт, що враховує розподіл j -го типу рухомого складу на смугах руху.

Проблема формування звукових полів на перехрестях та біля світлофорів завжди була актуальною проблемою досліджень формування акустичних полів у містах [44,53–61].

Серед основних напрямків моделювання звукових полів на перехрестях та світлофорах можна виділити на сьогодні статистичне моделювання [18,34–36,64–68], використання оптимізаційних методів для отримання аналітичних та емпіричних залежностей, наприклад застосування генетичного алгоритму [62,63] та врахування поправок на прискорення та сповільнення для вільних транспортних потоків [37,38]. Статистичне моделювання не дозволяє отримувати змінних у часі характеристик потоку, а враховує середні значення та розраховані відхилення. Оптимізаційні методи дозволяють отримувати все ті ж аналітичні формули, а не поправки на прискорення/сповільнення, що стосуються окремих транспортних засобів та

не можуть з достатньою точністю визначити характеристики руху автомобілів в потоці.

Тому в дисертаційній роботі було досліджено підхід макроскопічного моделювання руху автомобілів в потоці.

Макроскопічне моделювання транспортних потоків вже давно описано в науковій літературі [69,70]. Проте результати такого моделювання використовувалися для розрахунку статистичних даних по руху автомобільного транспорту в сучасних містах, а не як складова акустичного моделювання.

Основним завданням макроскопічного моделювання є встановлення залежностей між такими величинами, як інтенсивність транспортного потоку, швидкість руху автомобілів та густина потоку в залежності від положення автомобіля на лінії джерела шуму.

Розроблено декілька моделей залежності швидкість–щільність–потік. Деякі з найбільш відомих моделей включають моделі Гріншілда, Грінберга, Андервуда та Едді [69] описані в табл. 1.3 і зображені на рис. 1.4.

Таблиця 1.3

Огляд основних макроскопічних моделей транспортного потоку

Назва моделі	Функціональна залежність	Основні характеристики
Модель Гріншілда	$v = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{jam}} \right),$ <p>де v_f – швидкість вільного потоку та ρ_{jam} – густина потоку в заторі</p>	Швидкість лінійно спадаюча функція щільності транспортного потоку. При нульовій щільності модель дає швидкість вільного потоку v_f , в той час як для забезпечення максимальної щільності ρ_{jam} відповідає 100% затору, де швидкість дорівнює нулю і

		автомобілі не рухаються. Реальні дослідження транспортних потоків показують, що залежність швидкість–густина в значній мірі є лінійно спадаючою функцією.
	$q = -\left(\frac{\rho_{jam}}{v_f}\right)v^2 + \rho v$	Параболічне рівняння залежності для швидкості–потіку–густини. Реальні дані по транспортних потоках показують відповідність моделі Гріншілда, що дає параболічну форму і показує, що потік зростає до максимуму, який відповідає деякій середній щільності ρ , а потім він спадає до нуля при високих значеннях густини.
Модель Грінберга	$v = v_f - \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{jam}}\right)$	Швидкість–густина логарифмічна залежність
Модель Андервуда	$v = v_f e^{-\frac{\rho}{\rho_{jam}}}$	Швидкість–густина експоненціальна залежність
Модель Едді	<p>for densities $\rho \leq 50$</p> $v = 54.9e^{-\frac{\rho}{163.9}}$ <p>and for densities $\rho \geq 50$</p> $v = 28.6 \ln\left(\frac{162.5}{\rho}\right)$	Модель поєднує моделі Грінберга та Андервуда

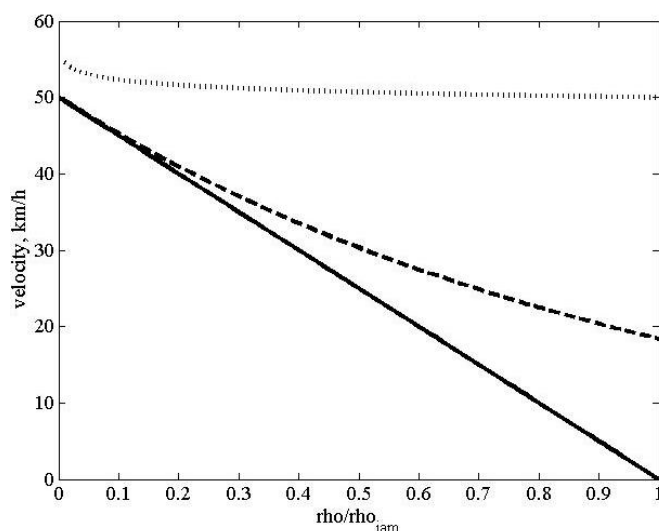


Рис. 1.4. Порівняння трьох моделей швидкості транспортного потоку: суцільна лінія – модель Гріншїлда, штрихована лінія – модель Грінберга, пунктирна лінія – модель Андервуда

Саме тому в процесі досліджень рівнів шуму від транспортних потоків в дисертаційній роботі був використаний принцип макроскопічного моделювання транспортних потоків, що був інтегрований в модель акустичної потужності транспортних потоків.

1.2.2. Аналіз моделей оцінки ефектів інтерференції, дифракції, дивергенції, поглинання звуку при його розповсюдженні в умовах міста

При моделюванні поширення шуму від джерела до точки вимірювання розглядаються такі ефекти, як зниження шуму завдяки ефекту дивергенції звукової хвилі, зниження шуму при поглинанні звукової хвилі в атмосферному повітрі, ефект дифракції звукових хвиль на перешкодах, що розташовані на шляху поширення, зниження/підвищення шуму за рахунок ефектів інтерференції звукових хвиль при відбиванні від горизонтальних та вертикальних поверхонь, зниження шуму смугами зелених насаджень.

Моделювання ефектів поширення звуку було та є невід'ємною складовою моделювання шуму транспорту. Саме тому розглядалися ефекти

поширення звукових хвиль, характерні для міського середовища та джерела шуму – автомобільного транспорту.

Досліджуючи типи моделей для розрахунку ефектів зниження шуму при поширенні було визначено три основних класи: аналітичні, емпіричні та чисельні моделі. З точки зору моделювання ефектів зниження шуму та практичного використання розроблених моделей слід зазначити, що найзручнішими для використання є аналітичні моделі, так як вони є точнішими за емпіричні (де ефекти поширення шуму визначаються на основі табличних поправок [1,2,23,24,31–35,44,61,67,71,72]) та не вимагають значних затрат часу та ресурсів, як при використанні чисельних розрахунків. Проте, на сьогодні найпрогресивнішим напрямком досліджень є чисельне моделювання, так як воно дозволяє отримувати найточніші результати, а головне – вирішувати задачі, недоступні для розв'язання емпіричними та аналітичними методами. Моделювання звукових полів здійснюється за допомогою таких чисельних методів, як методі кінцевих елементів [75,76], метод граничних елементів [77–84], метод параболічних рівнянь [85] та ін. [86–90]. В основному чисельне моделювання використовується для апробації емпіричних та аналітичних моделей.

Аналіз основних напрямків досліджень показав, що сьогодні найбільшу увагу приділяють дослідженню впливу імпедансних характеристик вертикальних та горизонтальних поверхонь відбивання на формування звукових полів [75–137], а також ефектам дифракції на перешкодах різного характеру [138–167].

При моделюванні ефекту дивергенції звуку емпіричні та аналітичні моделі визначаються залежністю рівня звукового тиску (РЗТ) від відстані [1–3,31–34,37–40,42,43,48]. Величина РЗТ зменшується на 6 дБ при подвоєнні відстані від джерела звуку для сферичних звукових хвиль та для циліндричних хвиль при подвоєнні відстані від джерела звуку РЗТ зменшується на 3 дБ. Основною розрахунковою формулою зниження шуму при ефекті дивергенції звуку є:

$$\Delta L_R(R) = 20 \lg R \quad (1.1)$$

для сферичних звукових хвиль та

$$\Delta L_R(R) = 10 \lg R \quad (1.2)$$

для циліндричних хвиль.

Аналіз впливу поглинання звуку в повітрі на формування акустичного середовища міст показав, що даний ефект є незначним для невеликих відстаней житлової забудови (на відміну від моделювання авіаційного шуму) та проявляється лише для високих частот вище 1000 Гц. Так, розрахунки на основі моделей [3,37–39,48,91] показали, що для відстані 100 м зниження шуму не перевищує 0,5 дБ (рис 1.5).

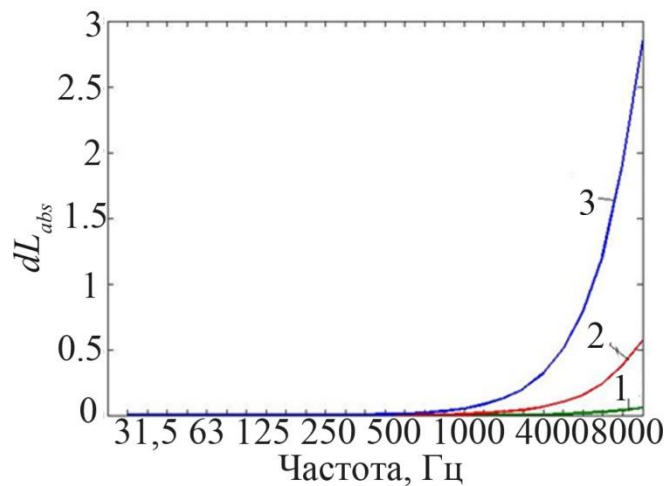


Рис. 1.5. Зміна рівнів звукового тиску в точці прийому в результаті ефектів поглинання звуку dL_{abs} в повітрі для відстаней між джерелом шуму та приймачем: 1 – 10 м, 2 – 100 м, 3 – 500 м

Основною розрахунковою формулою поглинання звуку в повітрі є наступне співвідношення [3,37–39,48,91]:

$$\Delta L_{abs}(f) = \alpha_{abs}(f)R, \quad (1.3)$$

де α_{amm} – коефіцієнт поглинання звуку в повітрі, f – частота.

Для розрахунку коефіцієнту поглинання звуку в повітрі в дисертаційній роботі використана модель Додатку 16 ІКАО [91], де:

$$\alpha_{abs}(f) = 10^{[2.051\lg(f/1000+1.4\cdot 10^{-3}T-1.917)]} + \eta 10^{[\lg(f)+8.43\cdot 10^{-3}T-2.756]},$$

де параметр η залежить від відносної вологості і температури повітря T °К.

Вплив імпедансних поверхонь на формування рівнів шуму визначається ефектами інтерференції звукових хвиль, що відбувається між прямим променем від джерела шуму до приймача, а також променем, що відбивається від поверхні. Характерною особливістю міського середовища є наявність багатьох поверхонь відбивання, як горизонтальних (наприклад, поверхні землі), так і вертикальних (поверхні фасадів будівель, поверхні акустичних екранів і т.д.).

При оцінюванні впливу відбиваючих поверхонь, таких як фасади будівель та поверхня землі припускається, що дані поверхні є напівнескінченними відбивачами. Таким чином, звукове поле визначається суперпозицією прямого променя від джерела шуму до приймача та відбитими променями, що є дзеркальним відбиттям променів від фасаду будівлі та/або від землі (рис.1.6). Основними ефектами, що розглядаються є ефекти інтерференції звукових хвиль.

В реальних умовах поверхня віддзеркалення звукової хвилі не є ідеально жорсткою, тому амплітуда коливань звукового тиску відбитої хвилі зазвичай є меншою завдяки поглинанню акустичної енергії поверхнею, а також відбувається зміщення фази хвилі через тимчасову затримку в процесі взаємодії звукової хвилі з поверхнею. Обидва явища описуються

завдяки використанню терміну акустичного імпедансу Z – характеристики поверхні віддзеркалення звукових хвиль [75–137].

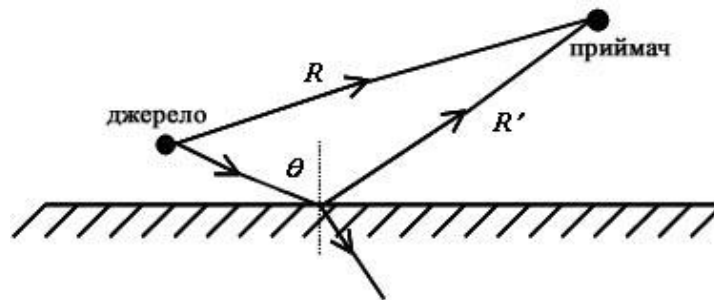


Рис. 1.6. Схема розповсюдження звуку біля імпедансної поверхні: θ – кут падіння звукового променя, R – відстань від джерела шуму до приймача, R' – довжина променя від джерела, точки відбиття від поверхні, приймача звуку

Узагальнені рішення для сумарного поля в точці прийому при відбиванні звукових хвиль від поверхні при різних допущеннях отримані багатьма авторами, наприклад, Зоммерфельдом, Ван дер Полем, Томассоном, Бреховських та ін [48].

Проте їх точні аналітичні рішення вимагають використання методів чисельного інтегрування, що вимагає значних затрат часу та через їх складність, як правило, не використовується в інженерних моделях. Більш придатними виглядають асимптотичні рішення, отримані в роботах Чена та Сороки [92–93], Ченлера–Вайлда [94], Рате [95], Інгарда [96], Атенборо [97–98] та ін. [99–104].

Оцінювання відбивання звукових хвиль від поверхні землі добре вивчено. Сьогодні основна увага приділяється вивченню поширення звукових хвиль над різноманітними імпедансними поверхнями [105–116].

Для оцінювання впливу поверхні землі в роботі використаний метод уявних джерел, коли враховуючи вплив відбивання звукових променів від поверхні землі, звуковий тиск в точці прийому звуку дорівнює:

$$p(x, y, z) = \frac{e^{ikR}}{4\pi R} + Q \frac{e^{ikR'}}{4\pi R'}, \quad (1.4)$$

де перша складова визначається полем випромінювання шуму дійсного джерела (пряма хвиля), друга – полем уявного джерела, яке розміщується з протилежної сторони поверхні віддзеркалення звукової хвилі (відбита хвиля, рис. 1.5), Q – коефіцієнт відбивання сферичних хвиль.

Коефіцієнт відбивання сферичних хвиль розраховується на основі наближення Чена–Сороки [92–93] та дозволяє враховувати імпедансні характеристики поверхні землі, як показано на рис. 1.7.

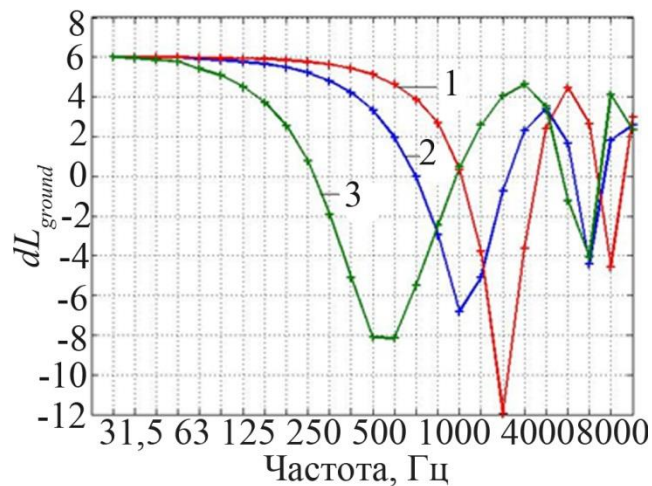


Рис. 1.7. Зміна рівнів звукового тиску dL_{ground} в точці прийому в результаті ефектів інтерференції для різних імпедансних поверхонь:

1 – $\sigma=20\,000$ кНс/м⁴, 2 – $\sigma=2\,000$ кНс/м⁴, 3 – $\sigma=200$ кНс/м⁴

Ефекти інтерференції при відбиванні від вертикальних поверхонь досліджувалися для оцінювання впливу фасадів будівель та вертикальних поверхонь акустичних екранів на формування звукових полів на вулицях міст.

До сьогоднішнього дня моделювання шуму на вулицях міста є надзвичайно актуальною проблемою. Так моделювання та дослідження

впливу фасадів на підвищення рівня шуму на вулиці беруть початок з 60-70х рр. минулого століття [1,2,23,24,31–35,44,61,67,71,72]. Основним недоліком приведених робіт є оцінювання впливу фасаду при розрахунку рівнів шуму шляхом врахування табличних поправок, що дають низьку точність моделювання та занижене значення впливу фасаду будівлі на формування звукового поля. Так наприклад, при двосторонній забудові по ширині вулиці та відстані між лініями забудови менше 10 м, поправка становить лише +2–+3 дБА, тоді як сучасні експериментальні дослідження (натурні та на масштабних моделях) зарубіжних авторів наводять значення до 4 дБА [117–122], а деякі роботи визначають підвищення шуму до 8 дБА [123].

Ще одним значним недоліком оцінювання впливу фасаду на основі табличних поправок є неможливість дослідження спектральних залежностей. Так в роботі [124] показано, що вплив одного чи більше фасадів будівель на формування звукового поля є значним в діапазоні низьких частот, та є таким, яким можна знехтувати в діапазоні, вище 1000 Гц.

При оцінюванні впливу додаткових відбиттів на формування звукового поля було виділено два основні підходи, перший з яких базується на припущенні, що відбиття від поверхонь є геометричними (дзеркальними), другий – на припущенні, що відбиття є дифузними (мають випадковий характер).

Роботи Піко [125,126] та Канга [127–129] досліджували припущення дифузних відбиттів звукових променів за допомогою лінійних рівнянь переносу та моделей дифузного відбивання відповідно. В роботах показано, що для неоднорідних поверхонь, відбиття можна вважати дифузними.

Так як поверхні фасадів мають значні площі в умовах сучасної багатоповерхової забудови в дисертаційній роботі прийнято вважати поверхні фасадів та земної поверхні напівнескінченими відбивачами, а всі відбиття дзеркальними. Характеристики поверхонь враховуються через такий параметр, як опір продуванню потоком повітря, що визначає імпедансні

характеристики матеріалів, як в роботах Хорнікса М., Ю К., Хаймана Д., Ван Рентергема Т. та ін. [130–134].

В роботі Ісмаїла М. [135] встановлено, що дифузні відбивання характерні для відбиттів високих порядків та значної нерегулярності поверхонь фасадів, що не є характерним для типових міських будівель. Для відбиттів перших порядків, що вносять основний вклад в формування звукових полів, доцільнішим є використання дзеркальних відбиттів.

В роботі використовувалося лінійне джерело шуму з метою моделювання шуму транспорту та припускалося, що фасад функціонує як достатньо великий відбивач, таким чином, що слід розглядати лише геометричні відбиття. Польові дослідження Холла Ф. Л. [136] шуму транспорту показали, що для положень мікрофону на відстані 2 м від фасаду, припущення подвоєння акустичної енергії через наявність фасаду є актуальним лише для частот, вище ніж 200 Гц. Експериментальні дослідження на реальних фасадах, проведені Квіртом Д. Д. [137], розглядали положення мікрофону на площині фасаду та на відстані 2 м від фасаду. Результати продемонстрували, що ефекти дифракції були незначними для точок вимірювання біля кутів фасаду будівлі, а основні зміни рівнів звукового тиску визначалися ефектами інтерференції на поверхні землі.

В роботі Хопкінса К. [124] було запропоновано внести функцію автокореляції при дослідженні широкосмугових сигналів шуму, яким, як правило, є шум автомобільного транспорту. Саме робота Хопкінса К. стала основою для розроблення в дисертаційній роботі моделі впливу фасадів на формування звукових полів на вулицях міста.

Ефекти дифракції звукових хвиль мають місце при поширенні звукових хвиль через перешкоди, наприклад, акустичні екрани, земляні насипи, а також будівлі.

Теоретичні та експериментальні дослідження дифракції звуку на кромці тонкого екрану були і є об'єктом дослідження вже більше двох століть. Багато теоретичних результатів дослідження задачі дифракції

сферичної звукової хвилі на півплощині чи на клині були підтверджені експериментальними результатами.

Розповсюдження шуму через екрани будь-якої форми обумовлено явищем дифракції звукових хвиль. Аналітично точно явище дифракції описується моделями Кірхгофа-Френеля, Зоммерфельда, Ван дер Поля [3,48,138], Макдональда [139] для тонкого акустичного екрану, Хаддена В. і Пірса А. [140,141] для клиноподібного екрану та екрану кінцевих розмірів та ін. [142,143]. Всі вони є інтегральними рішеннями хвильового рівняння Гельмгольца при різних допущеннях про характеристики поля в падаючій хвилі і на кромці екрану. Але використання даних підходів в прикладних задачах оцінки шуму на місцевості не є ефективним, оскільки потрібне виконання процедур чисельного інтегрування рівнянь, що входять у моделі, при великому числі вхідних даних і змінних, повне визначення яких не завжди можливо реалізувати. Тому на практиці користуються більш простими, але достатньо точними моделями.

Найпоширенішими є умови використання моделей тонкого акустичного екрану (рис. 1.8, *а*) і екрану кінцевої товщини (рис. 1.8, *б*).

Найпростішим методом оцінки ефективності акустичних екранів є проведення повномасштабних натурних експериментів. З іншого боку, визначення ефективності екранів може бути отримано шляхом експериментів на масштабних моделях в акустичних камерах.

Перші криві зниження шуму екранами в зоні акустичної тіні були отримані Редферном в 1940–х роках [138].

30 роками пізніше Маєкава визначив зниження шуму тонким жорстким екраном для різних положень джерела шуму та приймача [144]. Він представив експериментальні дані у вигляді кривої, що зображувала зниження шуму залежно від одного параметру, відомого як число Френеля – числового відношення різниці ходу променів (різниця відстані, що проходить прямий промінь та відстані, що проходить промінь через кромку екрану в результаті ефекту дифракції) до половини довжини хвилі.

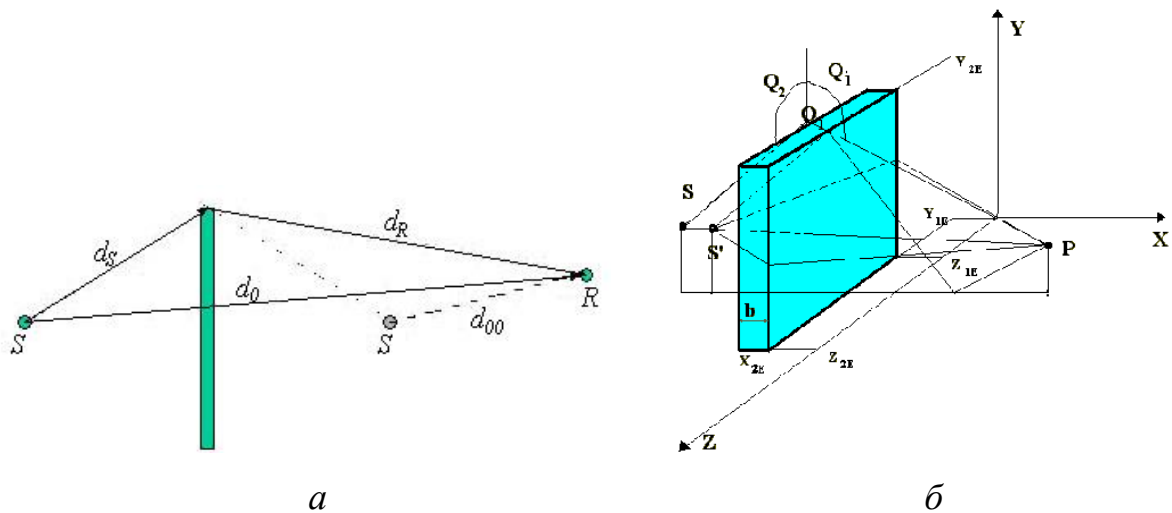


Рис. 1.8. Схема дифракції акустичних хвиль на: *a* – тонкому екрані: d_0 – відстань між джерелом і приймачем звуку (коли екран відсутній), d_{00} – відстань між приймачем звуку і уявним джерелом (уявне джерело знаходиться симетрично відносно екрану в зоні акустичної тіні), d_S – відстань між джерелом шуму і верхньою кромкою екрану, d_R – відстань між верхньою кромкою екрану і приймачем шуму, *b* – екрані кінцевої товщини

На основі досліджень Маскави та Редферна Курц та Андерсон вивели емпіричну формулу для розрахунку зниження шуму тонким акустичним екраном [145,146]. Зниження шуму виражається як функція відносних положень джерела шуму та приймача, включаючи кути дифракції з боку джерела та приймача. Завдяки їх простоті крива Маскави та формула Курца-Андерсона набули інтенсивного застосування в інженерній практиці.

Простою функцією, що відповідає кривій Маскави є:

$$\Delta L = 10 \log(3 + 20N_1),$$

де N_1 – число Френеля.

Наведена формула була визначена для $N_1 > 0$, але досить часто використовується для $N < -0.05$.

Більш точні формули були запропоновані Ямамото та Такагі [147], що розробили чотири розрахункові формули:

$$(I) \quad IL = \begin{cases} 10 \log[1 + G(N_1)(N_1 + 0.3)] & \text{для } N_1 > -0.3 \\ 0 & \text{для } N_1 < -0.3 \end{cases}$$

де

$$G = 3.621 \left\{ \tan \left(\frac{N_1 - 5 * 10^{-3}}{1.45 * 10^{-2}} \right) + \frac{\pi}{2} \right\} + 6.165 \left\{ 1 - e^{-0.205(N_1 + 0.3)} \right\} + 2.354;$$

$$(II) \quad IL = \begin{cases} 10 \log N_1 + 13 & \text{для } N_1 > 1 \\ 5 + 8N_1 / |N_1|^{0.55 + 0.143|N_1|} & \text{для } -0.3 < N_1 < 1; \\ 0 & \text{для } N_1 < -0.3 \end{cases}$$

$$(III) \quad IL = \begin{cases} 10 \log N_1 + 13 & \text{для } N_1 > 1 \\ 5 + 8|N_1|^{0.438} & \text{для } -0.3 < N_1 < 1; \\ 0 & \text{для } N_1 < -0.3 \end{cases}$$

$$(IV) \quad IL = \begin{cases} 10 \log N_1 + 13 & \text{для } N_1 > 1 \\ 5 \pm 9.07674 \times \sinh^{-1} |N_1|^{0.485} & \text{для } -0.3 < N_1 < 1. \\ 0 & \text{для } N_1 < -0.3 \end{cases}$$

На додаток до формул Ямамото та Такагі Курц та Андерсон запропонували нову просту формулу, що набула широкого вжитку. Крива Маскави може бути математично представлена у наступному вигляді:

$$\Delta L = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N_1}}{\tanh \sqrt{2\pi N_1}} \quad \text{для } N_1 > 0.$$

В роботі Менуну П. [148] показано, що при наближенні джерела шуму або приймача до поверхні екрану або зони акустичної тіні похибка моделювання в порівнянні з точним рішенням може досягати 3 дБ. Тому крива Маскави була замінена на сімейство кривих з двома числами Френеля так, щоб формула була проста у використанні та дозволяла отримувати

рішення з точністю, як при аналітичному та чисельному моделюванні. Покращена формула для розрахунку зниження шуму акустичним екраном записана наступним чином:

$$\Delta L_{екр} = \Delta L_s + \Delta L_b + \Delta L_{sb} + \Delta L_{sp}, \quad (1.5)$$

де

$$\Delta L_s = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi N_1}}{th(\sqrt{2\pi N_1})} - 1, \quad (1.6)$$

$$\Delta L_b = 20 \lg \left[1 + th \left(0,6 \lg \frac{N_2}{N_1} \right) \right], \quad (1.7)$$

$$\Delta L_{sb} = \left(6th(\sqrt{N_2}) - 2 - \Delta L_b \right) \left(1 - th(\sqrt{10N_1}) \right), \quad (1.8)$$

для сферичних хвиль

$$\Delta L_{sp} = -10 \lg \frac{1}{(R'/R_1)^2 + (R'/R_1)}, \quad (1.9)$$

для циліндричних хвиль

$$\Delta L_{sp} = -10 \lg \frac{1}{(R'/R_1) + 1}, \quad (1.10)$$

$$N_1 = \frac{R' - R_1}{\lambda/2}, \quad N_2 = \frac{R' - R_2}{\lambda/2}, \quad R' = r_s + r_r, \quad \Delta L_c = \Delta L_s + \Delta L_b + \Delta L_{sb},$$

В формулах (1.5–1.10) N_1, N_2 – числа Френеля, а величина R' – найкоротша відстань від джерела – кромки екрану – приймача шуму. Складова ΔL_s акустичної ефективності екрану залежить від взаємного положення джерела і приймача шуму. Складова ΔL_{sb} важлива для малих значень числа Френеля N_1 . Складова ΔL_{sp} враховує ефекти дифракції для сферичних і циліндричних хвиль.

Таким чином, модель Менуну дозволяє моделювати зниження шуму акустичним екраном з високою точністю (похибка менше 1 дБ) при положенні джерела шуму або приймача біля поверхні екрану або біля зони

акустичної, що є характерним для невеликих відстаней на вулицях міст. Формула Менуну була використана в дисертаційній роботі для удосконалення моделі акустичного екрану на імпедансній поверхні землі.

Проте формула Менуну не враховує впливу поверхонь відбивання на формування звукового поля в зоні акустичної тіні.

При розміщенні акустичних екранів на вулицях міста, вони завжди знаходяться на імпедансній землі, а це значним чином впливає на зниження шуму акустичними екранами.

Акустична ефективність екрану, що розташований на поверхні землі, характеризується двома критеріями: сумарне зниження шуму (excess attenuation – EA) та зниження шуму екраном в результаті ефектів дифракції (insertion loss – IL) та розраховується за наступними формулами [48,138]:

$$EA = 20 \lg \left(\frac{P_0}{P_{екр+зем}} \right),$$

$$IL = 20 \lg \left(\frac{P_{зем}}{P_{екр+зем}} \right),$$

де p_0 – рівень звукового тиску у вільному полі, $p_{зем}$ – рівень звукового тиску у вільному полі при наявності відбиваючої поверхні землі, $p_{екр+зем}$ – рівень звукового тиску при наявності екрану та відбиваючої поверхні землі.

Якщо розрахунок проводиться лише по відношенню до амплітуди (некогерентне сумування вкладу всіх звукових променів), тоді зниження шуму ΔL_n визначається для кожного окремого звукового променя, що проходить відповідний шлях, згідно чисел Френеля для даного променя. Таким чином зниження шуму екраном на абсолютно жорсткій поверхні розраховується за формулою [48,138]:

$$EA = 10 \lg \left(10^{-\frac{|\Delta L_1|}{10}} + 10^{-\frac{|\Delta L_2|}{10}} + 10^{-\frac{|\Delta L_3|}{10}} + 10^{-\frac{|\Delta L_4|}{10}} \right).$$

Зниження шуму для кожного окремого променю може розраховуватися на основі форму Маскави, Курца-Андерсона, Менуну. Якщо необхідно отримати точне рішення слід використовувати рішення МакДональда та ін. для тонкого акустичного екрану та рішення Хаддена-Пірса для клиноподібних та екранів кінцевих розмірів.

При когерентному сумуванні враховуються характеристики відбивання від поверхні землі:

$$p_{\Sigma} = p_1 + Q_S p_2 + Q_R p_3 + Q_S Q_R p_4,$$

де Q_S та Q_R – коефіцієнти відбивання від поверхні землі перед та після екрану відповідно.

Дослідження зниження шуму акустичними екранами на імпедансній поверхні землі приведено в роботах багатьох авторів (Йонассона [101], Канга, Аттенборо К., Запорожця О. І., Токарева В.І. [3,48,149,150]).

Ще один простий підхід запропонували Лем та Робертс [101]. Згідно Лему та Роберту амплітуда дифрагованої хвилі розраховується на основі формул Маскави, Курца-Андерсона і т.д., а фаза в точці приймача розраховується на основі довжини ходу звукових променів через кромку екрану, припускаючи, що зміщення фази для дифрагованої хвилі становить $\pi/4$ та є постійною незалежно від геометрії розташування джерело–екран–приймач:

$$p_n = dL_{diff,n} \cdot e^{i[k(r_R+r_S)+\pi/4]},$$

де r_S та r_R – відстань від джерела шуму до кромки екрану та від кромки екрану до приймача відповідно.

Основною перевагою такої моделі є простота використання, проте дослідження Лі К.-М. [152] показали, що модель дає хороші відповідності для жорстких поверхонь, проте гірші результати для поглинаючих імпедансних поверхонь, так як результати моделювання дозволяють встановити тільки якісні залежності, проте не дозволяють з необхідною точністю розраховувати значення зниження шуму.

Зниження шуму екраном може розраховуватися за допомогою емпіричних, аналітичних чи чисельних формул залежно від складності моделі та необхідної точності. Якщо розрахунки вимагають точного оцінювання як амплітуди так і фази дифрагованих хвиль доцільно використовувати аналітичні та чисельні формули [152–162], при інженерних розрахунках, як правило, ефективність екрану визначається за допомогою емпіричних формул.

Дослідження ефектів багаторазової дифракції при поширенні через кромки акустичних екранів та перешкоди різного характеру, наприклад земляні насипи та будівлі різного призначення, в більшості робіт (наприклад, Кіма [163], Міна [164], Чу [165], Стентона [166], Лі [167] та ін..) розраховуються на основі точних рішень Пірса та Хаддена [140,141].

Моделі Пірса-Хаддена використані в дисертаційній роботі при удосконаленні моделей акустичних екранів кінцевих розмірів, як такі, що дозволяють отримувати найточніші результати для положень приймача біля поверхонь акустичних перешкод.

Вплив зелених насаджень на зниження рівня шуму як і решта ефектів зниження шуму в перших вітчизняних та зарубіжних моделях розраховувався на основі табличних даних [1,2,31–33]. Пізніші роботи представили можливість моделювання зниження шуму зеленими насадженнями на основі емпіричних моделей [3,37–40].

В згаданих роботах встановлену чітку залежність між частотою та зниженням шуму. Так в роботі Баллена і Фріке [168] показано, що для частот, менше 1000 Гц смуги зелених насаджень є практично акустично прозорими та не дають необхідного зниження шуму.

Чисельні дослідження форми, типу насаджень та впливу на зниження шуму акустичними екранами Ван Рентергема [169] показали, що хвойні дерева є доцільнішими за листяні завдяки їх формі та мінімальній втраті листяного покриву взимку.

В дисертаційній роботі для розрахунку поглинання шуму смугами зелених насаджень використане емпіричне співвідношення [48]:

$$\Delta L_{\text{снз}} = 20 \lg \frac{d + \sum_i B_i + \sum_i A_i}{d} + 1,5Z + \beta_{\text{снз}} \sum_i B_i, \quad (1.11)$$

де d – ширина захисної смуги, B_i – ширина крони i -го дерева, A_i – відстань між окремими кронами i -го і $(i+1)$ -го ряду дерев (звичайно – 5 м), Z – кількість рядів, $\beta_{\text{снз}}$ – питоме поглинання звуку зеленими насадженнями.

1.2.2. Аналіз методів картографування шуму

Карти шуму є джерелом інформації про акустичний ландшафт на території міст, а також ефективним інструментом контролю та впровадження методів зниження шуму.

Карти шумового забруднення навколишнього середовища міст дають можливість отримати таку інформацію:

- існуюча та прогнозована акустична ситуація;
- перевищення нормативних значень рівнів шуму;
- кількість людей, що перебуває на територіях з підвищеним рівнем шуму;

– кількість житлових будинків, лікарень шкіл та інших об'єктів, чутливих щодо шуму.

Для оцінювання впливу шуму на населення як індикатори обирають еквівалентні рівні звуку в денний і нічний періоди доби [3,48,37–40].

Методики створення як горизонтальних, так і вертикальних перерізів з нанесенням контурів рівного шуму були розроблені ще в 70-80 рр. минулого століття [1,2,31–33]. Сьогодні основним завданням створення карт шуму є інтегрування комплексних екологічних моделей в засоби картографування [173–175].

Стапельфельд Г. [176] запропонував динамічне моделювання, коли в комплексні моделі вносяться поправки на основі даних натурних експериментів для даного місця та даного часу дослідження. Такий підхід дозволяє уточнювати існуючі моделі з врахування характерних особливостей ділянки міського середовища, для якого проводиться акустичне картографування. Принципи динамічного моделювання використані в дисертаційній роботі при удосконаленні методу картографування шуму.

Питання точності моделювання та часу, що витрачається на це досліджено в багатьох роботах іноземних авторів [173–175,178]. Основним завданням є оптимізація відношення «точність–витрачений час».

Так в дисертаційній роботі досліджені як чисельні методи розрахунку, що є точними, проте вимагають багато часу та ресурсів, а тому складні для завдань картографування; проаналізовані емпіричні моделі, які сьогодні вже не можуть з достатньою точністю оцінювати існуючу ситуацію. Основна увага в дисертаційній роботі була приділена розробці аналітичних-емпіричних моделей, що містили точніші та детальніші емпіричні залежності та використовували принципи аналітичного моделювання для оцінювання впливу окремих ефектів поширення шуму на формування рівнів шумового навантаження.

Виділяється два основні етапи математичного моделювання при картографуванні шуму – мікро- та макромасштабне акустичне моделювання [3].

Мікромасштабне акустичне моделювання включає:

– математичне моделювання акустичної потужності точкових джерел шуму – окремих автомобілів;

– математичне макроскопічне моделювання транспортного потоку та моделювання потужності транспортного потоку, як лінійного некогерентного джерела шуму;

– математичне моделювання ефектів поширення шуму від джерела шуму до його приймача.

Результатом мікромасштабного моделювання є розрахунок рівнів звукового тиску в точці прийому.

Основним завданням макромасштабного моделювання є чисельне інтегрування рівнів шуму від окремих сегментів лінії шуму (транспортного потоку) в точці прийому $L_{eq}(x, y, z)$. Останнім етапом є вибір індикаторів шуму та їх графічне зображення.

Характерною особливістю великих міст є підвищення рівнів шуму в результаті збільшення інтенсивності транспортних потоків на вулицях та постійне збільшення кількості високо поверхових будівель, а значить поява додаткових поверхонь відбивання. Тому сьогодні звукові поля сучасних міст значним чином відрізняються від сільської місцевості, а також від минулого.

Для міста основним недоліком використання лише горизонтальних двомірних карт шуму є постійна та лише одна висота приймача шуму. Так, згідно існуючим національним нормам [170–172] карти шуму створюються для висоти приймача 1,2–1,5 м, що дорівнює середній висоті положення вуха людини по відношенню до поверхні землі. В Європейських вимогах висота приймача 1,5 м була замінена на висоту, що становить 4 м над поверхнею землі [170]. Проте зазначені висоти приймача не дозволяють в повній мірі охопити та проаналізувати звукові поля на території сучасної

високоповерхової житлової забудови. Характерною особливістю тут є змінювані рівні звукового тиску в залежності від висоти точки розрахунку, що прямо впливає на рівні шуму перед вікнами різних поверхів, а значить і проходження шуму всередину приміщення.

Сьогодні не існує нормативних вимог та точних методик створення вертикальних карт шуму, а ті що описані в існуючій літературі [2,3] використовують для розрахунків емпіричні моделі на основі табличних поправок, що для сучасних міст не можуть прогнозувати та оцінювати існуючу картину шумового режиму з достатньою точністю.

1.3. Існуюча практика зниження транспортного шуму

Існуючі методи зниження шуму можуть бути поділені на три основні групи: зниження шуму в джерелі, зниження шуму на шляху його розповсюдження та зниження шуму в точці прийому, активні методи, місобудівні методи [1–3,31–33,48].

Основні методи зниження шуму на шляху його розповсюдження наведені на рис. 1.9.

На сьогоднішній день існує достатньо методів зниження шуму різних за своєю ефективністю та вартістю. Основною проблемою використання таких методів є не лише питання їх ефективності, а саме питання оптимального їх застосування з врахуванням всіх можливих варіантів комбінацій існуючих методів, таким чином, щоб досягнути найраціональнішого їх використання з екологічної, соціальної та економічної сторін. Одночасно, постійно зростаюча кількість високо поверхових будівель на території міста, а отже і постійно зростаюча кількість приймачів шуму, для яких необхідно створити умови акустичного комфорту призводить до того, що використання певного методу, що є ефективним для одних приймачів – може бути абсолютно неефективним для інших.

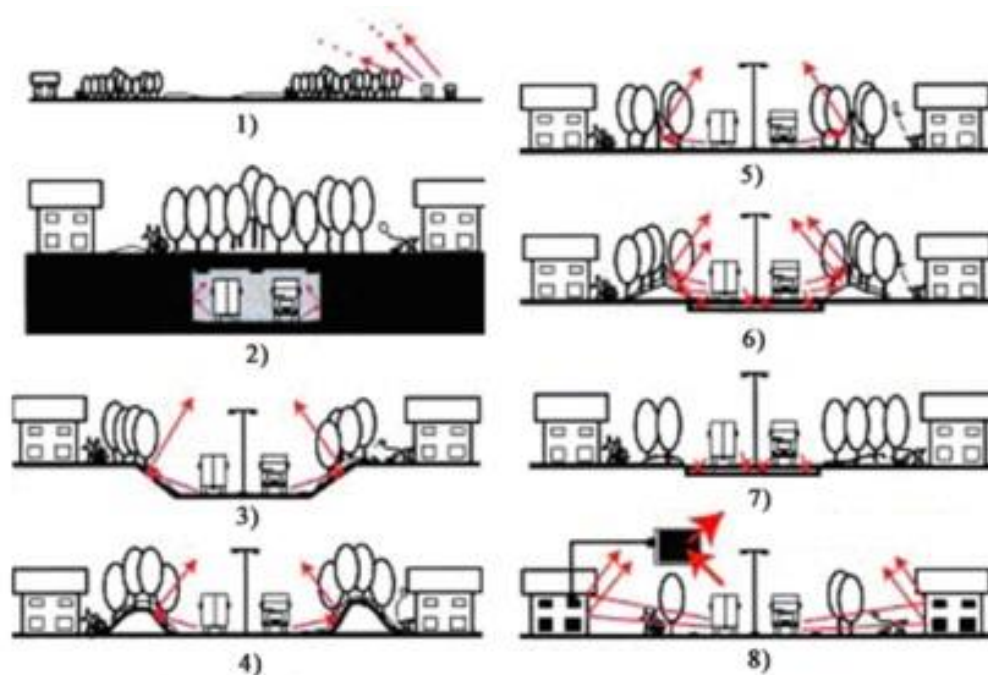


Рис. 1.9. Методи зниження шуму в міському середовищі: 1 – збільшення відстані між джерелом і об’єктом, що захищається, 2 – тунель з повною ізоляцією від транспортного шуму, 3 – використання рельєфу місцевості, 4 – захисні ґрунтові вали з шумозахисними смугами озеленення, 5 – використання екранів і біоекранів, 6 – комбіновані рішення, 7 – використання пористого асфальту, 8 – підвищення звукоізоляції житла

Яскравим прикладом є використання акустичних екранів в зоні багатоповерхової забудови, коли відстань між джерелом шуму, акустичним екраном та приймачем є малою порівняно з висотою будівлі. В такому випадку використання типового акустичного екрану висотою 3 м [3,48] є ефективним для вікон нижніх поверхів (зниження шуму може досягати 25 дБА) та абсолютно неефективним для верхніх поверхів будівлі (екран є неефективним, так як приймач знаходиться поза зоною акустичної тіні).

Тому і виникла проблема необхідності спільного оцінювання екологічної безпеки та економічної ефективності методів зниження шуму, що і була досліджена в дисертаційній роботі.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 1

1. Проаналізовано існуючі підходи до моделювання шумового режиму на території міста. Було виявлено, що інженерні моделі, що використовуються згідно нормативним документам сьогодні в Україні не враховують з достатньою точністю рівні звукового тиску в приймачі і не враховують ряд ефектів, таких, як генерування так і поширення шуму, або їх врахування базується на використанні табличних даних, що в умовах сучасної завантаженості транспортних потоків та інтенсивності житлової забудови, не відповідає реальним значенням.

2. Визначена необхідність доопрацювання існуючих моделей шуму транспортних потоків з врахуванням змінюваних характеристик руху автомобілів в потоці, що є характерними для умов заторів на дорогах та поблизу світлофорів.

3. Аналіз математичних моделей ефектів зниження шуму при поширенні виявив ряд ефектів, що потребують вдосконалення з врахуванням імпедансних характеристик поверхонь на території житлової забудови. Була встановлена необхідність удосконалення математичних моделей оцінювання ефективності акустичних екранів, а також впливу додаткових відбиттів від вертикальних поверхонь, таких як фасади будівель.

4. Аналіз підходів картографування з врахуванням особливостей сучасних міст продемонстрував необхідність детальнішого аналізу не лише горизонтальних перерізів контурів рівного шуму, але і необхідність створення вертикальних карт шуму, що враховували би особливості поширення звуку з висотою перед фасадами високо верхових будівель, особливо для двохсторонньої забудови вузьких вулиць, через які проходять автомобільні дороги.

5. Аналіз використання методів зниження шуму показав недостатню обґрунтованість ефективності використання таких методів. Часто методи зниження шуму використовуються інтуїтивно без супутніх розрахунків. Це призвело до постановки питання необхідності розробки методу сумісного оцінювання заходів зниження шуму для одночасного врахування різних положень приймачів на селітебній території.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ШУМУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

2.1. Розробка математичної моделі шуму транспортних потоків як лінійного некогерентного джерела шуму

Основним завданням даного розділу є моделювання рівнів шуму, створюваного окремими транспортними засобами та транспортними потоками на вулицях міста з врахуванням характеристик руху автомобілів в потоці.

При моделюванні акустичних характеристик транспортних засобів їх звукове поле характеризується рівнями звукового тиску (РЗТ) $L(x,y,z)$, рівнями звуку (РЗ) L_A , рівнями звукової потужності (РЗП) L_W , еквівалентними рівнями шуму $L_{Aeq}(x, y, z)$. При аналізі характеристик транспортного шуму також використовуються його спектральні характеристики, направленість випромінювання в залежності від режиму руху автомобіля, його технічних параметрів і експлуатаційних факторів. Розрахунок спектральних характеристик шуму здійснювався в октавних або 1/3 октавних смугах частот.

2.1.1. Постановка задачі моделювання шуму транспортних потоків

В даному дослідженні окремі джерела звуку вважаються точковими, які досліджуються у дальньому звуковому полі. Точкові джерела шуму випромінюють звукові хвилі у трьохвимірний простір.

Припускається, що транспортний потік – лінійне джерело шуму – складається з окремих транспортних засобів – точкових джерел шуму, які в свою чергу визначаються окремими джерелами шуму (наприклад, шумом взаємодії колеса з дорогою, шумом двигуна), що розташовані на різних

висотах над поверхнею дороги, що також є точковими джерелами шуму. Окремі точкові джерела є некогерентними джерелами шуму.

Для моделювання поширення звуку звукове поле автомобіля представляється у рамках припущень геометричної акустики у вигляді променевої картини. В даній роботі розглядалося лише однорідне середовище. Припускається також, що точка спостереження знаходиться в дальньому звуковому полі джерела.

Таким чином, окремі транспортні засоби моделювалися як точкові джерела шуму, що рухаються з постійною швидкістю вздовж горизонтального сегменту лінії шуму (дороги) на висоті h_S над прямим сегментом дороги на горизонтальній поверхні землі.

На рис. 2.1. показана геометрія взаємного розташування лінійного джерела шуму та приймача в горизонтальній площині xz . Розглядається випадок, коли висота джерела шуму h_S дорівнює висоті приймача шуму h_R . На рисунку також позначений кут ϕ та відстань від джерела шуму до приймача r .

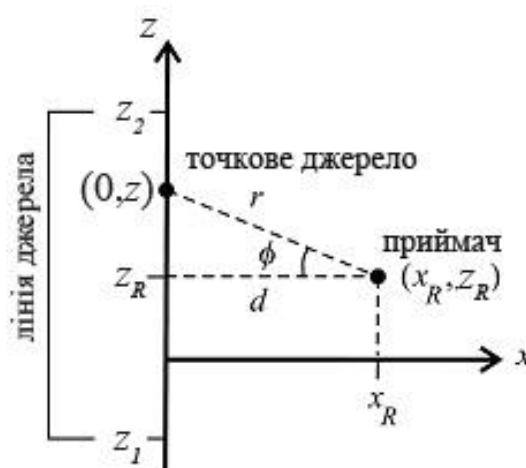


Рис.2.1. Геометрія з положенням точкового джерела $(0, z)$ на лінії джерела на осі y між точками $(0, z_1)$ та $(0, z_2)$, та положенням приймача (x_R, z_R) , нормальною відстанню $d=|x_R|$ від лінії джерела

Лінійне джерело шуму розташовано на осі z між точками $(0, z_1)$ та $(0, z_2)$. Точкове джерело шуму розташоване в точці $(0, z)$. Приймач розташований в точці (x_R, z_R) на відстані $d=|x_R|$ від лінії джерела.

Аналіз взаємного розташування джерела шуму та приймача (рис. 2.1) може застосовуватися для трьохвимірної задачі з різними висотами джерела шуму y_S та приймача y_R . В такому випадку горизонтальна площина xz замінюється площиною, що проходить через лінію джерела шуму та приймач.

Метою даного розділу є розробка моделі шуму від рухомого потоку транспортних засобів з урахуванням залежностей розподілу окремих автомобілів на лінії джерела шуму. Для переходу від моделювання окремого транспортного засобу до моделювання потоку використано чисельне інтегрування окремих точкових джерел в лінійне джерело шуму [153].

2.1.2. Математична модель шуму транспортних потоків

Розглянемо точкове джерело шуму, що рухається з постійною швидкістю v вздовж осі z від $z=z_1$ до $z=z_2$ (рис. 2.1). Положення джерела як функція від часу t визначається як $z(t) = z_1 + vt$. Час руху тоді дорівнює $T = (z_2 - z_1)/v$.

Еквівалентний рівень шуму $L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L} dt \right)$ при зміні змінної інтегрування від часу T до відстані z запишеться як:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} 10^{0,1L} dz \right), \quad (2.1)$$

де $L = L(x, y, z)$ – рівень звукового тиску в точці прийому.

Даний вираз відповідає випадку, коли один транспортний засіб рухається протягом часу T від $z=z_1$ до $z=z_2$.

В загальному випадку рухається потік з багатьма транспортними засобами по лінійному сегменту дороги від $z=z_1$ до $z=z_2$ (рис. 2.1.). Середня кількість транспортних засобів на одиницю довжини визначається як Q/v , де Q – кількість транспортних засобів за одиницю часу. Середня кількість транспортних засобів для лінійного сегменту дороги від $z=z_1$ до $z=z_2$ таким чином становить $(z_2 - z_1)Q/v$.

Враховуючи характеристики руху автомобілів в потоці рівняння (2.1) запишемо наступним чином:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\int_{z_1}^{z_2} 10^{0,1L} dz \right) + 10 \log \left(\frac{Q}{v} \right) \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) представляє рівномірний розподіл некогерентних точкових джерел по сегменту лінії від $z=z_1$ до $z=z_2$. Будемо називати такий розподіл некогерентним лінійним джерелом.

Дана модель є справедливою, коли густина автомобілів на сегменті лінійного джерела шуму, швидкість руху потоку та інтенсивність руху транспортних засобів є постійними. Проте в реальних умовах міського середовища ці характеристик потоку змінюються в залежності від таких факторів як час доби, формування заторів, наближення до світлофорів. Тому доцільно розглядати ці характеристик не як постійні величини, а як змінювані взаємозалежні параметри. Для вирішення цієї задачі при моделювання шуму транспортних потоків були використані принципи макроскопічного моделювання.

Було запропоновано розглядати кількість транспортних засобів на одиницю довжини сегменту лінійного джерела шуму не як середній показник для даної ділянки автомобільного шляху, а як функціональну залежність від таких параметрів як швидкість транспортного потоку для виділеної ділянки, а також годинну кількість автомобілів в потоці. Тому в дисертаційній роботі були використані принципи макроскопічного моделювання транспортних

потоків, що дозволило враховувати такі характеристики руху, як формування заторів, наближення до світлофорів та змінну швидкість.

При макроскопічному моделюванні транспортний потік розглядається з використанням методів дослідження потоку рідини в мережі [69,70]. Макроскопічні моделі транспортного потоку записуються у вигляді рівняння нерозривності, яке використовується в аеродинаміці.

Існує тісна взаємозалежність між параметрами транспортного потоку – густиною та швидкістю. Припускаючи, що автомобілі рухаються з постійною швидкістю v , а постійна густина ρ така, що відстань d між автомобілями також є постійною, а характеристика транспортного потоку Q визначається, як кількість автомобілів N , що проїхала повз точку спостереження за час t по ділянці лінійного джерела шуму від $z=z_1$ до $z=z_2$, можна записати взаємозалежність як диференціальне рівняння першого порядку (2.3) [70]:

$$\left(f(\rho) + \rho \frac{df}{d\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 . \quad (2.3)$$

Якщо початкова густина та швидкість відомі, наведене рівняння можна застосовувати для розрахунку густини транспортного потоку. Таким чином, функціональна залежність швидкості для моделі транспортного потоку залежить від густини. Наведене рівняння припускає відсутність збільшення або зменшення кількості джерел шуму. Кількість транспортних джерел включається в рівняння за допомогою функції $g(z,t)$ в правій частині рівняння [70].

При макроскопічному моделюванні ділянка автомобільного шляху умовно була розділена на сегменти дороги з постійною або змінною довжиною. На основі рівняння (2.3) були отримані взаємозалежності для основних параметрів моделювання.

В макроскопічному моделюванні транспортних потоків потік характеризується трьома параметрами: потік $Q(z, t)$, густина потоку $\rho(z, t)$ та

швидкість потоку $v(z, t)$ [69,70]. Ці три змінні описані наступними рівняннями:

рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial Q(z, t)}{\partial z} + \frac{\partial \rho(z, t)}{\partial t} = 0,$$

характеристикою потоку:

$$Q(z, t) = \rho(z, t) v(z, t). \quad (2.4)$$

В даному дослідженні припускалось, що характеристика потоку є функцією густини потоку:

$$Q(z, t) = Q_e(\rho(z, t)).$$

Таким чином, результати макроскопічного моделювання дозволили переписати середню кількість транспортних засобів на одиницю довжини Q/v , як функціональну залежність, що впливає з рівняння (2.4):

$$\rho(z, t) = \frac{Q(z, t)}{v(z, t)}.$$

Проінтегруємо за часом:

$$\rho(z) = \frac{1}{T} \int_0^T \rho(z, t) dt. \quad (2.5)$$

Тому рівняння (2.2) з використанням рівняння (2.5) можна записати як:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\int_{z_1}^{z_2} 10^{0,1L} dz \right) + 10 \log(\rho(z)). \quad (2.6)$$

Таким чином, для чисельного розрахунку рівню шуму L_{eq} використовується рівняння (2.6). Дискретне представлення рівняння (2.6), що використовується в роботі для розрахунків має наступний вигляд:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\sum_j 10^{0,1L} \delta z_j \right) + 10 \log(\rho(z)), \quad (2.7)$$

де індекс j змінюється від $z=z_1$ до $z=z_2$ через невеликий суміжний інтервал δz_j (рис. 2.2).

Довжина сегментів δz_j може бути постійною або може змінюватись, залежно від обраного алгоритму сегментування. Кожен сегмент представлений точковим джерелом шуму в центрі сегменту.

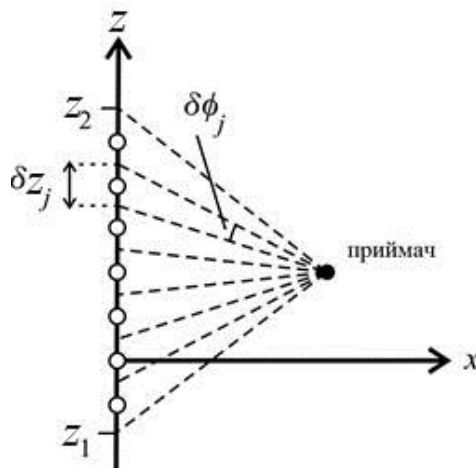


Рис. 2.2. Сегментування лінії джерела шуму по осі z між $z=z_1$ та $z=z_2$ з точковими джерелами шуму в центрах сегментів. Позначено довжину δz_j та кутовий сегмент $\delta \phi_j$ для сегменту j

Рівень звукового тиску в точці прийому $L(x,y,z)$ розраховувався за формулою:

$$L(i) = L_w(i) - dL(i) \quad (2.8)$$

де L_w – рівень звукової потужності окремого джерела шуму, dL – додаткове зниження шуму, що включає такі ефекти як дивергенцію звуку, відбиття від поверхні землі, ефекти дифракції звукових хвиль на кромках акустичних екранів, поглинання шуму в повітрі та відбиття від вертикальних перешкод, таких як наприклад фасади будівель (розділ 3), i – індекс частоти.

Для розрахунку потужності окремого джерела шуму (автомобіля) L_w використовувалася методика Harmonoise [37] з модифікацією її алгоритмів розрахунків рівнів шуму для експлуатаційних умов України. За допомогою даної методики було запропонована класифікація джерел шуму та визначено рівні шуму для запропонованих категорій автомобільних транспортних засобів. Запропонована класифікація транспортних засобів приведена в [37].

Потужність окремого транспортного засобу L_w визначалася для трьох джерел, які знаходяться на висотах над поверхнею дороги 0,01 м, 0,30 м та 0,75 м [37] для кожної категорії транспортних засобів та 1/3 октавної смуги частот.

Таким чином, розроблена модель шуму транспортних потоків складається з трьох основних етапів моделювання, яка представлена на рис.2.3.

Блок 1 призначений для розрахунку акустичної потужності окремого автомобільного транспортного засобу. Блоки 1.1–1.2 визначають основні складові шуму, що дозволяють змоделювати акустичну потужність окремого автомобілю, а в блоках 1.3–1.6 виконуються допоміжні розрахунки, що визначають умови водіння, характеристики як самого автомобілю так і дорожнього покриття. Блок 2 виконує макроскопічне моделювання характеристик транспортного потоку. Основною метою етапу макроскопічного моделювання є дослідження залежності кількості одиночних автомобілів в потоці від густини потоку та його швидкості на одиницю довжини ділянки автомобільного шляху.

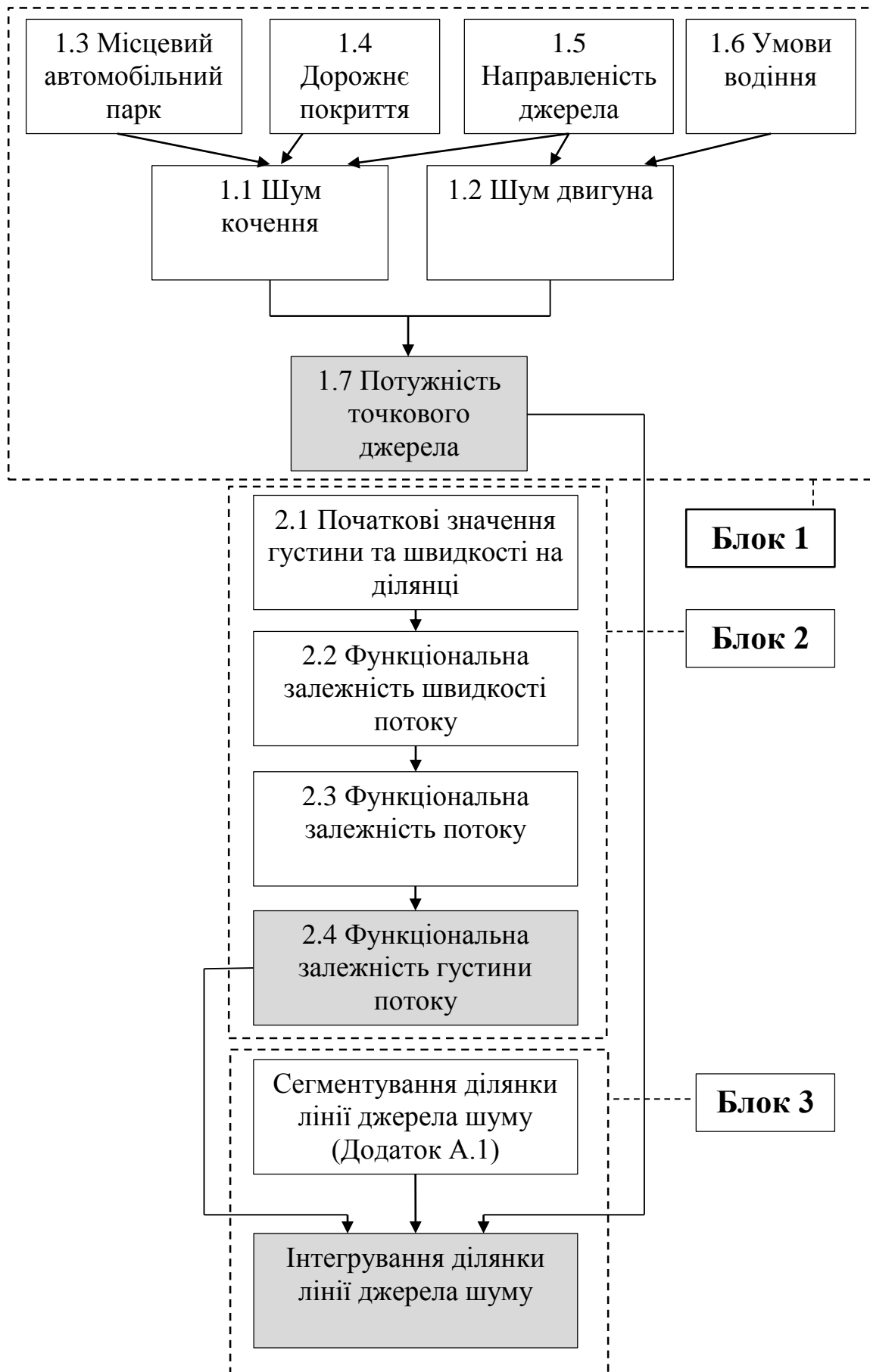


Рис. 2.3. Модель шуму транспортних потоків

На основі розрахованих потужностей окремих автомобілів (блок 1.7) та отриманої залежності густини потоку для досліджуваної ділянки автомобільного шляху (блок 2.4), а саме – кількості даних автомобілів на одиницю довжини блок 3 визначає інтегральну характеристику транспортного потоку. Таким чином, в блоці 1 моделюються точкові джерела шуму, а на основі залежностей, отриманих в блоці 2, блок 3 визначаються окремі точкові джерела і розраховуються лінійні джерела шуму (транспортний потік).

Кінцевим результатом моделювання в даному розділі виконане моделювання спектральних рівнів шуму для транспортних потоків.

Шум автомобільного та рейкового транспорту можна моделювати як шум лінійного некогерентного джерела шуму. Якщо один автомобіль або потяг необхідно представити більше, ніж одним джерелом (наприклад, щоб задати шум взаємодії шин з покриттям дороги та шум двигуна окремо), кожне точкове джерело відповідає некогерентному точковому джерелу. Різні смуги дороги також можуть бути представлені некогерентними лінійними джерелами.

2.2. Верифікація математичної моделі шуму транспортних потоків

Для верифікації розробленої моделі шуму транспортних потоків було проведено ряд експериментальних досліджень, які дозволили оцінити її точність та визначити межі застосування.

Верифікація проводилася для кожного етапу моделювання акустичних та макроскопічних характеристик окремих автомобілів та транспортних потоків.

Для визначення меж застосування моделі вимірювання шуму проводилися в різних містах України, на різних дорожніх покриттях та для транспортних потоків різної інтенсивності.

Вимірювання акустичних характеристик проїздів окремих автомобілів та руху автомобілів в потоці проводилися згідно вимог ГОСТ 20444–85 [171].

2.2.1. Експериментальні дослідження характеристик шуму окремого транспортного засобу

Вимірювання рівнів шуму окремих транспортних засобів різних категорій проводилось для одиночних автомобілів. Відстань заміру проїзду окремого автомобілю l_0 змінювалася від 20–50 м для легкових транспортних засобів та до 60–80 м для важких автомобілів. Всі вимірювання проводилися згідно вимог ГОСТ 20444–85 [171].

Вимірювання проводилися на дорожньому покритті типу щільний асфальтобетон (м. Київ) та з врахуванням поправки для дорожнього покриття типу бруківка для сильно пошкоджених дорожніх покриттів (м. Бурштин).

Всі дослідження проводилися для прямолінійної ділянки дорожнього шляху, без поворотів та світлофорів (прискорення $a=0$ м/с²) та куту нахилу дороги $\alpha_{road}=0^0$.

Результати вимірювань рівнів шуму створюваних проїздами окремих легкових транспортних засобів були зіставлені з результатами моделювання на основі розробленої в дисертаційному дослідженні моделі шуму транспортних потоків. Для моделювання спектральних характеристик шуму окремих транспортних засобів використовувався оптимізований алгоритм моделювання. Зіставлення результатів експериментальних досліджень та моделювання приведені на рис. 2.4– 2.7.

На рис. 2.4 приведені спектри рівнів шуму для легкових автомобілів I категорії для швидкостей 20–70 км/год. Отримані залежності показують, що створюваний шум є широкосмуговим непостійним рівнем шуму з основним вкладом в області низьких частот. Пікові рівні шуму спостерігаються для смуг частот 800–1000 Гц, що чітко виражено для швидкостей 40–70 км/год.

За результатами проведених досліджень встановлено, що розрахунок потужності легкових автомобілів дає більшу достовірність при $v \geq 40$ км/год. В табл. 2.1 розрахована абсолютна похибка моделювання по відношенню до експериментальних досліджень для сумарного еквівалентного рівня шуму в дБА. Звідси випливає, що значення абсолютної похибки зменшується при збільшенні швидкості легкового автомобіля та становить для 0,6 дБА для максимальної досліджуваної швидкості 70 км/год.

Таблиця 2.1

Залежність L_{Aeq} від швидкості руху транспортного засобу

v , км/год.	L_{Aeq} , дБА		E_{abs} , дБА
	Експеримент	Моделювання	
20	57,5	58,8	1,3
30	54,3	58,9	4,6
40	66,8	62,8	4,1
50	69,6	69,3	0,3
60	70,3	70,6	0,3
70	74,5	73,9	0,6

На рис. 2.5 показані довірчі інтервали (довірча ймовірність 95 %) для легкових автомобілів в 1/3 октавній смузі частот. За результатами проведених досліджень встановлено, що при збільшенні швидкості автомобілю стандартне відхилення зменшується, а точність та повторюваність експерименту зростає.

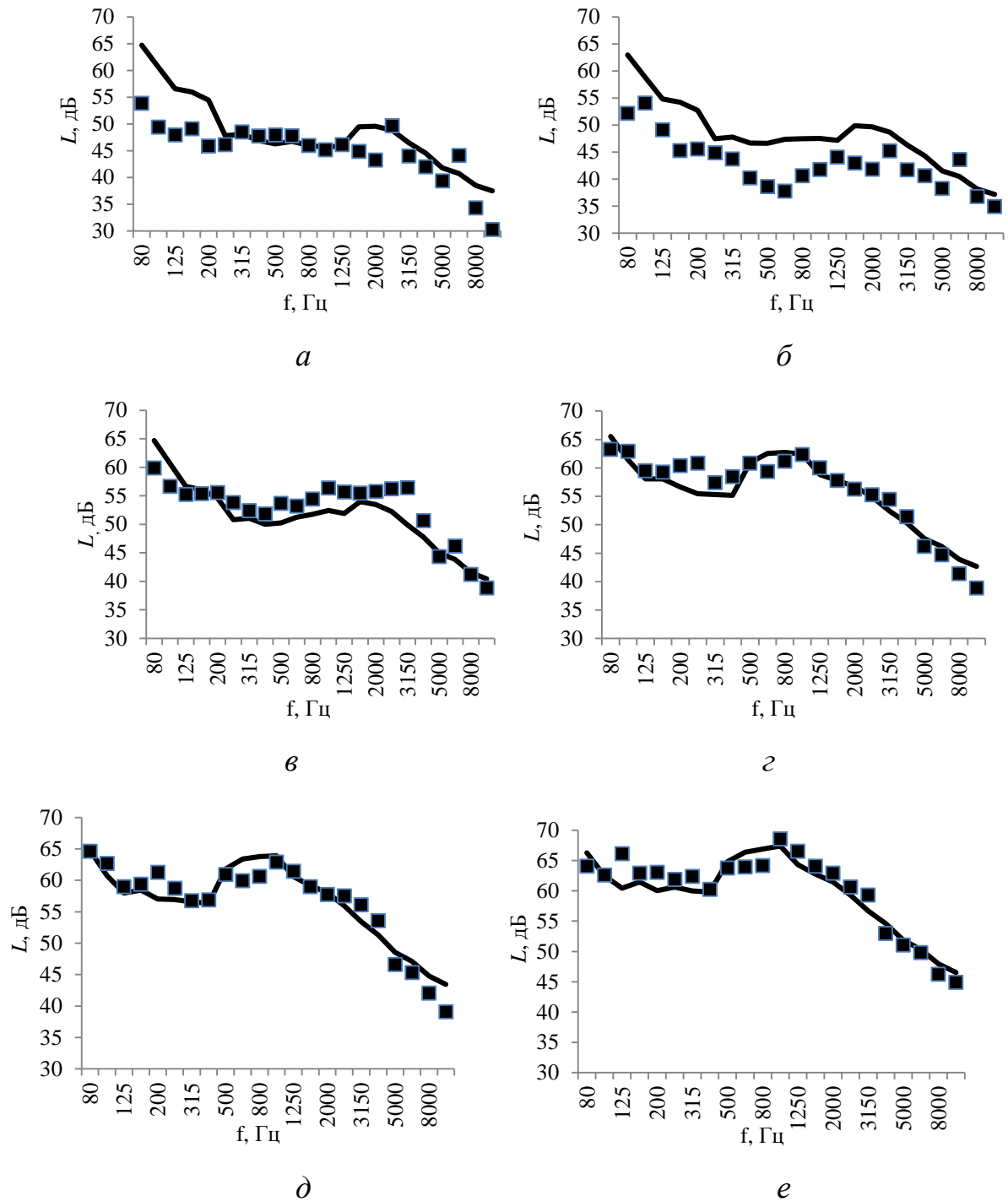


Рис. 2.4. Вимірний РЗТ в точці проїзду автомобіля – зіставлення результатів експериментальних досліджень проїздів легкового автомобіля (І категорія) в м. Київ для фіксованих швидкостей за результатами математичного моделювання: *a* – 20 км/год., *b* – 30 км/год., *c* – 40 км/год., *г* – 50 км/год., *д* – 60 км/год., *e* – 70 км/год.

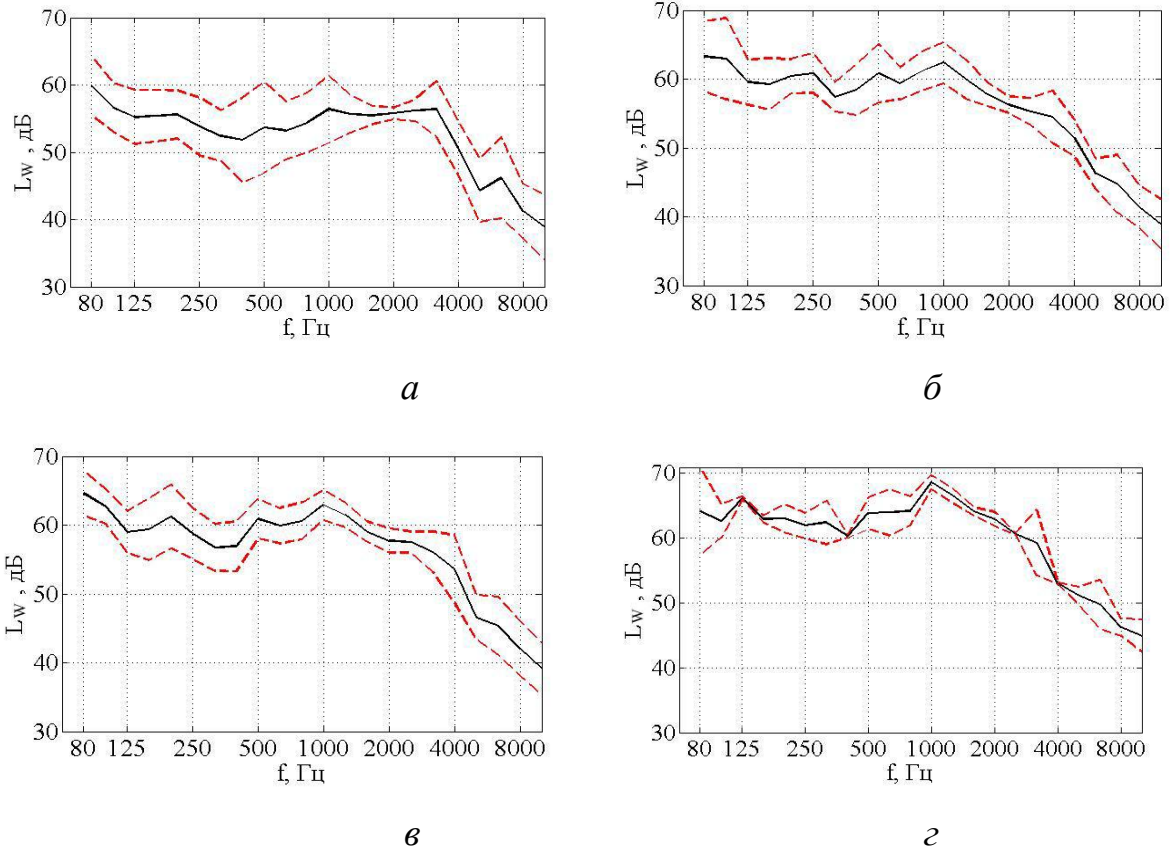


Рис. 2.5. Довірчі інтервали вимірювання РЗТ в точці вимірювання, створюваного проїздами окремого легкового автомобілю: *a* – 40 км/год., *б* – 50 км/год., *в* – 60 км/год., *г* – 70 км/год.

В табл. А.1 та на рис. 2.6 приведені результати розрахунку стандартного відхилення та довірчого інтервалу (довірча ймовірність 95 %) для сумарного еквівалентного рівня шуму для легкових автомобілів в залежності від швидкості їх руху. Встановлена залежність зниження стандартного відхилення при збільшенні швидкості проїзду автомобіля. Так, якщо для 20 км/год. воно становить 2,3 дБА, то при збільшенні швидкості до 70 км/год. – стандартне відхилення складає 1,1 дБА.

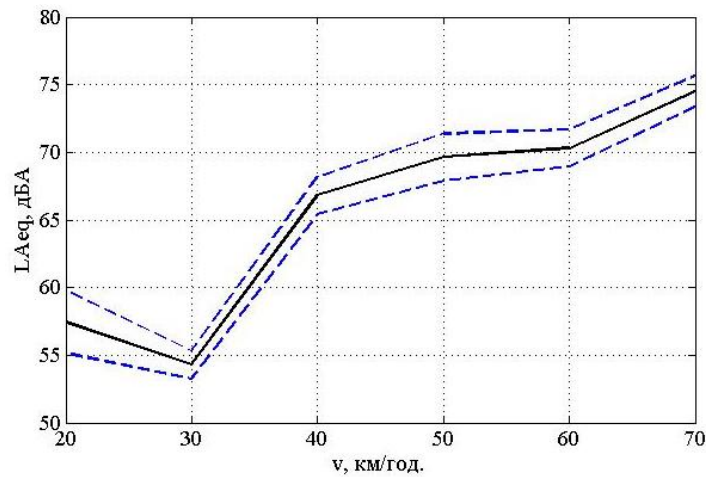


Рис. 2.6. Довірчий інтервал для проїздів легкових автомобілів для різних швидкостей руху

На рис. 2.7 – 2.8 та в табл. 2.2 представлені аналогічні результати для автомобілів II та III категорій.

Шум легкових автомобілів є широкосмуговим непостійним шумом. Проте, на відміну від автомобілів I категорії для автомобілів II та III категорій не спостерігається піків в області середніх частот. Рівні шуму монотонно спадають при збільшенні частоти звуку.

З наведених результатів видно, що для важких транспортних засобів відхилення менші, ніж для відповідних швидкостей легкових автомобілів. Це пов'язано з тим, що проїзди важких транспортних засобів на відповідних швидкостях створюють вищі рівні шуму (відповідно і перевищення над фоновим рівнем шуму > 10 дБ у всьому діапазоні частот), а тому результати вимірювань є точнішими. Так, з табл. 2.2 видно, що абсолютна похибка моделювання по відношенню до експериментальних результатів для еквівалентного рівня шуму становить 0,5 дБА для автомобілів II категорії та 0,9 дБА для III категорії.

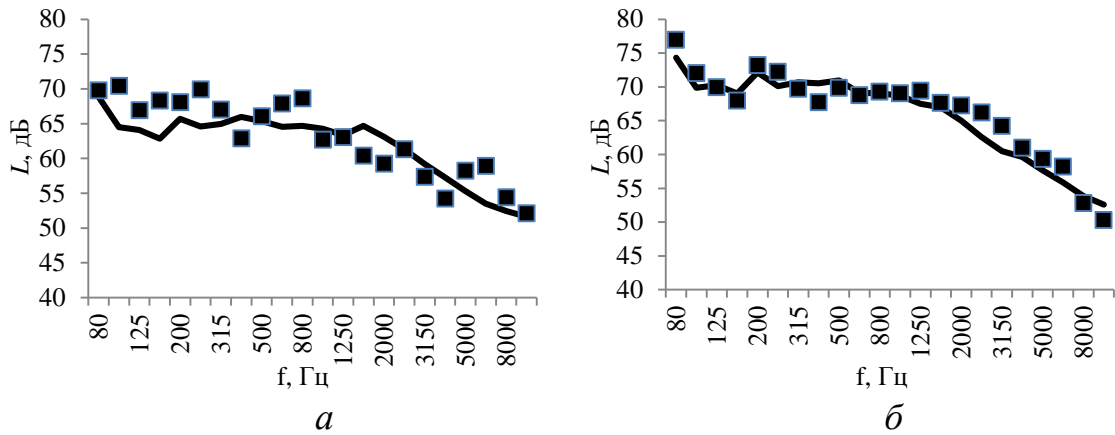


Рис. 2.7. Результати експериментальних досліджень РЗТ в точці прийому, створюваного проїздами вантажівок в м. Бурштин:
 а – 50 км/год. (II категорія), б – 55 км/год. (III категорія)

Таблиця 2.2

Абсолютна похибка моделювання E_{abs}
 еквівалентного рівня шуму для важких автомобілів

Категорія транспортних засобів	v , км/ГОД.	L_{Aeq} , дБА		E_{abs} , дБА
		Виміряне значення	Розраховане значення	
Вантажівки (II категорія)	55	74,4	74,0	0,5
Вантажівки (III категорія)	50	78,5	77,7	0,9

На рис. 2.8 показані довірчі інтервали для довірчої ймовірності 95 % для автомобілів II та III категорій в 1/3–октавній смузі частот. За результатами проведених досліджень встановлено, що в порівнянні з легковими автомобілями результати експериментальних досліджень важких транспортних засобів дають більшу точність та повторюваність результатів, та менші довірчі інтервали.

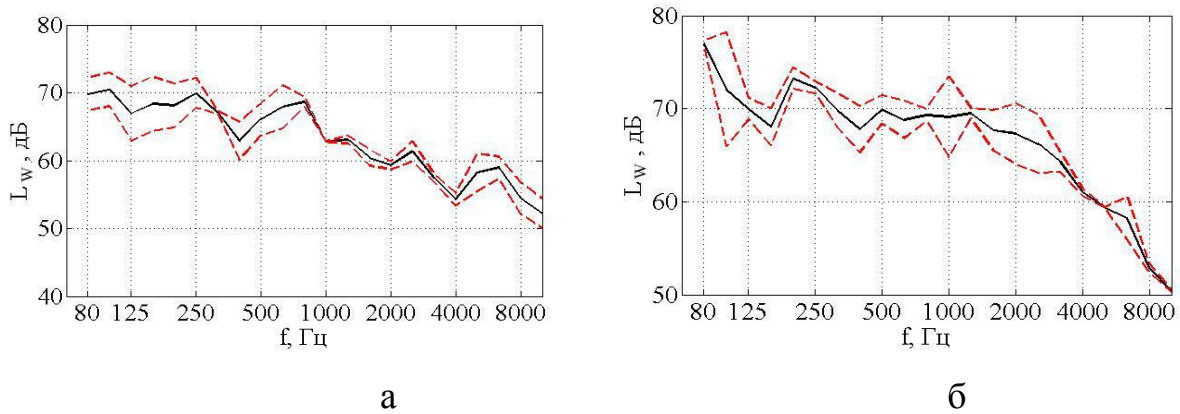


Рис. 2.8. Довірчі інтервали для вимірювання РЗТ в точці прийому, створюваного проїздами вантажівок: а – 50 км/год. (II категорія), б – 55 км/год. (III категорія)

2.2.2. Апробація макроскопічних залежностей розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків

Для верифікації макроскопічних залежностей руху транспортних засобів, що враховувалися в розробленій математичній моделі було проведено ряд експериментальних досліджень.

Для дослідження було обрано ділянку автомобільного шляху на Чоколовському бульварі м. Києва довжиною 500 м. Дана ділянка була розбита на сегменти по 50 м кожний.

Проводилася відеозйомка руху транспортних засобів на кожному досліджуваному сегменті, яка далі оброблялася для отримання бази даних залежностей інтенсивності руху транспортних засобів на кожному сегменті від часу, густини потоку на кожному сегменті та швидкості. Початок досліджуваної ділянки знаходився у межах руху вільного потоку, а далі кожен сегмент наближався до світлофору. Таким чином, це дало змогу проаналізувати змінювані макроскопічні характеристики при зміні руху від вільного потоку до повної зупинки на світлофорі (також може інтерпретуватися як умови затору на дорозі).

Швидкість вільного потоку становила 65 км/год. та знижувалася до 0 км/год. при зупинці при очікуванні на світлофорі. Максимальна густина потоку на сегменті руху становила 8 авт./од. довжини сегменту.

Дослідження проводилися для трьох смуг в руху в одному напрямку. Результати порівняння експериментальних досліджень та математичного моделювання приведені на рис. 2.9 для трьох смуг руху.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що крива залежності швидкості потоку від густини є монотонно спадаючою. Як слідує з отриманих результатів важливою характеристикою є швидкість зростання густини потоку на досліджуваній ділянці.

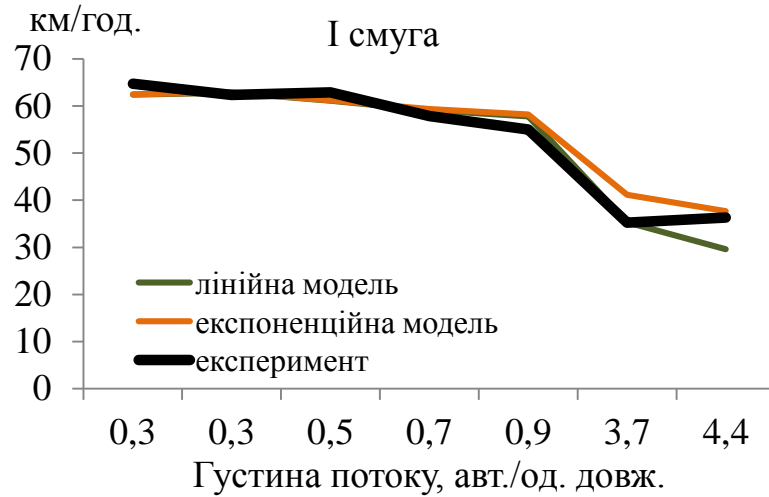
Так для I смуги, де швидкість зростання густини є невеликою та значні показники густини спостерігаються лише на останніх сегментах ділянки перед світлофором, залежність краще описується лінійною моделлю. Тоді як для II та III смуг, де швидкість зростання густини значно вища та значні показники 2–3 авт./од. довжини спостерігаються вже з 4–5 сегменту ділянки залежність краще описується експоненційною моделлю.

Обробка результатів моделювання та вимірювання подана в табл. 2.3, де ЛМ позначає лінійну модель залежності швидкості від густини потоку, а ЕМ – експоненційну модель.

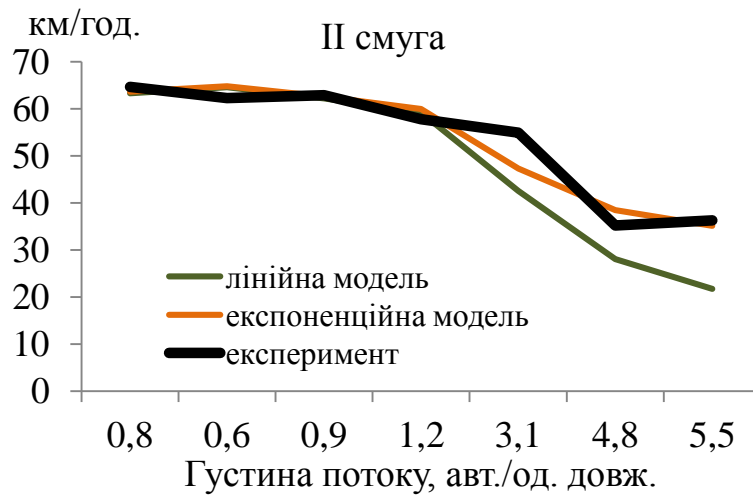
Таблиця 2.3

Точність результатів моделювання макроскопічних характеристик
транспортного потоку

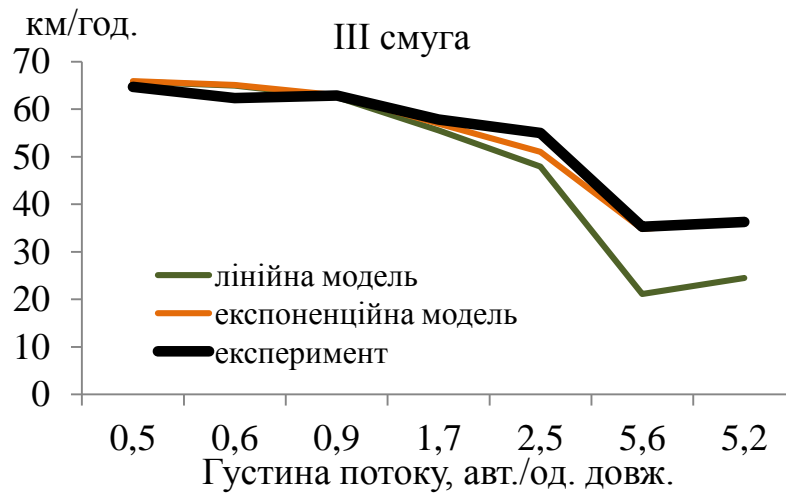
№ сегменту	Відносна похибка моделювання, %					
	I смуга		II смуга		III смуга	
	ЛМ	ЕМ	ЛМ	ЕМ	ЛМ	ЕМ
1	3,6	3,5	2,1	1,6	1,7	1,9
2	0,8	0,8	3,7	4,0	4,2	4,5
3	2,9	2,7	1,1	0,4	0,6	0,0
5	2,1	2,6	2,4	3,8	4,0	1,6
6	5,1	5,8	22,5	13,9	12,9	7,1
7	0,2	16,8	20,4	9,1	40,1	1,2
8	18,5	3,8	40,2	3,3	32,5	0,7



а



б



в

Рис. 2.9. Макроскопічні залежності швидкості руху від густини потоку:

а – перша смуга, б – друга смуга, в – третя смуга руху

Наведені в таблиці результати показують, що точність моделювання знижується при наближенні до сегменту, де розташований світлофор, що визначається як сегмент з високою густиною потоку 4–5 авт./од. довжини та невеликими швидкостями 20–30 км/год.

Тому макроскопічні залежності слід використовувати в математичній моделі шуму транспортних потоків з урахуванням характеристик таких потоків.

2.2.3. Апробація розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків

Для верифікації розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків було проведено ряд експериментальних досліджень.

Вимірювання рівнів шуму від транспортних потоків проводилося згідно ГОСТ 20444–85 [171]. Для визначення еквівалентних рівнів шуму кожен замір тривав 15 хв. Отримані результати перераховувалися для еквівалентних рівнів шуму, створюваних відповідними транспортними потоками за одну годину. Кількісні характеристики виміряних транспортних потоків наведені в табл. А.2.

Транспортні потоки являються лінійними широкосмуговими джерелами шуму. В табл. 2.4 наведена абсолютна похибка моделювання по відношенню до результатів експериментальних досліджень. Так, для транспортних потоків з інтенсивністю більше 4000 авт./год. абсолютна похибка розрахунків становить 1,1 дБА, то для невеликих транспортних потоків похибка досягає 5,1 дБА.

Такі результати можна пояснити кількістю подій проїздів автомобілів: чим вона вища – тим вища точність моделювання, тому для інтенсивних транспортних потоків похибка моделювання нижча.

Абсолютна похибка моделювання еквівалентного рівня шуму
транспортних потоків

Місце проведення дослідження	L_{Aeq} , дБА		E_{abs} , дБА
	Результати експериментальних досліджень	Результати Моделювання	
м. Бурштин	64,0	69,2	5,1
м. Київ, просп. Відрадний	71,4	68,9	2,5
м. Київ, Чоколівський бульвар	78,8	79,9	1,1

Таким чином, з вище сказаного, можна зробити висновок, що розроблена математична модель краще працює в умовах інтенсивних транспортних потоків. При моделюванні невеликих транспортних потоків (менше 400 авт./год.) розроблену в розроблену математичну модель слід вводити поправки, що враховують склад та інтенсивність потоку.

2.3. Параметричне дослідження математичної моделі транспортного потоку

Розроблена та верифікована математична модель транспортних потоків дозволила провести ряд параметричних досліджень впливу характеристик руху на створювані рівні шуму від транспортних потоків. Результати проведених досліджень можуть бути використані для розробки методів зниження та регулювання шумового навантаження в сучасних містах.

2.3.1. Параметричне дослідження впливу характеристик руху автомобіля на потужності окремого транспортного засобу

Результати параметричних досліджень адаптованої моделі акустичної потужності окремого транспортного засобу з врахуванням типу дорожніх покриттів для автомобільних доріг України приведені на рис. 2.10.–2.18.

Встановлено, що при підвищенні швидкості легкових автомобілів на 10 км/год. еквівалентний рівень шуму зростає приблизно на 2–3 дБА. Для автомобілів першої категорії крива є монотонно зростаючою на відміну від 2–ої та 3–ої категорій транспортних засобів. Для вантажівок мінімум шуму спостерігається при швидкості 20 км/год., тоді як швидкості 10 км/год. та 40 км/год. дають однакові створювані рівні шуму. В загальному ріст еквівалентного рівня шуму є майже аналогічним та становить 1,5 – 2 дБА при збільшенні швидкості на 10 км/год.

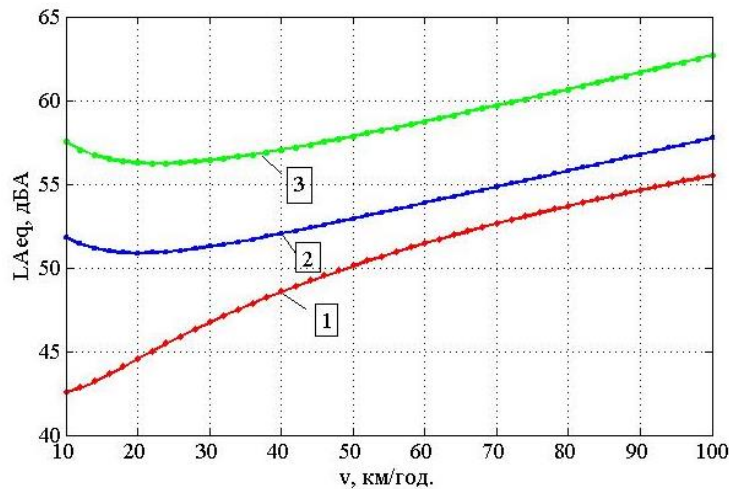


Рис.2.10. Дослідження залежності L_{Aeq} від швидкості транспортного засобу v : 1 – легкові автомобілі, 2 – важкі транспортні засоби з двома осями (чотирма та більше колесами), 3 – важкі транспортні засоби з більше, ніж двома осями

Як було зазначено вище, встановлені [37] коефіцієнти шуму кочення та шуму роботи силової установки дозволяють визначити рівень шуму для базових умов водіння та прийнятого дорожнього покриття.

Проте розглядаючи дорожні покриття в Україні слід зазначити, що вони значним чином відрізняються від базових, за винятком сучасних автомагістралей. Для вулиць з невеликим транспортним навантаженням наявність пошкоджень в дорожніх покриттях веде до необхідності застосування поправок, що враховують такі пошкодження. Результати моделювання впливу типу дорожнього покриття на створювані рівні шуму показані в табл. 2.5. В таблиці наведені результати розрахунків рівнів шуму для різних транспортних потоків, починаю з граничного випадку, де транспортний потік складається з 3 автомобілів, по одному кожної категорії, та до реальних умов, де транспортний потік становить 1000 авт./год.

Аналізуючи вплив типу дорожнього покриття було зроблено висновок, що значні підвищення рівнів шуму для більш шумних дорожніх покриттів спостерігаються для значних транспортних потоків, як показано на рис. 2.11. Аналіз результатів (рис. 2.11) показав, що рівень шуму підвищується при збільшенні автомобілів в транспортному потоці для шумних дорожніх покриттів, так і підвищується ефект поглинання шуму для звукопоглинаючих дорожніх покриттів, таких як пористі асфальтобетони. Це пов'язано з ефектом накопичення зниження шуму при збільшенні кількості автомобілів. Проте таке зниження шуму є відносним, так як самі рівні шуму від транспортних потоків зростають при збільшенні кількості автомобілів. Так для потоку в 1000 авт./год. $L_{Aeq} = 79$ дБА, тоді як для потоку 100 авт./год – відповідно $L_{Aeq} = 69$ дБА, при дорожньому покритті – пористий двохаровий асфальтобетон, тоді, коли зниження шуму становить 1,5 дБА для потоку 100 авт./год та 2 дБА для потоку в 1000 авт./год.

Таблиця 2.5

Вплив типу дорожнього покриття на еквівалентні рівні шуму створювані транспортним потоком

Тип дорожнього покриття	L_{Aeq} , дБА для транспортного потоку (загальна кількість транспортних засобів всіх категорій), авт./год.		
	3*	100	1000
Базове дорожнє покриття	57,8	68,4	77,6
Пористий асфальтобетон 6/16	57,5	67,5	76,5
Двохшаровий пористий асфальтобетон	57,3	66,8	75,6
Бетон поперечно обробленої щіткою поверхнею	58,1	69,0	78,3
Бетон з голим заповнювачем	57,9	69,0	78,4
Камінь литого асфальту 0/6	57,7	67,8	76,8
Поверхневий шар зносу дорожнього покриття	58,0	69,4	79,0
Бруківка	59,8	72,2	82,0
Гарячекатаний асфальт з 20 мм щебенем прокату на поверхні	58,2	69,6	79,2

* По одному транспортному засобу 1,2 та 3 категорій

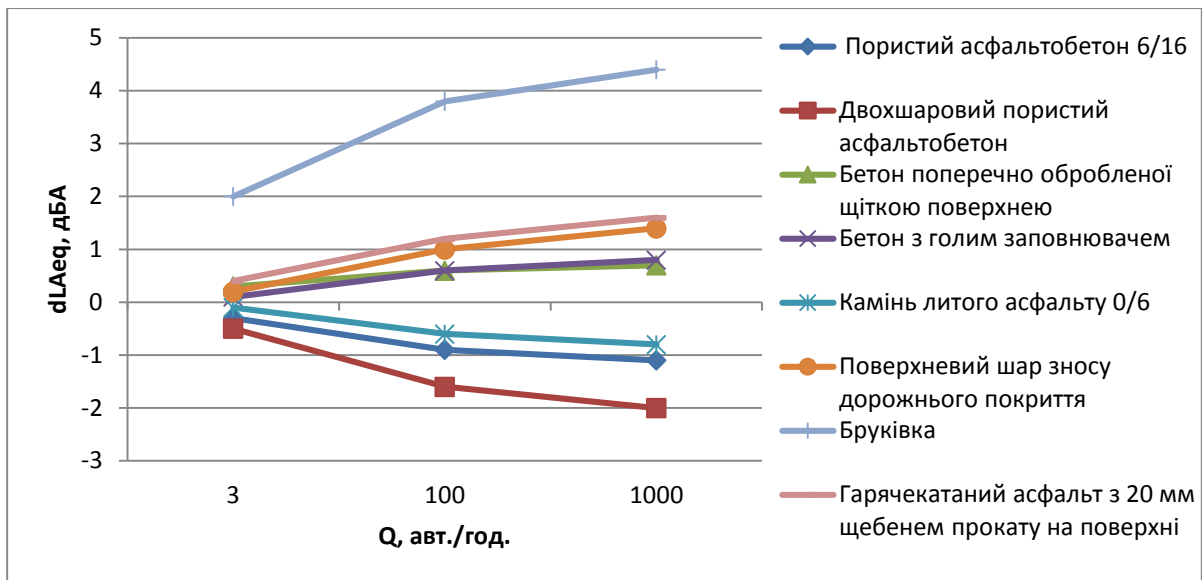


Рис.2.11. Залежність зміни L_{Aeq} для різних транспортних потоків та різних типів дорожніх покриттів

Далі приведені результати досліджень впливу умов водіння на створювані рівні шуму. Результати моделювання рівнів шуму при різних прискореннях та сповільненнях автомобіля приведені на рис. 2.12.–2.14. З рисунків видно, що залежність є лінійною та монотонно зростаючою для всіх трьох категорій транспортних засобів та становить приблизно 5 дБА для прискорення на 1 м/с^2 . Згідно графікам сповільнення автомобіля знижує створювані рівні шуму порівняно з рухом без прискорення.

Аналізуючи зміни шуму по категоріям, було показано, що на автомобілі 2 та 3 категорії (важкі транспортні засоби) прискорення автомобіля впливає значним чином та може становити до 10 дБА підвищення рівнів шуму для прискорення автомобіля 2 м/с^2 .

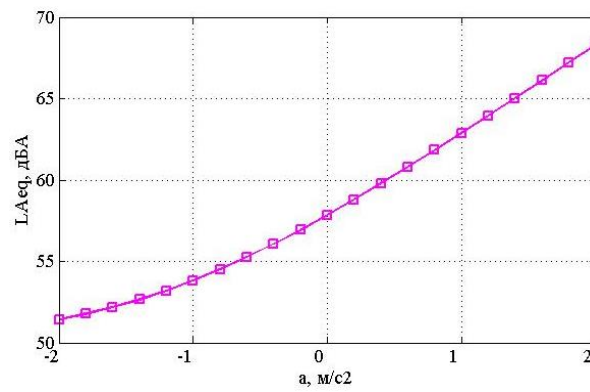


Рис. 2.12. Дослідження залежності L_{Aeq} від прискорення транспортного засобу в межах роботи моделі

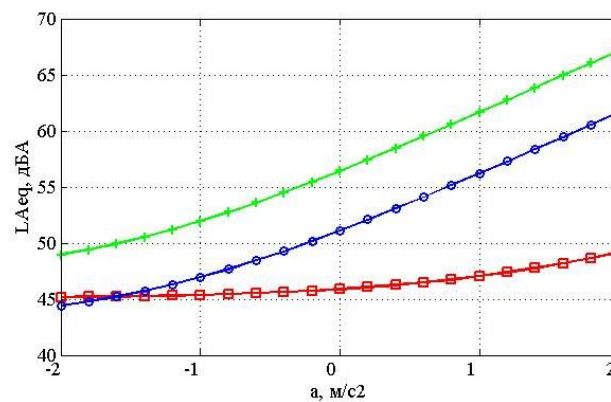


Рис. 2.13. Дослідження залежності L_{Aeq} від прискорення транспортного засобу: 1 – легкові автомобілі, 2 – важкі транспортні засоби з двома осями (чотирма та більше колесами), 3 – важкі транспортні засоби з більше, ніж двома осями

На рис. 2.14. показані контури залежностей L_{Aeq} від швидкості та прискорення для кожної обраної категорії транспортних засобів. Характер показаних залежностей пояснюється вкладом кожного з під джерел шуму в автомобілях трьох категорій та додаткових поправок на умови водіння.

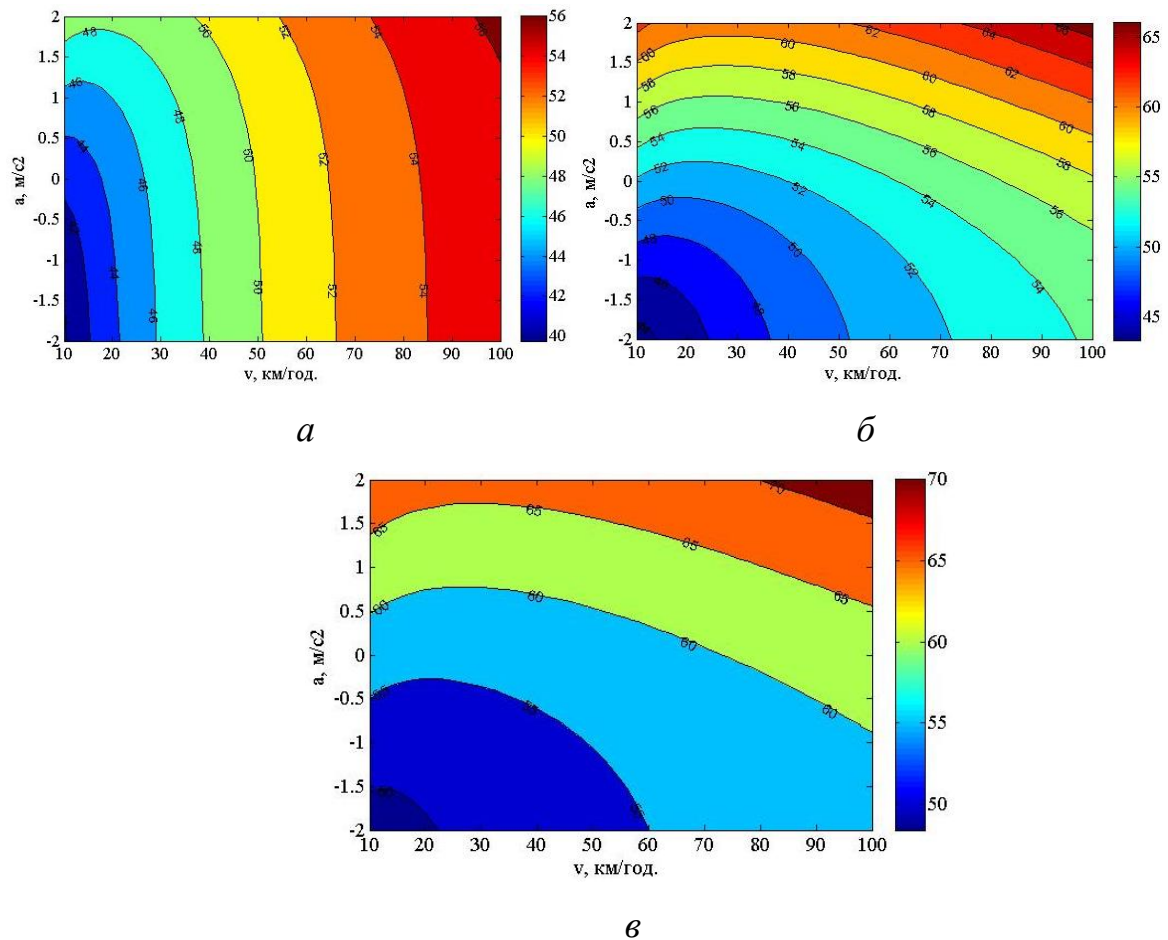


Рис.2.14. Залежність L_{Aeq} , дБА від швидкості транспортного засобу та його прискорення: *a* – легкові автомобілі, *б* – важкі транспортні засоби з двома осями (чотирма та більше колесами), *в* – важкі транспортні засоби з більше, ніж двома осями

Дослідження впливу градієнту дороги на L_{Aeq} показано на рис. 2.15. Спостерігається лінійна залежність між кутом нахилу автомобільної дороги та L_{Aeq} , що становить приблизно 1 дБА підвищення L_{Aeq} шуму при збільшенні кута нахилу на 1° .

Взаємний вплив градієнту дороги та прискорення показаний на рис. 2.16 та досліджувався тому, що згідно [37] кут нахилу дороги безпосередньо впливає на прискорення/сповільнення транспортного засобу. Видно, що створювані рівні шуму монотонно зростають при збільшенні кута нахилу дороги та збільшенні прискорення.

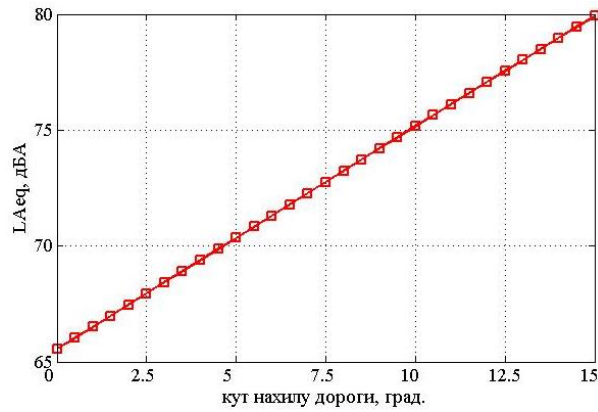


Рис.2.15. Дослідження залежності L_{Aeq} від градієнту дороги

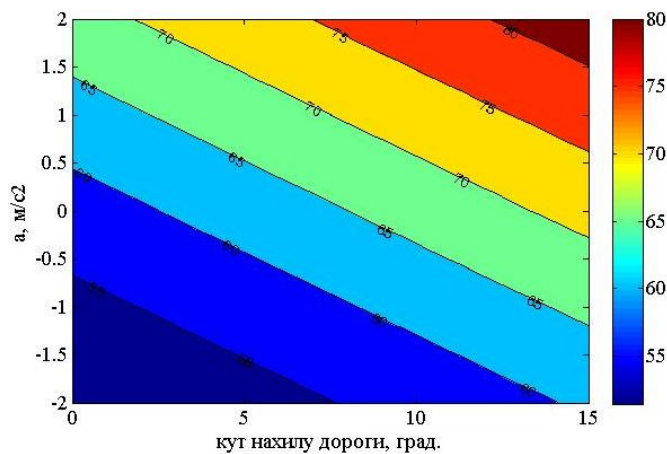


Рис.2.16. Дослідження залежності L_{Aeq} , дБА від градієнту дороги та прискорення

Ще одним досліджуваним параметром був вплив направленості джерела шуму – автомобілів різних категорій. Так як в формули розрахунку [37] входять вертикальні та горизонтальні кути направленості джерела шуму, тому досліджувався вплив висоти приймача та відстані між джерелом шуму та точкою спостереження на формування еквівалентного рівня шуму.

Виявлено, що вплив направленості джерела визначається величиною $<0,1$ дБА, що є меншим за похибку моделювання, а тому не може враховуватися, а також при таких величинах не може суттєво впливати на сумарний еквівалентний рівень шуму. Тому можна стверджувати, що одиночний автомобіль можна розглядати як точкове ненаправлене джерело шуму.

2.3.2. Параметричне дослідження макроскопічних залежностей параметрів транспортних потоків

З метою визначення макроскопічних характеристик транспортних потоків та виявлення межі застосовуваності моделі проведено ряд параметричних досліджень. Всі три основні параметри транспортного потоку – кількість автомобілів за годину, швидкість потоку та його густина – є вхідним даними для розрахунку законів емісії шуму від окремих автомобілів та потоків автомобілів.

Проведено дослідження залежності різних моделей для швидкості в залежності від густини транспортного потоку, де ρ визначається як кількість автомобілів на 1 км лінійного сегменту дороги. Дослідження проводилися для однієї смуги дороги для ρ змінюється від 10 авт./км (вільна дорога, швидкість потоку дорівнює швидкості вільного потоку транспортних засобів) до 160 авт./км (затор, на один автомобіль припадає приблизно 7 м дороги, швидкість потоку падає до 0). Моделі швидкості транспортного потоку записані рівняннями (2.12)–(2.16).

$$v = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{jam}} \right) \quad (2.12)$$

де v_f – швидкість вільного потоку, км/год., ρ_{jam} – густина потоку в заторі, авт./км.

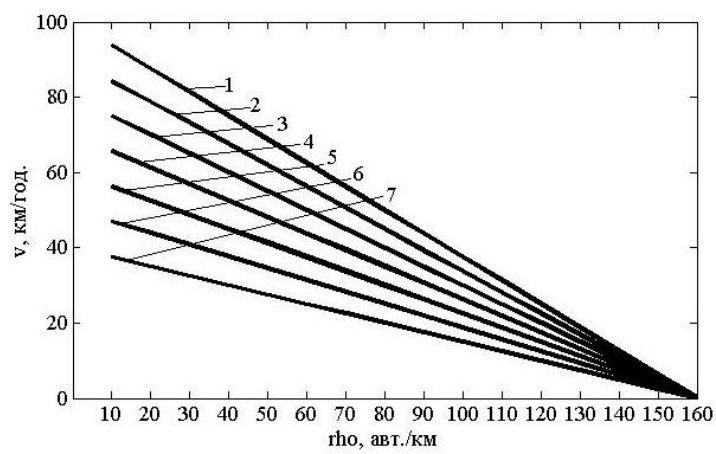
$$v = v_f - \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{jam}} \right), \quad (2.13)$$

$$v = v_f e^{-\frac{\rho}{\rho_{jam}}}, \quad (2.14)$$

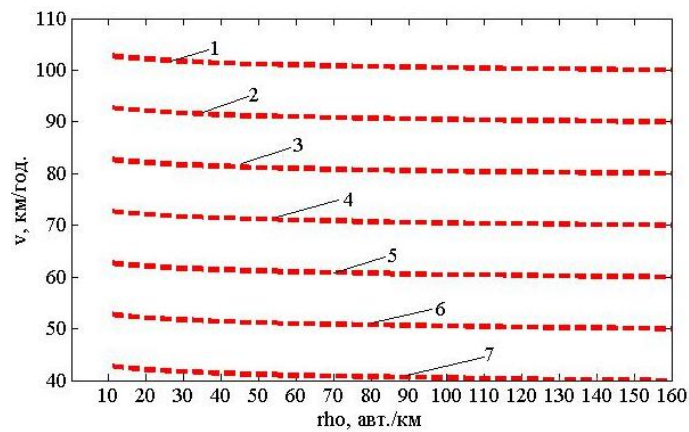
$$v = 54.9e^{-\frac{\rho}{163.9}}, \quad \text{при } \rho \leq 50 \quad (2.15)$$

$$v = 28.6 \ln\left(\frac{162.5}{\rho}\right), \quad \text{при } \rho \leq 50 \quad (2.16)$$

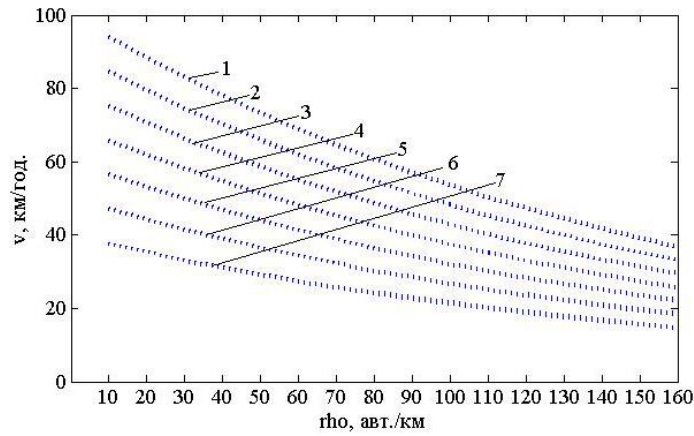
Результати моделювання приведені на рис. 2.18.–2.20.



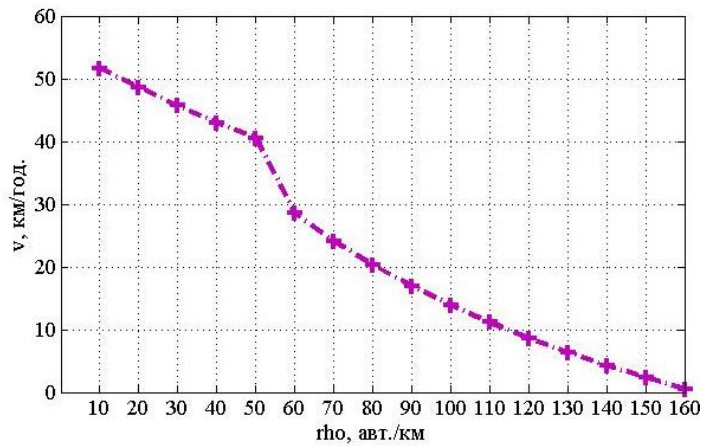
a



б



б



в

Рис.2.18. Криві залежностей миттєвої швидкості від швидкості вільного потоку: *а* – лінійна модель, *б* – логарифмічна модель, *в* – експоненційна модель, *г* – модель Едді; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – швидкості вільного потоку 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 км/год. відповідно

На рис. 2.18. показана залежність миттєвої швидкості потоку від відношення, що визначалося як $drho = \frac{\rho(z,t)}{\rho_{jam}(z,t)}$, де $\rho(z,t)$ – миттєва густина потоку, $\rho_{jam}(z,t)$ – густина транспортного потоку в заторі. Для даного дослідження $\rho_{jam}(z,t)=160$ авт./км. З рис. 2.19 видно, що для логарифмічної моделі Грінберга при $drho = 1$ швидкість вільного потоку майже не відрізняється

від початкової швидкості, що не може достовірно моделювати транспортні потоки в умовах затору.

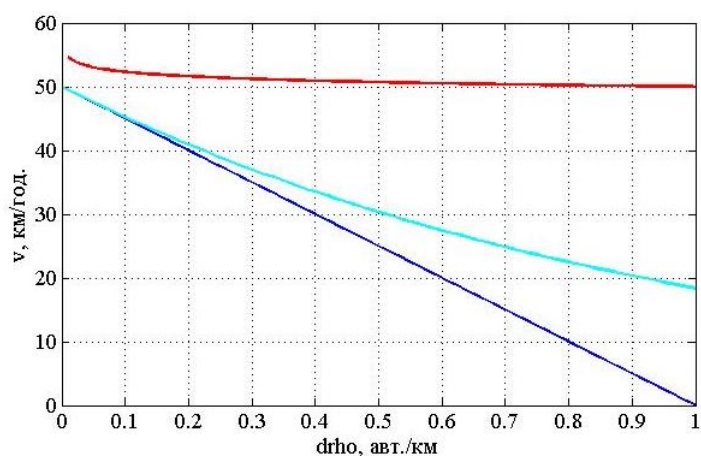


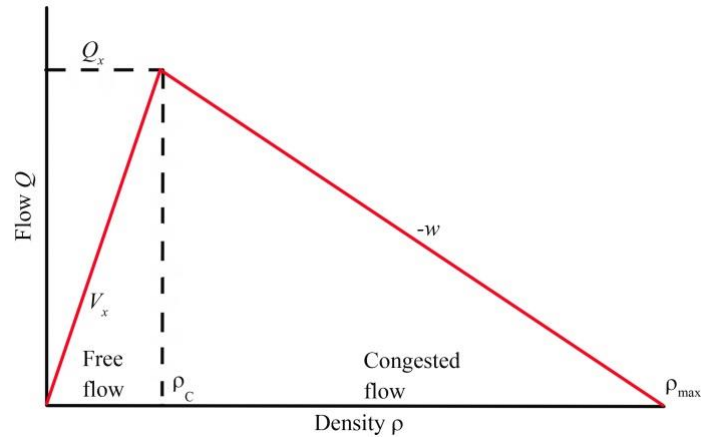
Рис.2.19. Порівняння трьох моделей швидкості транспортного потоку: синя лінія – модель Гріншлда, червона лінія – модель Грінберга, блакитна лінія – модель Андервуда

Для відображення динаміки транспортного потоку використана фундаментальна діаграма, що представляє всі положення рівноваги, в яких може перебувати транспортних потік в залежності від конфігурації дороги [72–69]. На даній діаграмі (рис. 2.20) розрізняється два режими: вільний потік та затор. У вільному потоці сегмент дороги може поглинати додаткові автомобілі (збільшення густини потоку) без насичення (збільшення потоку). В заторі дорожній сегмент не може більше поглинати автомобілі, тому підвищення густини буде підвищувати насичення (зниження потоку). Така діаграма дає найточніше представлення динаміки міського потоку, що піддається моделюванню. Дана діаграма характеризується трьома параметрами: максимальною швидкістю V_x , що досягається у вільному потоці, хвильовою швидкістю w , що визначає початок формування затору на сегменті дороги та максимальною густиною ρ_{max} , що досягається коли всі автомобілі зупиняються в заторі (швидкість потоку дорівнює нулю).

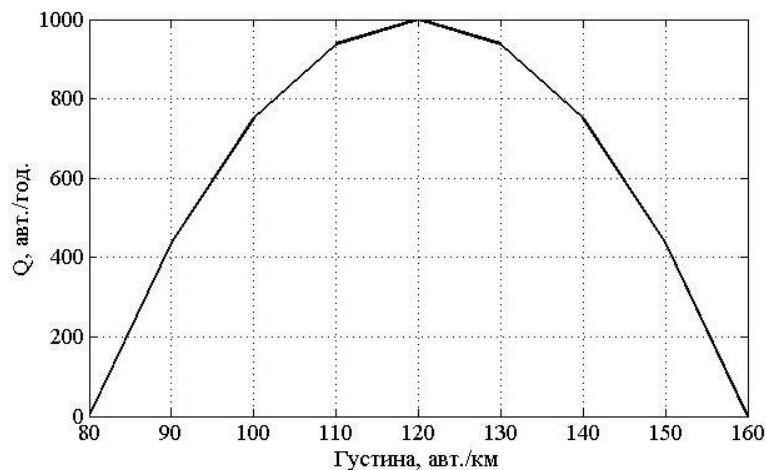
На рис. 2.20, а показано схематичне зображення залежності кількості автомобілів за годину від густини потоку на обраній ділянці автомобільного

шляху. На рис. 2.20, б побудована фундаментальна діаграма для лінійної моделі швидкості (рівняння (2.12)) та параболічної моделі динаміки кількості автомобілів за годину руху транспортного потоку (рівняння (2.17)).

$$Q = -\left(\frac{\rho_{jam}}{v_f}\right)v^2 + \rho v \quad (2.17)$$



a



б

Рис.2.20. Фундаментальна діаграма для однієї смуги: Q_x – максимальний потік; ρ_{max} – максимальна густина; ρ_c – критична густина; w – хвильова швидкість; V_x – максимальна швидкість; а – схематичне зображення, б – приклад фундаментальної діаграми для лінійної моделі швидкості транспортного потоку

Дані, отримані в результаті макроскопічного моделювання, використовувалися як вихідні при розрахунках рівнів шуму від транспортних потоків для сегменту дороги.

2.3.3. Параметричне дослідження чисельної моделі лінійного некогерентного джерела шуму – транспортного потоку

Результати параметричних досліджень транспортних потоків показані на рис. 2.21.–2.23. та проведені як результат попередніх досліджень акустичної потужності окремого автомобілю та функціональних залежностей руху автомобілів на ділянці шляху. Отримані в результаті макроскопічного моделювання залежності для швидкості потоку v та характеристики потоку Q використані в даному розділі.

Залежність L_{Aeq} від швидкості потоку (рис. 2.21) показує аналогічну залежність як і для окремих автомобілів (рис. 2.10). Характерною особливістю є те, що мінімальне значення рівнів шуму спостерігається на швидкості 20 км/год.

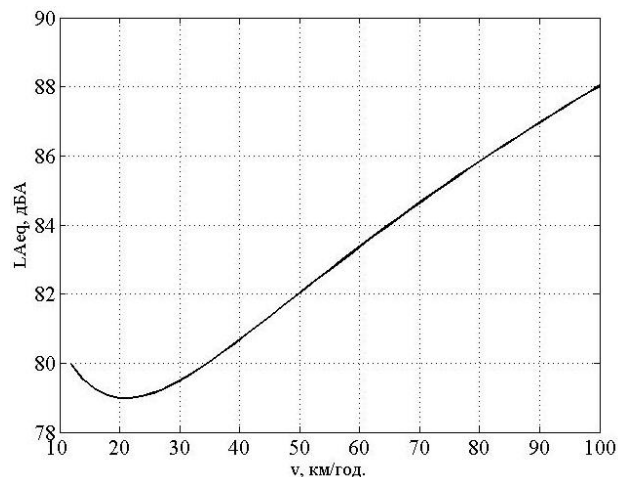


Рис.2.21. Дослідження залежності L_{Aeq} , дБА від швидкості транспортного потоку

Залежність L_{Aeq} від об'ємів транспортних потоків Q (рис. 2.22) є монотонно зростаючою. Швидкість зростання рівнів шуму спадає при збільшенні транспортного потоку. Наприклад, при збільшенні потоку від 400 до 1000 авт./год. L_{Aeq} зростає на 5 дБА; при збільшенні потоку від 1000 до 1600 авт./год. L_{Aeq} зростає на 2 дБА; при збільшенні потоку від 1600 до 2200 авт./год. L_{Aeq} зростає на 1,5 дБА.

На основі експериментальних досліджень були отримані дані по складу транспортного потоку, що були внесені як вхідні дані в параметричне дослідження. Таким чином, транспортний потік складався з 95,7 % автомобілів I категорії, 3 % автомобілі II категорії та 1,3 % автомобілі III категорії. Так як досліджувалися вулиці міста, що проходять через житлові мікрорайони – в транспортному потоці переважали легкові автомобілі.

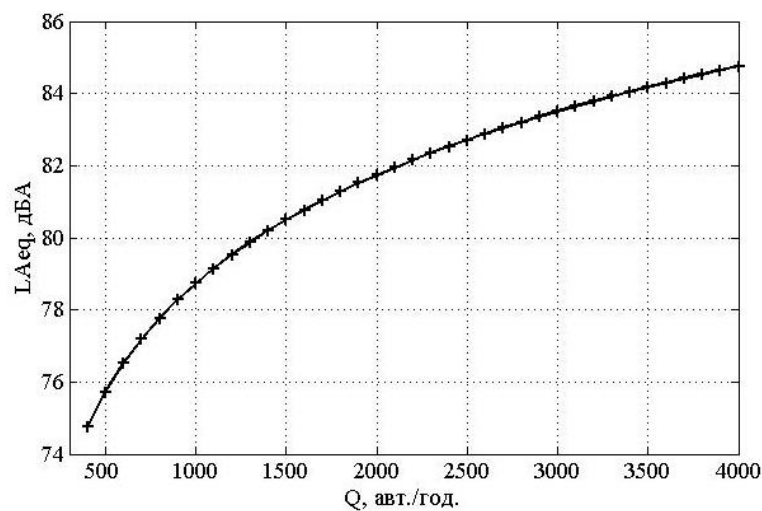


Рис.2.22. Дослідження залежності L_{Aeq} від кількості автомобілів за годину

На рис. 2.23 наведено взаємозалежності між швидкістю потоку, об'ємом даного потоку та створюваними L_{Aeq} . Характерна особливість швидкості потоку 20 км/год. значною мірою проявляється для значних об'ємів транспортних потоків. Така ситуація може бути характерною для транспортного потоку в стані близькому до затору, коли $\rho(z, t) \rightarrow \rho_{jam}(z, t)$.

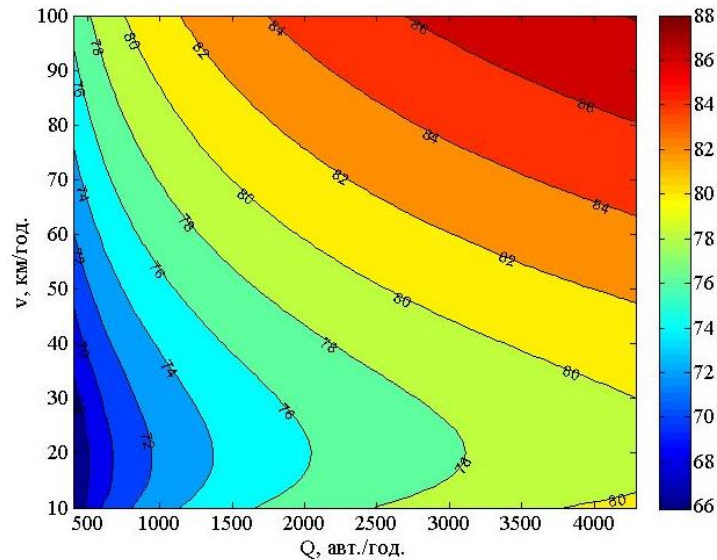


Рис.2.23. Дослідження залежності L_{Aeq} від кількості автомобілів за годину

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 2

1. Розроблено математичну модель рівнів шуму транспортних потоків (лінійного некогерентного джерела шуму), що включає три основні етапи моделювання – моделювання потужності окремих транспортних засобів, макроскопічних залежностей динаміки руху автомобілів в потоці та акустичних характеристик транспортних потоків.

2. Проведена експериментальна верифікація запропонованої моделі на автомобільних шляхах ряду міст України для транспортних засобів I–III категорій та швидкостей руху в діапазоні 20–70 км/год. Показано, що дана модель дає достовірні результати для швидкостей транспортних засобів 20–70 км/год, проте зі збільшенням похибки моделювання до 3 дБ для низьких швидкостей 20–30 км/год., коли перевищення над фоновим рівнем шуму < 10 дБА не дозволяє провести достовірні вимірювання створюваних рівнів шуму.

3. Експериментальна верифікація макроскопічних характеристик руху транспортного потоку показала аналогічні результати зниження точності моделювання для низьких швидкостей при формуванні заторів або зупинці перед світлофором. Розроблена модель дозволила вперше врахувати реальну

динаміку руху автомобілів в транспортному потоці на території сучасного міста. Основне завдання макроскопічного моделювання можна звести до вибору оптимальної моделі залежності швидкості руху транспортних засобів від положення на сегменті лінійного джерела шуму. Так, було показано, що для 2-ої та 3-ої смуг руху експоненційна модель дозволяє описати залежність швидкості руху автомобілів від густини потоку для заданого сегменту джерела шуму, тоді як для лінійна модель не працює для заданих умов.

4. Дослідження рівнів шуму створюваного транспортними потоками показало, що основним параметром, що впливає на точність моделювання є його інтенсивність. Аналізуючи розроблену модель шуму транспортних потоків було зроблено висновок, що вона дає точні результати для оцінювання рівнів шумового навантаження у великих сучасних містах (таких, як м. Київ) та потребує використання поправок на типи та стан дорожнього покриття, склад регіонального автомобільного парку та інтенсивність руху транспортних засобів при використанні для акустичної експертизи невеликих міст, що було досліджено при створенні карти шуму м. Бурштин.

4. Розроблена модель дозволила провести параметричне дослідження впливу характеристик руху автомобілів на створювані рівні шуму як окремими транспортними засобами, так і транспортного потоку, що дозволило зробити висновки щодо ефективності методів зниження шуму транспортних потоків.

Описану в даному розділі математичну модель оцінювання рівнів шуму від транспортних потоків реалізовано у вигляді частини прикладної програми USScape1.0. Основні результати опубліковано в наукових працях.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ШУМУ В МІСТІ

3.1. Постановка задачі оцінювання ефектів зниження шуму на шляху його розповсюдження

В даному розділі досліджені ефекти зниження транспортного шуму при його поширенні від джерела шуму до приймача. Розглядалися такі ефекти як дивергенція звуку, поглинання звуку в повітрі, ефекти інтерференції при відбиванні звукових променів від поверхні землі та вертикальних поверхонь, таких як фасади будівель або поверхні акустичних екранів, дифракція звуку на перешкодах, зниження шуму зеленими насадженнями.

На рис. 3.1. показано основні розрахункові блоки (на рисунку вони показані рожевим), що входили в модель зниження шуму на шляху його розповсюдження. Блакитним кольором позначено елементи, що були розроблені в дисертаційній роботі та виносяться на захист.

Дослідження інтерференції звукових хвиль відображалися в дослідженнях відбиття променів від горизонтальних поверхонь – поверхня землі та вертикальних поверхонь – поверхні фасадів будівель, а також поверхні акустичних екранів.

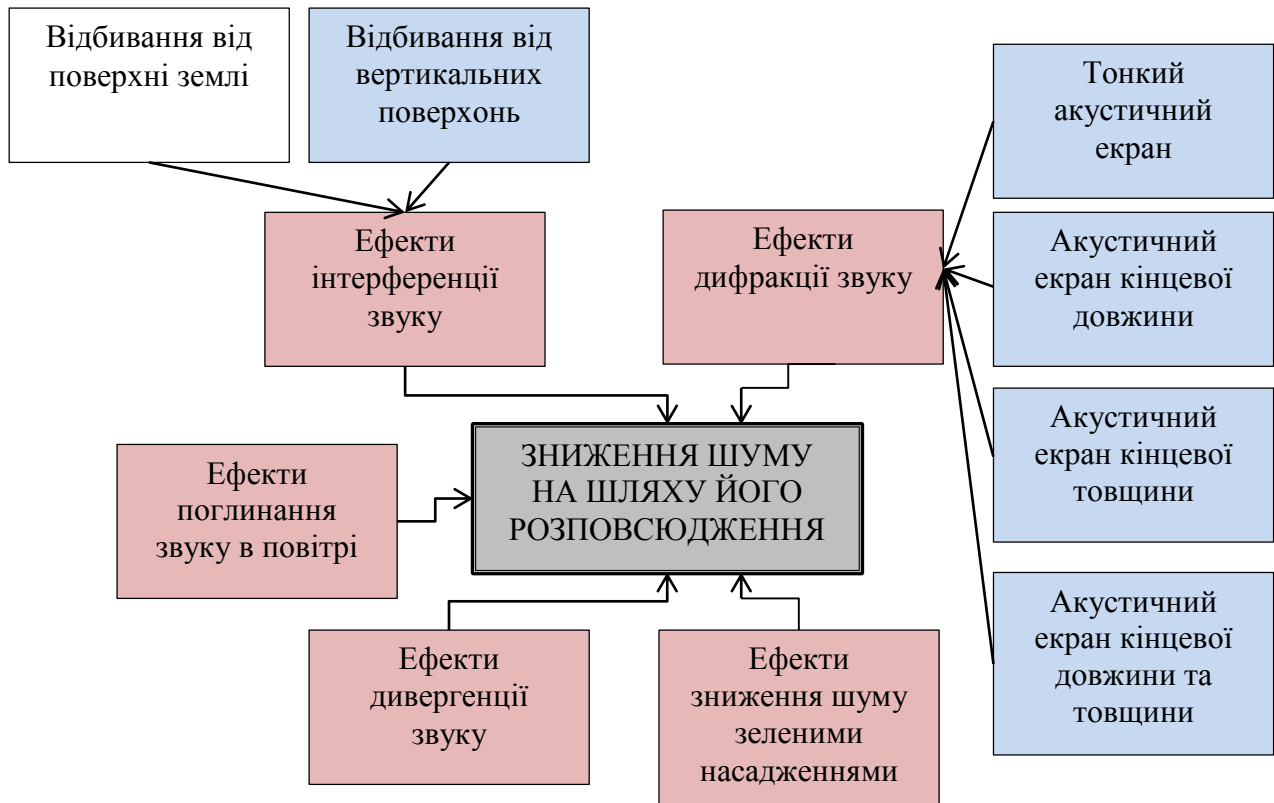


Рис. 3.1. Модель, що враховує основні ефекти поширення шуму

Основною розрахунковою формулою визначення загального зниження шуму при його розповсюдженні від акустичного джерела до приймача dL є наступне рівняння [48]:

$$dL = \Delta L_{div} + \Delta L_{abs} + \Delta L_{scr} - \Delta L_{ground} - \Delta L_{refl} + \Delta L_{green}, \quad (3.1)$$

де ΔL_{div} – зниження шуму завдяки ефекту дивергенції звукової хвилі, ΔL_{abs} – зниження шуму при поглинанні звукової хвилі в атмосферному повітрі, ΔL_{scr} – ефект дифракції звукових хвиль на перешкодах, що розташовані на шляху поширення звукових хвиль, ΔL_{ground} – зниження/підвищення шуму за рахунок ефектів інтерференції звукових хвиль при відбиванні від поверхні землі, ΔL_{refl} – зниження/підвищення шуму за рахунок ефектів інтерференції звукових хвиль при відбиванні від вертикальних поверхонь, таких, як фасади будинків, ΔL_{green} – зниження шуму смугами зелених насаджень.

Моделювання звукових полів в міському середовищі проводилися для лінійних гармонічних звукових коливань в пружному середовищі Ω , що описуються рівнянням Гельмгольца. Граничні умови задавалися імпедансними граничними умовами. Гармонічна залежність звукового тиску приймалася як $\hat{p}(\vec{x}, t) = \Re\{p(\vec{x})e^{-i\omega t}\}$.

Таким чином, гранична задача у просторі R^d (для $d = 2, 3$) була сформульована для гармонічних коливань звукового тиску p у вигляді формул (3.2)–(3.3):

рівняння Гельмгольца [82]:

$$\Delta p(\vec{x}) + k^2 p(\vec{x}) = 0 \quad \vec{x} \in \Omega \subset \mathfrak{R}^2 \quad (3.2)$$

та граничних умов [82]:

$$v_f(\vec{x}) - v_s(\vec{x}) = Y(\vec{x})p(\vec{x}) \quad \vec{x} \in \Gamma \quad (3.3)$$

де $k = \omega/c$ – хвильове число, де $\omega = 2\pi f$ – циклічна кутова частота, де f – частота звукових коливань, c – швидкість звуку, Y – граничний адмітанс, v_s – нормальна швидкість часток оточуючої структури. Нормальна швидкість часток середовища v_f відноситься до нормальної похідної звукового тиску як:

$$v_f(\vec{x}) = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial p(\vec{x})}{\partial n_x} = \frac{1}{sk} \frac{\partial p(\vec{x})}{\partial n_x}$$

де i – уявна одиниця ($i^2 = -1$), ρ_0 – середня густина середовища. Вектор $\vec{n}(\vec{x})$ представляє зовнішню нормаль до точки поверхні \vec{x} , а $\partial/\partial n_x$ – нормальна похідна в точці \vec{x} . Змінна s визначається як $s = i\rho c$.

Для виконання рівняння Гельмгольца (3.2) та граничних умов (3.3) розв'язування зовнішніх задач вимагає накладання умов затухання на безкінечності – умов Зомерфельда [84].

В дисертаційній роботі для розрахунку ефектів інтерференції звукових хвиль при відбиванні від поверхні землі, дивергенції звуку в повітрі, ефекту поглинання звукових хвиль при поширенні та зниження шуму смугами зелених насаджень використовувалися існуючі математичні моделі, приведені в розділі 1.2.2 формулами (1.1)–(1.4), (1.11).

Розрахункова схема променевої картини поширення звуку від джерела до приймача наведена на рис. 1.2.

Згідно даної схеми для моделювання зниження/підвищення шуму в результаті інтерференції звукових хвиль при відбиванні від поверхні землі використовувалася класична променева модель. Таким чином, звуковий тиск в точці прийому записувався у вигляді співвідношення (1.4).

Розрахунок ослаблення або посилення РТЗ в окремих смугах частотного спектру в результаті інтерференції звукових хвиль в точці прийому ΔL_{ground} здійснювався згідно формул (1.4) [48].

Поглинання звуку в повітрі ΔL_{abs} визначалося за допомогою співвідношення (1.3) [91].

Зниження шуму при проходженні через смуги зелених насаджень (СЗН) $\Delta L_{сзн}$ залежать [48] від ширини і кількості смуг, щільності крон дерев. Для розрахунку поглинання шуму СЗН використане емпіричне співвідношення (1.11) [48].

При врахуванні зниження шуму в результаті ефекту дивергенції ΔL_{div} при розповсюдженні звукових хвиль на відстань R визначалося для сферичних та циліндричних хвиль за допомогою співвідношень (1.1) –(1.2) [48].

Розрахункові формули реалізовані у програмному забезпеченні USScare1.0, розробленого в рамках дисертаційної роботи.

3.2. Розробка удосконаленої математичної моделі впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель

3.2.1. Математична модель формування звукових полів перед напівнескінченними імпедансними відбивачами

При моделюванні відбивання звукових променів від вертикальних поверхонь, припускалося, що прямий промінь від джерела шуму до приймача та відбитий від вертикальної поверхні промінь, що представлявся у вигляді уявного джерела, симетричного відносно вертикальної поверхні, є когерентними.

Таким чином, звукове поле в точці приймача визначалося суперпозицією прямого променя від джерела шуму до приймача та відбитими променями від горизонтальних та вертикальних поверхонь. Тому основними ефектами, що визначають формування звукових полів при багаторазових відбиттях є ефекти інтерференції звукових хвиль.

При моделюванні рівнів шуму перед фасадами фасад будівлі приймався як вертикальна напівнескінченна площина. Поверхня землі приймалася як перпендикулярна до площини фасаду. Поверхні землі та фасадів розглядалися як імпедансні поверхні. Припускалося, що дані поверхні є дзеркально відбиваючими. В дослідженні дифузні поверхні не розглядалися.

Вважалося, що розміри фасаду значно більші від розмірів довжин хвиль та поблизу немає інших будівель, що могли би вносити додаткові зміни в формування звукового поля.

Математична модель розроблялася з припущенням, що фасади є напівнескінченними відбивачами. Але реальні фасади мають кінцеві розміри, тому згідно теорії мають місце ефекти дифракції звукових хвиль на кромках перешкод [124]. Проте на кромках фасаду вони є незначними так як

припускалося, що точка вимірювання знаходилася біля центру лінійної довжини фасаду, коли довжини хвиль малі порівняно з розмірами фасаду.

Джерелом шуму вважався транспортний потік, що є лінійним некогерентним джерелом шуму. Згідно формули (2.8) зниження шуму розраховується для кожного окремого сегменту лінії джерела шуму, в центрі якого, згідно з припущенням, знаходиться точкове сферичне джерело шуму.

Для напівнескінченного відбивача звукове поле розраховувалося методом уявних джерел. Згідно з методом уявних джерел для наведеної спрощеної схеми при розповсюдженні звуку від джерела до приймача він проходить чотири різні шляхи як показано на рис. 3.2.

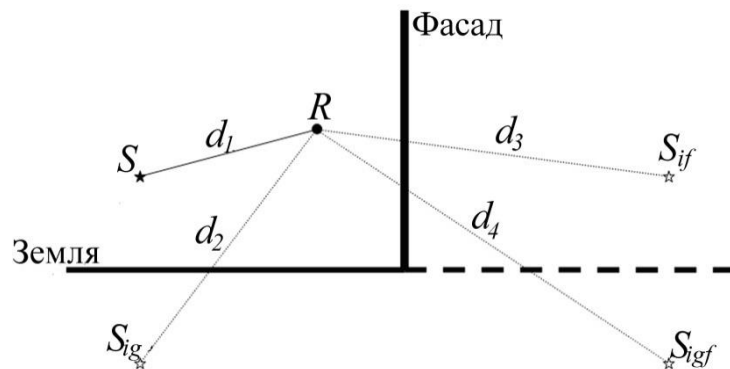


Рис. 3.2. Розрахункова схема визначення звукового поля біля фасаду будівлі, де S – джерело шуму, S_{ig} , S_{if} , S_{igf} – уявні джерела, R – приймач, d_1 , d_2 , d_3 , d_4 – відстані, що проходять звукові промені

Розрахунок зміни рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі як додаткової відбиваючої поверхні – фасаду проводився на основі моделі Хопкінса [124]. В дисертаційній роботі дана модель була удосконалена шляхом врахування коефіцієнту відбиття для сферичних звукових хвиль (додаток Б.1) [93], що дозволило досліджувати різні за імпедансними характеристиками поверхні землі та фасаду будівлі.

Таким чином, зміна рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі згідно запропонованій моделі розраховується за наступними формулами:

- зміна рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі відносно рівню звукового тиску у вільному полі:

$$\Delta L_{refl-1} = 20 \lg \left| \frac{\langle (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2 \rangle}{\langle (p_1 + p_2)^2 \rangle} \right|, \quad (3.4)$$

- рішення для звукового тиску у вільному полі:

$$\langle (p_1 + p_2)^2 \rangle = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12}),$$

- рішення для звукового тиску перед фасадом будівлі:

$$\begin{aligned} \langle (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2 \rangle = & 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(Q_f \frac{d_1}{d_3} \right)^2 + \left(Q_g Q_f \frac{d_1}{d_4} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12}) \\ & + Q_f \frac{2d_1}{d_3} R(\Delta d_{13}) + Q_g Q_f \frac{2d_1}{d_4} R(\Delta d_{14}) + Q_g Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_3} R(\Delta d_{23}) + Q_g^2 Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_4} R(\Delta d_{24}), \\ & + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_4} R(\Delta d_{34}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

де Q_g та Q_f – коефіцієнти відбиття сферичної хвилі від землі та фасаду будівлі відповідно, d_k – відстані, що проходять звукові промені, $R(\Delta d_{mn})$ – функція автокореляції для двох променів, що визначається як:

$$R(\Delta d_{mn}) = \frac{\lambda}{2\pi B \Delta d_{mn}} \cos\left(\frac{2\pi \Delta d_{mn}}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi B \Delta d_{mn}}{\lambda}\right)$$

де Δd_{mn} – різниця ходу променів для двох променів m та n , $B=0.115$ для 1/3-октавної смуги частот та $B=0.332$ для октавної смуги частот [124].

Відповідно була сформульована задача для положення джерела шуму між двома вертикальними поверхнями, що перпендикулярні горизонтальній поверхні землі. Схема відбивання звукових променів для двох вертикальних

поверхонь показана на рис. 3.3. Дана схема використовувалася для моделювання вулиць сучасних міст.

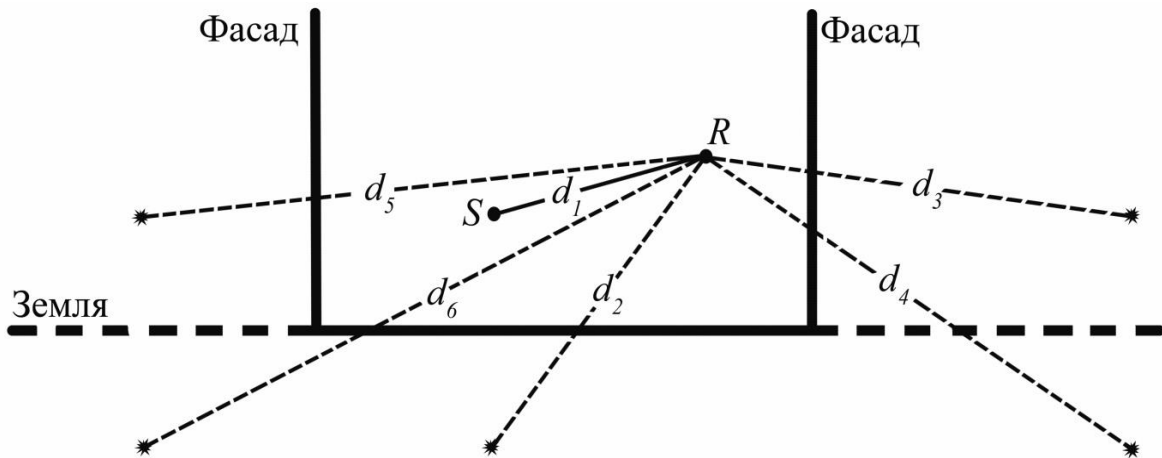


Рис. 3.3. Розрахункова схема визначення звукового поля між фасадами будівель у вуличному каньйоні, $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ – відстані, що проходять звукові промені

Для випадку двох паралельних вертикальних відбиваючих поверхонь рівняння (3.5) було записано у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 & \langle (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6)^2 \rangle = \\
 & = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(Q_f \frac{d_1}{d_3} \right)^2 + \left(Q_g Q_f \frac{d_1}{d_4} \right)^2 + \left(Q_f \frac{d_1}{d_5} \right)^2 + \left(Q_g Q_f \frac{d_1}{d_6} \right)^2 + \\
 & Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12}) + Q_f \frac{2d_1}{d_3} R(\Delta d_{13}) + Q_g Q_f \frac{2d_1}{d_4} R(\Delta d_{14}) + Q_f \frac{2d_1}{d_5} R(\Delta d_{15}) + Q_g Q_f \frac{2d_1}{d_6} R(\Delta d_{16}) \\
 & + Q_g Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_3} R(\Delta d_{23}) + Q_g^2 Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_4} R(\Delta d_{24}) + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_2 d_5} R(\Delta d_{25}) + Q_g^2 Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_6} R(\Delta d_{26}) \\
 & + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_4} R(\Delta d_{34}) + Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_5} R(\Delta d_{35}) + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_6} R(\Delta d_{36}) \\
 & + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_4 d_5} R(\Delta d_{45}) + Q_g^2 Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_4 d_6} R(\Delta d_{46}) \\
 & + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_5 d_6} R(\Delta d_{56})
 \end{aligned}$$

(3.6)

Вплив додаткових відбиттів від поверхонь фасадів для положення приймача шуму між цими фасадами розраховується аналогічно за допомогою рівняння (3.4), де $\langle p^2 \rangle_C$ визначається рівнянням (3.6):

$$\Delta L_{refl_2} = 20 \lg \left| \frac{\langle (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6)^2 \rangle}{\langle (p_1 + p_2)^2 \rangle} \right|.$$

Для розрахунку впливу паралельного фасаду на формування звукового поля використовувалася величина $\Delta L'_{refl}$, що розраховувалися наступним чином:

$$\Delta L'_{refl} = \Delta L_{refl_2} - \Delta L_{refl_1} \quad (3.7)$$

Розроблена оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель, як вертикальних напівнескінчених відбивачів реалізована у вигляді підпрограми `multiple_reflections.m` розробленого програмного забезпечення USScape1.0.

3.2.2. Апробація математичної моделі оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель

3.2.2.1 Формулювання класичної променевої моделі розрахунку додаткових відбиттів від фасаду будівлі

З метою апробації розробленої математичної моделі використовувалося зіставлення з результатами експериментальних досліджень, чисельного моделювання та порівняння з існуючим підходом моделювання для виявлення характерних особливостей та переваг розробленої моделі.

При дослідженні впливу напівнескінченного відбивача на зміну рівнів звукового тиску було розглянуто дві моделі, в основі яких лежить розрахунок методом уявних джерел: класичну променеву модель (КМП) та розроблену модель оцінювання впливу додаткових відбиттів (рівняння 3.4– 3.7).

Як і в попередній моделі обидві вертикальні поверхні відбивання розглядаються як імпедансні, припускається, що поверхня землі та поверхня фасаду будівлі напівнескінченні відбивачі. Аналогічно характеристики імпедансних поверхонь враховуються шляхом внесення в моделі коефіцієнту відбиття для сферичних звукових хвиль. Всі припущення в моделі були аналогічними.

Так як основними ефектами, що вносять зміни в рівні звукового тиску перед фасадом, є ефекти інтерференції, необхідною умовою при моделюванні було те, що розміри фасаду повинні бути значно більшими від довжин хвиль.

Таким чином, зміна рівнів звукового тиску при наявності фасаду (-ів) для класичної променевої моделі визначається як:

$$\Delta L_{refl} = 10 \lg \left| \frac{P_{сум}}{P_1 + P_2} \right|, \quad (3.8)$$

- рішення для звукового тиску у вільному полі:

$$P_1 + P_2 = \frac{\exp(ikd_1)}{4\pi d_1} + Q_g \frac{\exp(ikd_2)}{4\pi d_2},$$

- рішення для звукового тиску перед фасадом будівлі (згідно розрахунковій схемі на рис. 3.3):

$$P_{сум} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

$$P_{сум} = \frac{\exp(ikd_1)}{4\pi d_1} + Q_g \frac{\exp(ikd_2)}{4\pi d_2} + Q_f \frac{\exp(ikd_3)}{4\pi d_3} + Q_g Q_f \frac{\exp(ikd_4)}{4\pi d_4},$$

- рішення для звукового тиску між вертикальними відбивачами (фасадами) (згідно розрахунковій схемі на рис. 3.3):

$$P_{\text{сум}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6.$$

$$P_{\text{сум}} = \frac{\exp(ikd_1)}{4\pi d_1} + Q_g \frac{\exp(ikd_2)}{4\pi d_2} + Q_f \frac{\exp(ikd_3)}{4\pi d_3} + Q_g Q_f \frac{\exp(ikd_4)}{4\pi d_4} \\ + Q_f \frac{\exp(ikd_5)}{4\pi d_5} + Q_g Q_f \frac{\exp(ikd_6)}{4\pi d_6}$$

3.2.2.2. Верифікація розробленої математичної моделі оцінювання впливу додаткових відбиттів експериментальним даними та результатами чисельних розрахунків

Для підтвердження результатів математичного та чисельного моделювання було проведено ряд експериментальних вимірювань рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі.

Вимірювання рівнів звукового тиску проводилось для 1/3-октавної смуги частот перед 9 корпусом Національного авіаційного університету. Шум генерувався зразковим джерелом шуму. Вимірювання проводилися на чистому тоні.

Проводилися заміри рівнів звукового тиску перед фасадом для двох відстаней від джерела шуму до фасаду будівлі – 9 м та 15 м. Геометрія взаємного розташування джерела шуму, мікрофонів та фасаду будівлі приведена на рис. 3.4.

Результати вимірювань оброблялися в програмному пакеті Spectran. Математичне моделювання проводилося за допомогою розробленого в дисертаційній роботі програмного забезпечення USScape 1.0.

На основі вимірних значень рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі розраховувалась зміна рівня звукового тиску при наявності фасаду, як напівнескінченного відбивача, по відношенню до рівня звукового тиску у

вільному полі з відбиваючої поверхнею землі. Результати розрахунків зміни рівнів звукового тиску наведені на рис. 3.5 для відстані 9 м від 15 м від джерела шуму до фасаду будівлі.

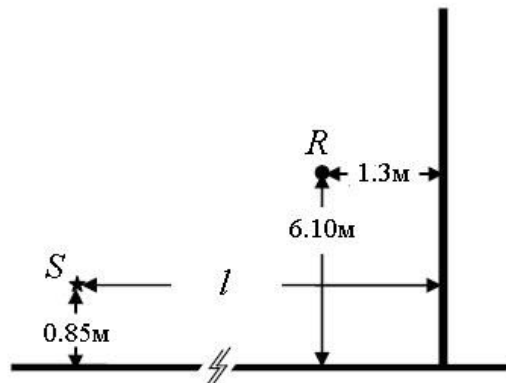


Рис. 3.4. Геометрія розташування джерело–приймач–фасад: l – відстань від фасаду до джерела

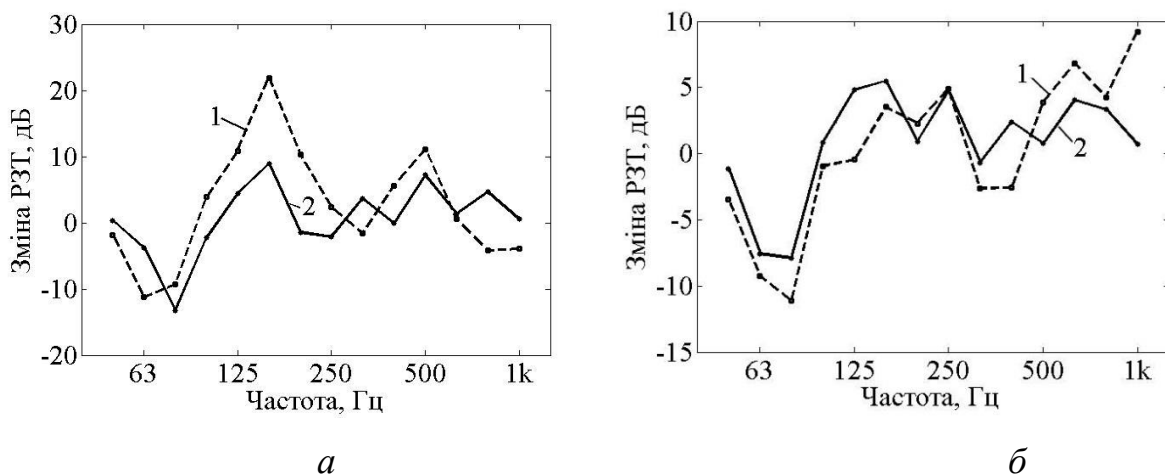


Рис. 3.5. Залежність зміни рівня звукового тиску від частоти для 1/3 октавного діапазону частот при відстані від джерела до фасаду: a – 9 м; b – 15 м; 1 – результати натурних експериментів; 2 – теоретичні розрахунки на основі розробленої моделі

Аналіз досліджень показує, що зміна рівнів звукового тиску основним чином залежить від взаємного розташування джерела шуму та приймача по відношенню до фасаду будинку та може як знижувати, так і підвищувати рівні звукового тиску при наявності фасаду. На частотах вищих від 1000 Гц (хоч вони і бралися до уваги при розрахунках та вимірюваннях) знижується когерентність хвиль, що розповсюджуються.

Аналіз отаманих результатів також показав, що для відстані 15 м від фасаду будівлі до джерела шуму теоретичні розрахунки підтверджуються даними експериментальних досліджень. Це пояснюється тим, що при відстані 9 м від джерела шуму до фасаду будівлі значний вплив спричиняється ближнім звуковим полем, таким чином впливаючи на достовірність розрахунків.

Розрахунки методом кінцевих елементів для рішення рівняння (3.2) проводилися в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Розрахунки проводилися для двохмірної задачі ($d = 2$) в площині $z = 0$. Геометрія взаємного розташування джерела шуму, приймача та фасаду будівлі приведена на рис. 3.6.

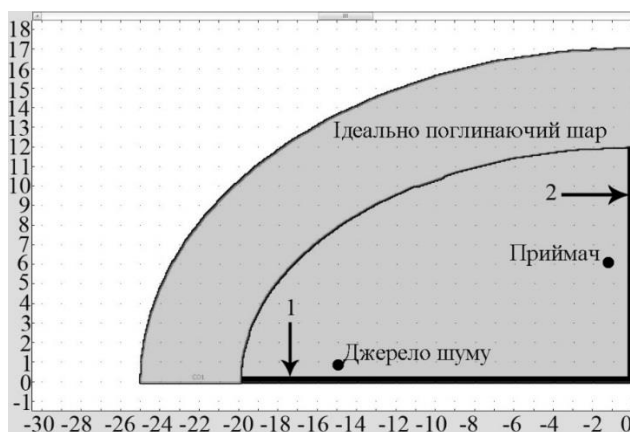


Рис. 3.6. Задання геометрії досліджуваної задачі в програмному пакеті Comsol Multiphysics: 1 – поверхня землі; 2 – поверхня фасаду будівлі

Поверхні фасаду та землі задавалися як імпедансні поверхні, як і для аналітичного моделювання. Розглядалися два типи імпедансних поверхонь: з характеристиками опору продуванню повітрям, що відповідає абсолютно жорстким поверхням, та власне імпедансі поверхні, коефіцієнт відбивання для яких менше одиниці.

Для моделювання умов Зомерфельда на безкінечності [84] застосовувалися умови циліндричного ідеально поглинаючого шару (Perfectly Matched Layer), що відповідає умовам вільного поля (рис. 3.6). Геометричні розміри ідеально поглинаючого шару визначаються з умови, що

на ньому повинна вкладатися довжина мінімум однієї звукової хвилі, тобто $l_{PML} \geq \lambda_{\max}$, де λ_{\max} – максимальна довжина хвилі в спектрі моделювання з заданим l_{PML} .

В даному дослідженні, висота фасаду будівлі приймалася 12 м при висоті джерела шуму 0,85 м та положенні мікрофону 6,10 м над поверхнею землі. Початкові дані задавали згідно початковим даним експериментальних досліджень. Приймалося, що будь-які вклади від дифракції на верхній кромці фасаду будівлі були достатньо малими.

В формулюванні методу кінцевих елементів (МКЕ) було обрано чотири елементи на довжину хвилі для того, щоб забезпечити точність розрахунків. Для чотирьох елементів на довжину хвилі абсолютна похибка при розрахунках методом кінцевих елементів становила 1,5 %. Для моделювання сітки використовувалися квадратичні елементи Лагранжа. Розмір елементів для поточних розрахунків МКЕ для різних частот приведений в табл. Б.1.

При рішенні систем лінійних рівнянь в методі кінцевих елементів використовувалися наступні розв'язувачі прямим методом: UMFPACK (несиметричний мультифронтальний метод та пряме розкладання розріджених матриць), SPOOLES (об'єктно-орієнтована бібліотека програмного забезпечення для розв'язання розріджених систем лінійних рівнянь) та PARDISO (паралельний прямий розв'язувач для розріджених матриць).

Зміна рівнів звукового тиску визначалася як різниця рівнів звукового тиску при наявності та відсутності фасаду будівлі. Результати моделювання звукових полів методом кінцевих елементів приведені на рис. 3.7 для частот 63 та 125 Гц.

На рис. 3.8 – 3.9 приведено порівняння результатів розрахунків за допомогою методу уявних джерел для променевої моделі та рішення хвильового рівняння Гельмгольца методом кінцевих елементів, а також

зіставлення теоретичних результатів розрахунків з експериментально отриманими даними.

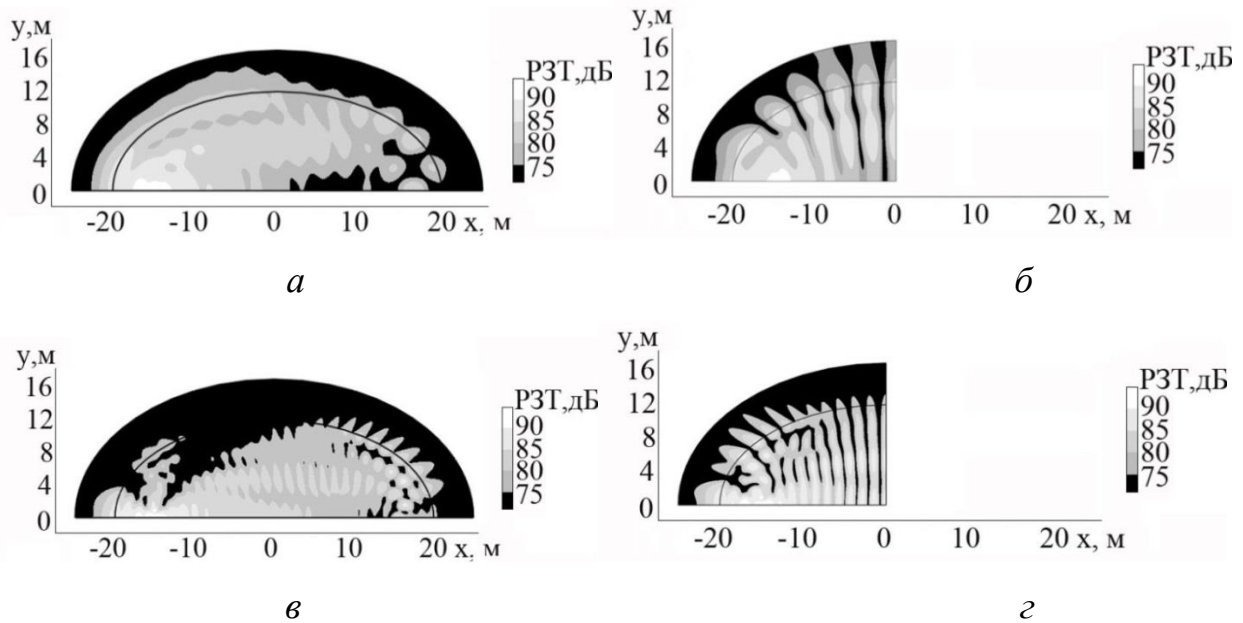


Рис. 3.7. Результати моделювання звукових полів: *а* – для частоти 63 Гц без фасаду; *б* – для частоти 63 Гц перед фасадом; *в* – для частоти 125 Гц без фасаду; *г* – для частоти 125 Гц перед фасадом

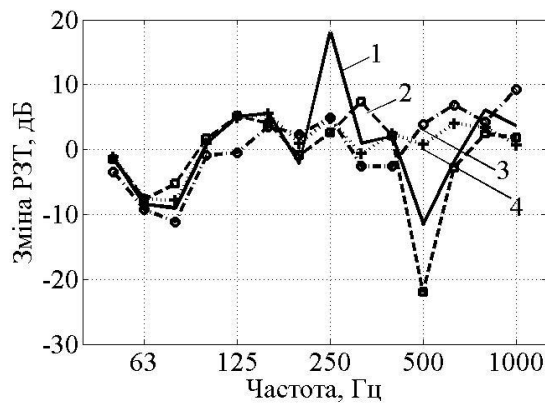


Рис. 3.8. Порівняння розрахованих значень зміни рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі для абсолютно жорстких поверхонь фасаду та поверхні землі різними методами: 1 – класична променева модель методом уявних джерел; 2 – метод кінцевих елементів; 3 – експериментальні вимірювання; 4 – розроблена математична модель впливу додаткових відбиттів

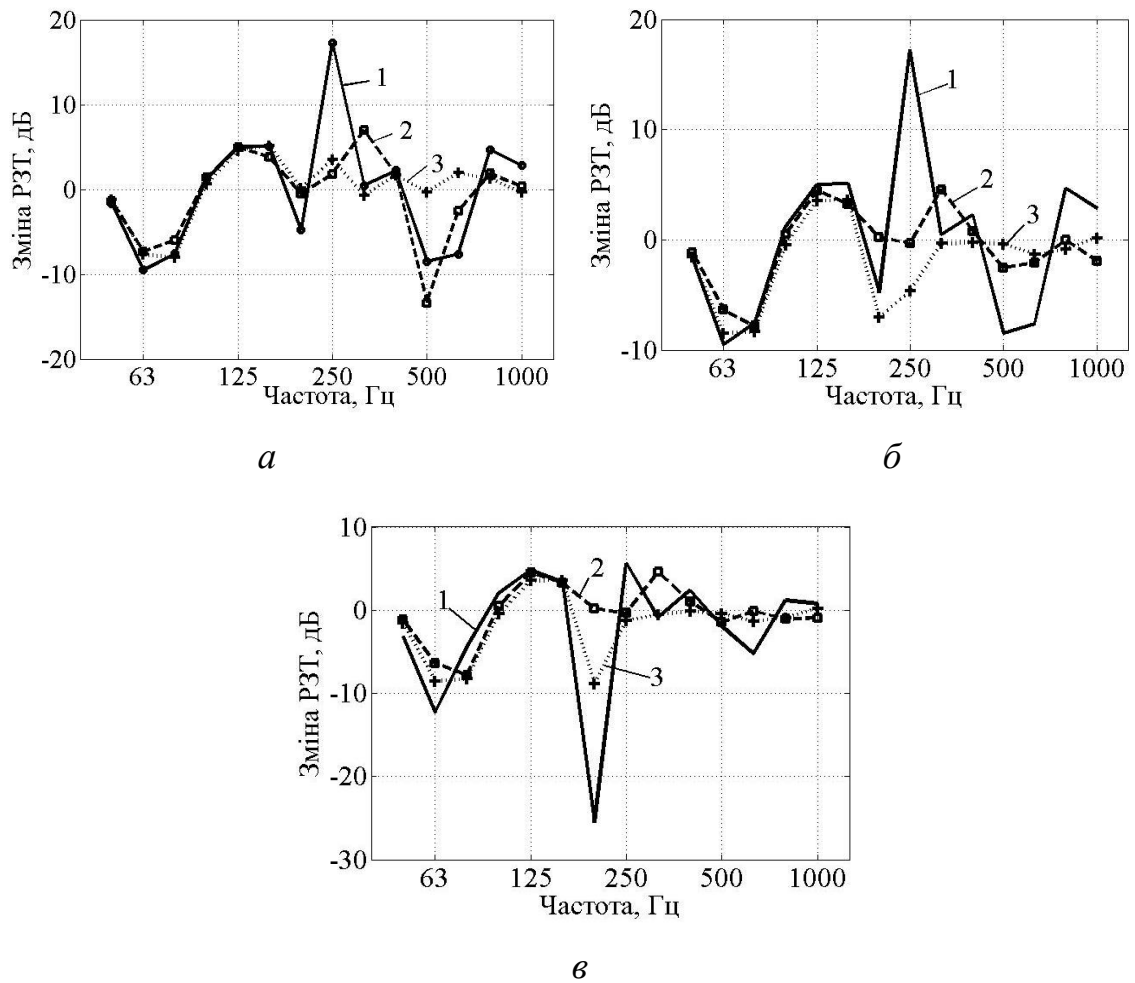


Рис. 3.9. Порівняння розрахованих значень зміни рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі різними методами для різних імпедансних поверхонь: *а* – опір продуванню поверхні землі становить 20 000 кНс/м⁴ та 630 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; *б* – опір продуванню поверхні землі становить 20 000 кНс/м⁴ та 100 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; *в* – опір продуванню поверхні землі становить 630 кНс/м⁴ та 100 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; 1 – класична променева модель методом уявних джерел; 2 – метод кінцевих елементів; 3 – розроблена математична модель впливу додаткових відбиттів

З рис. 3.8 прослідковується, що для абсолютно жорстких поверхонь фасаду будівлі та землі для діапазону частот 50–250 Гц розроблена в дисертаційній роботі модель з внесенням функції автокореляції дає більшу відповідність експериментальним результатам та розрахунку методом кінцевих елементів, ніж класична променева модель. В дослідженому

діапазоні частот абсолютна похибка моделювання за допомогою розробленої моделі коливається від 1 до 4 дБ, тоді як максимальна абсолютна похибка для класичної променевої моделі складає 10 дБ.

Дані рис. 3.8 – 3.9 показали, що класична променева модель дає не достатньо точні результати як для абсолютно жорстких, так і для імпедансних поверхонь.

В результаті аналізу даних, отриманих для різних імпедансних поверхонь, встановлено, що при зменшенні опору продуванню повітрям (що характеризує поверхні з коефіцієнтом відбиття менше одиниці) для м'яких імпедансних поверхонь (рис. 3.9, б – 3.9, в) розроблені моделі дають достовірну відповідність експериментальних даних в діапазоні частот 50–160 Гц з абсолютною похибкою моделювання $>1,5$ дБ. Для діапазону 200–1000 Гц абсолютна похибка складає 3–4 дБ з досягненням $>1,5$ дБ в точках інтерференційних піків та провалів.

Однією із характеристик використовуваних променевих моделей є те, що вони враховують лише перші відбиття від поверхонь, так як вважалося, що подальші відбиття не будуть створювати значного впливу на формування звукового поля. Тому відмінності можуть пояснюватися вкладом подальших відбиттів. Ще одним поясненням неточності в вимірюваннях та розрахунках є те, що на високих частотах завдяки турбулентному повітрю знижується когерентність хвиль, що розповсюджуються, тому розрахунки не можуть відображати реальних значень без врахування додаткових метеорологічних умов.

Розроблена математична модель оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель дозволила оцінювати вплив поверхонь фасадів будівель на формування звукових полів на вулицях міста.

3.3. Моделювання зниження шуму в результаті ефектів дифракції на кромках акустичних екранів

3.3.1. Удосконалена модель тонкого акустичного екрану кінцевої довжини на імпедансній поверхні

При поширенні звукових променів через кромки перешкод мають місце ефекти дифракції. В дисертаційній роботі такі перешкоди прийнято називати акустичними екранами.

В реальних умовах акустичні екрани розташовані на поверхні землі. Тому променева картина розповсюдження звуку від джерела до приймача стає більш складною. При поширенні звуку відбувається додаткове відбивання променів від поверхні землі. При моделюванні зниження шуму акустичними екранами необхідно враховувати додаткові промені відбиті від поверхні землі до та після поверхні екрану. Для моделювання додаткових відбиттів від поверхні землі використано метод уявних джерел, як показано на рис. 3.10. Для позначення уявних джерел в роботі використовується індекс i , наприклад S_i .

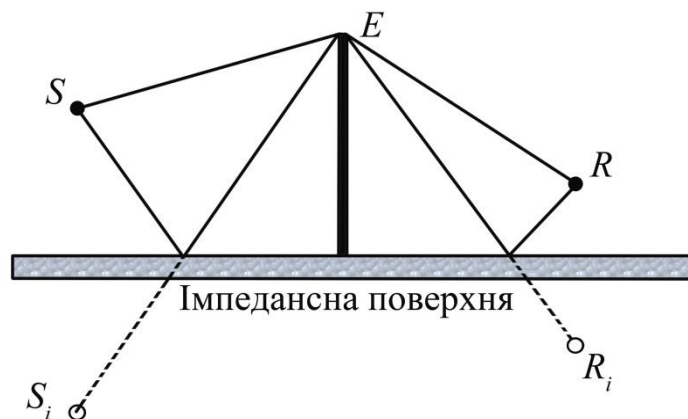


Рис. 3.10. Схема розповсюдження звуку біля екрану з урахуванням ефектів інтерференції на імпедансній поверхні: точки S , R – відповідно джерело і приймач шуму, S_i , R_i – відповідно уявні джерела шуму до і після екрану, точка E знаходиться на кромці екрану

Таким чином, розрахункова схема оцінки акустичного поля для напівнескінченного тонкого екрану будується з урахуванням чотирьох шляхів поширення звуку між дійсними і уявними джерелами та приймачами звукових хвиль: (1) SER (складова акустичного тиску $p(SER)$), (2) S_iER (складова акустичного тиску $p(S_iER)$), (4) S_iER_i (складова акустичного тиску $p(S_iER_i)$), (3) SER_i (складова акустичного тиску $p(SER_i)$), як показано на рис. 3.10. Сумарний тиск в точці прийому визначається когерентним сумуванням наведених чотирьох променів з врахуванням відбиття звуку від поверхні землі до та після екрану:

$$p_{\Sigma} = p(SER) + Q_S p(S_iER) + Q_R p(SER_i) + Q_S Q_R p(S_iER_i), \quad (3.9)$$

де Q_S , Q_R – сферичні коефіцієнти відбиття звукових хвиль від поверхні землі до та після екрану відповідно.

Сумарне зниження завдяки ефектам дифракції звукових променів на кромці екрану визначено шляхом енергетичного сумування зниження шуму від кожного розглянутого променю та записується наступним рівнянням:

$$\Delta L_{scr} = 10 \lg \left[10^{-0.1 \Delta L_1(SER)} + 10^{-0.1 \Delta L_2(S_iER)} + 10^{-0.1 \Delta L_3(SER_i)} + 10^{-0.1 \Delta L_4(S_iER_i)} \right] \quad (3.10)$$

Акустична ефективність екрану, що розташований на імпедансній земній поверхні визначається за наступною формулою:

$$\Delta L_{екр} = -10 \lg \left| \frac{P_{екр}}{P_{б/екр}} \right|^2, \quad (3.11)$$

де $p_{екр}$, $p_{б/екр}$ – відповідно звуковий тиск в точці прийому звуку при розповсюдженні акустичних хвиль з екраном і без екрану.

В формулі (3.9) складові акустичного тиску в точці прийому враховують всі можливі ефекти зниження шуму при його поширенні. Для виокремлення зниження шуму завдяки ефектам дифракції використано наступне рівняння:

$$\Delta L_{scr} = -10 \lg \left| \frac{p_{екр}}{p_0} \right|^2, \quad (3.12)$$

де p_0 – тиск вільного поля.

При виборі характеристик екрану його акустична ефективність визначається залежністю типу:

$$\Delta L_{екр} = \Delta L_{б/екр} - \Delta L_{з/екр}, \quad (3.13)$$

де $\Delta L_{б/екр}$, $\Delta L_{з/екр}$ – відповідно значення зниження рівнів звукового тиску у контрольній точці без екрану та з встановленим екраном. Розрахунки ефективності екрану виконувалися в третино–октавних (октавних) смугах частот.

Розрахунки $\Delta L_{б/екр}$ та $\Delta L_{з/екр}$ виконувалися за формулою (3.1):

$$\begin{aligned} \Delta L_{б/екр} = & \Delta L_{div_б/екр} + \Delta L_{abs_б/екр} - \Delta L_{ground_б/екр} \\ & - \Delta L_{refl_б/екр} + \Delta L_{green_б/екр} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{з/екр} = & \Delta L_{scr_з/екр} + \Delta L_{div_з/екр} + \Delta L_{abs_з/екр} \\ & - \Delta L_{ground_з/екр} - \Delta L_{refl_з/екр} + \Delta L_{green_з/екр} \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.3.2. Удосконалена модель акустичного екрану кінцевої довжини та кінцевої товщини на імпедансній поверхні

На екрані кінцевої довжини має місце додаткова дифракція звуку на бокових кромках екрану – рис. 3.11.

Сумарний акустичний тиск в точці прийому за екраном кінцевої довжини на імпедансній поверхні включає розглянуті в формулі (3.9) 4 промені понад верхньою кромкою екрану (1) SER , (2) S_iER , (3) SER_i , (4) S_iER_i , а також додаткові промені розповсюдження звуку через бокові кромки (5) SE_nR , (6) S_iE_nR , (7) SE_nR_i , (8) $S_iE_nR_i$, (9) SE_lR , (10) S_iE_lR , (11) SE_lR_i , (12) $S_iE_lR_i$:

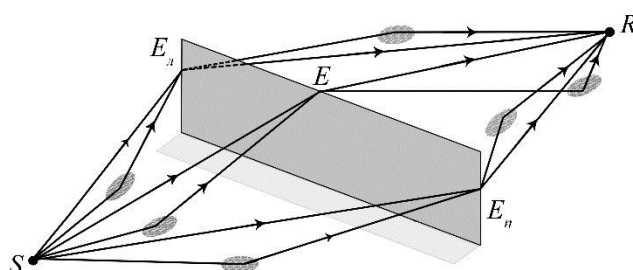


Рис. 3.11. Геометрія зниження шуму тонким акустичним екраном кінцевої довжини на імпедансній поверхні

Сумарний звуковий тиск для акустичного екрану кінцевої довжини записується аналогічно формулі (3.9):

$$\begin{aligned}
 p_{\Sigma} = & p(SER) + Q_S p(S_iER) + Q_R p(SER_i) + Q_S Q_R p(S_iER_i) \\
 & + p(SE_nR) + Q_S p(S_iE_nR) + Q_R p(SE_nR_i) + Q_S Q_R p(S_iE_nR_i) \\
 & + p(SE_lR) + Q_S p(S_iE_lR) + Q_R p(SE_lR_i) + Q_S Q_R p(S_iE_lR_i)
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Сумарне зниження шуму завдяки ефектам дифракції для акустичного екрану кінцевої довжини записується аналогічно для основної верхньої кромки, а також для правої та лівої кромки:

$$\Delta L_{scr_очн} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_1(SER)} + 10^{-0.1\Delta L_2(S_i ER)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_3(SER_i)} + 10^{-0.1\Delta L_4(S_i ER_i)} \end{array} \right]$$

$$\Delta L_{scr_н} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_5(SE_n R)} + 10^{-0.1\Delta L_6(S_i E_n R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_7(SE_n R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_8(S_i E_n R_i)} \end{array} \right]$$

$$\Delta L_{scr_л} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_9(SE_n R)} + 10^{-0.1\Delta L_{10}(S_i E_n R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_{11}(SE_n R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_{12}(S_i E_n R_i)} \end{array} \right]$$

Так як відбиття звукових променів перед екраном вносять незначні зміни в рівні шуму в точці прийому, тому при розрахунку зниження шуму при наявності акустичного екрану розглядається лише вісім променів: промені (1)–(4) через основну верхню кромку, а також чотири додаткові промені (5), (7), (9), (11) через бокові кромки – враховуються прямі промені через праву та ліву кромки, а також промені відбиті за акустичним екраном.

Сумарний акустичний тиск в точці прийому за екраном кінцевих розмірів на імпедансній поверхні (рис. 3.12) включає розглянуті в формулі (3.9) 4 промені над верхньою кромкою екрану $SE_S E_R R$, $S_i E_S E_R R$, $SE_S E_R R_i$, $S_i E_S E_R R_i$, а також додаткові промені розповсюдження звуку через бокові кромки $SE_{nS} E_{nR} R$, $S_i E_{nS} E_{nR} R$, $SE_{nS} E_{nR} R_i$, $S_i E_{nS} E_{nR} R_i$, $SE_{лS} E_{лR} R$, $S_i E_{лS} E_{лR} R$, $SE_{лS} E_{лR} R_i$, $S_i E_{лS} E_{лR} R_i$.

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} = & p(SE_S E_R R) + Q_S p(S_i E_S E_R R) + Q_R p(SE_S E_R R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_S E_R R_i) \\ & + p(SE_{S_n} E_{R_n} R) + Q_S p(S_i E_{S_n} E_{R_n} R) + Q_R p(SE_{S_n} E_{R_n} R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_{S_n} E_{R_n} R_i) \quad (3.17) \\ & + p(SE_{S_l} E_{R_l} R) + Q_S p(S_i E_{S_l} E_{R_l} R) + Q_R p(SE_{S_l} E_{R_l} R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_{S_l} E_{R_l} R_i) \end{aligned}$$

$$\Delta L_{scr_очн} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_1(SE_S E_R R)} + 10^{-0.1\Delta L_2(S_i E_S E_R R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_3(SE_S E_R R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_4(S_i E_S E_R R_i)} \end{array} \right],$$

$$\Delta L_{scr_н} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_5(SE_{nS} E_{nR} R)} + 10^{-0.1\Delta L_6(S_i E_{nS} E_{nR} R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_7(SE_{nS} E_{nR} R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_8(S_i E_{nS} E_{nR} R_i)} \end{array} \right],$$

$$\Delta L_{scr_л} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_9(SE_{лS} E_{лR} R)} + 10^{-0.1\Delta L_{10}(S_i E_{лS} E_{лR} R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_{11}(SE_{лS} E_{лR} R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_{12}(S_i E_{лS} E_{лR} R_i)} \end{array} \right].$$

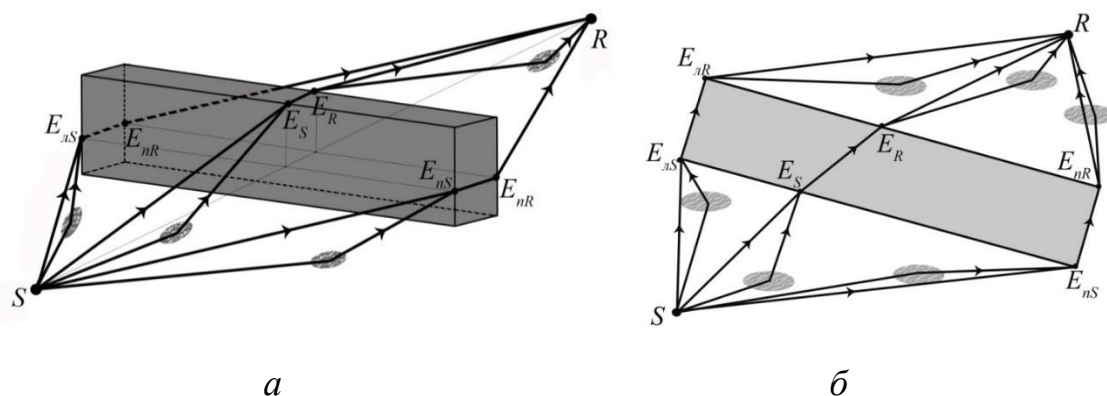


Рис. 3.12. Схема формування променевої картини для екрану кінцевих розмірів на імпедансній поверхні: *a* – поширення звукових променів через акустичний екран кінцевих розмірів, *б* – переріз променевої картини для екрану кінцевих розмірів при відбиванні звуку від поверхні землі як до та і після акустичного екрану

Аналогічно загальній схемі враховуються лише чотири основних промені через верхні кромки екрану, а також основні промені через бокові кромки та відбиті зі сторони приймача звуку.

3.3.3. Верифікація математичних моделей зниження шуму на кромках тонкого акустичного екрану та екрану кінцевих розмірів

З метою апробації розробленої математичної моделі тонкого напівнескінченного акустичного екрану було проведено зіставлення з результатами експериментальних досліджень, приведених в роботі [37]. Результати порівняння показані на рис. 3.13.

Проведене порівняння дає змогу зробити висновок, що розроблена математична модель дає якісну відповідність результатам порівняння у усьому діапазоні частот. Проте, якщо для випадку відстані між джерелом шуму та приймачем 3,5 м похибка коливається в межах 2–4 дБ, то для відстані між джерелом шуму та приймачем 100 м вона збільшується до 7 дБ в

області низьких частот. Слід також зауважити, що похибка моделювання вища, коли висота приймача шуму більша за висоту акустичного екрану.

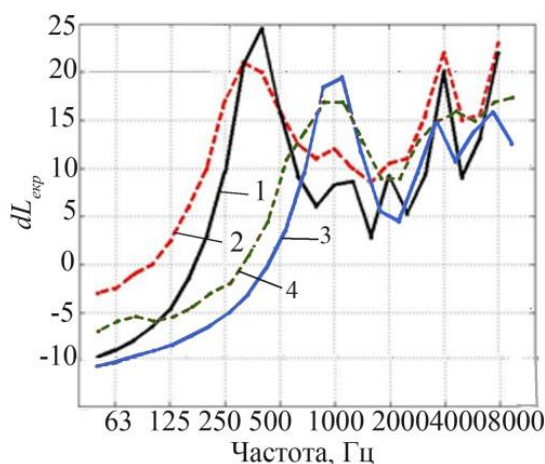


Рис. 3.13. Зіставлення розрахованої ефективності акустичного екрану за допомогою удосконаленої математичної моделі з результатами експерименту Nord2000: а – ефективність екрану при відстані між джерелом шуму та приймачем 3,5 м, б – ефективність екрану при відстані між джерелом шуму та приймачем 100 м, 1 – удосконалена модель ТАЕ для випадку б, 2 – Nord 2000 для випадку б, 3 – удосконалена модель ТАЕ для випадку а, 4 – Nord2000 для випадку а

Таким чином, дану модель слід використовувати для положення приймача в зоні глибокої акустичної тіні, коли висота екрану більша за висоту приймача шуму, а при значних відстанях між джерелом шуму та приймачем слід враховувати вплив інших факторів поширення шуму.

Для верифікації удосконаленої моделі екрану кінцевих розмірів було проведено порівняння результатів моделювання за допомогою удосконаленої моделі, стандартної моделі для акустичного екрану кінцевої товщини та результатів чисельного моделювання в прикладному пакеті Comsol Multiphysics (рис. 3.14).

Розрахунки методом кінцевих елементів для рішення рівняння (3.2) проводилися в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Розрахунки проводилися для двохмірної задачі ($d = 2$) в площині $z=0$. Поверхні фасаду та землі задавалися як імпедансні поверхні, як і для аналітичного моделювання.

Для моделювання умов Зомерфельда на безкінечності [84] застосовувалися умови циліндричного ідеально поглинаючого шару (Perfectly Matched Layer), що відповідає умовам вільного поля. Геометричні розміри ідеально поглинаючого шару визначаються з умови, що на ньому повинна вкладатися довжина мінімум однієї звукової хвилі.

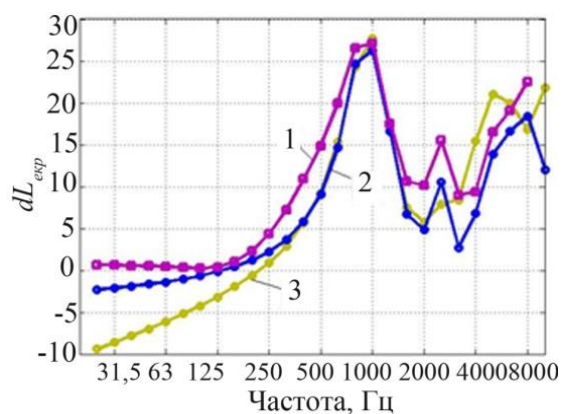


Рис. 3.14. Порівняння результатів моделювання зниження шуму акустичними екранами кінцевих розмірів: 1 – чисельне моделювання, 2 – удосконалена модель на основі формули Пірса, 3 – стандартна модель для акустичного екрана кінцевої товщини

Як і для тонкого акустичного екрану для екрану кінцевих розмірів спостерігається підвищення ефективності зниження шуму зі збільшенням частоти звукових хвиль. Для частот вище 1000 Гц чітко спостерігається вплив ефектів інтерференції при відбиванні від поверхні землі.

Удосконалена модель екрану кінцевих розмірів показує кращу якість та кількісну відповідність для всього діапазону частот, а в діапазоні низьких частот 25–250 Гц показує вищу точність, ніж стандартна модель. Так для удосконаленої моделі екрану кінцевих розмірів абсолютна похибка становить 1–2 дБ в діапазоні частот 25–250 Гц, тоді як для стандартної моделі вона складає до 10 дБ.

Розроблені математичні моделі акустичних екранів використані при моделюванні поширення звукових променів через житлові будівлі.

3.4. Параметричне дослідження ефектів зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача з використанням запропонованої моделі

З метою дослідження впливу різних параметрів поширення звукових хвиль на загальне додаткове зниження шуму було проведено параметричне дослідження, результати якого представлені в даному розділі.

На рис. 1.5. приведені спектральні залежності зниження шуму в результаті ефекту поглинання в повітрі для відстаней від джерела шуму до приймача від 10 до 1000 м. З рисунка видно, що для відстані 100 м зниження шуму не перевищує 0,5 дБ. Так як для міського середовища характерні невеликі відстані між джерелом на приймачем, можна зробити висновок, що ефект поглинання звуку в повітрі є незначним. Зниження шуму до 5–7 дБ досягається лише для відстаней 700–1000 м та діапазону частот 8000–10000 Гц.

На рис. 3.15 показано зниження шуму в залежності від відстані між джерелом шуму та приймачем для сферичних та циліндричних звукових хвиль. Ефект дивергенції звуку є одним з найзначніших та відіграє значну роль в міському середовищі. Так, одним із методів зниження шуму є віднесення джерела чи приймача на значні відстані, що і підтверджується результатами моделювання, показаними на рис. 3.15.

Результати моделювання впливу ефектів інтерференції при відбиванні звукових хвиль від поверхні землі приведено на рис. Б.1. На рисунку від'ємні значення dL позначають зниження шуму при розповсюдженні, тоді як додатні значення – підвищення рівнів шуму за рахунок додаткових відбиттів від поверхні землі. Аналіз показав, що при зміні імпедансних характеристик поверхні землі від абсолютно жорсткої (асфальт, бетон) $\sigma=20\,000$ кНс/м⁴ до імпедансної для $\sigma=200$ кНс/м⁴ (мохове покриття, трава) провал в результаті ефектів інтерференції при відбиванні зміщується в область нижчих частот. Так для абсолютно жорсткої поверхні максимальний

інтерференційний провал знаходиться на частоті 4000–5000 Гц, то для $\sigma=200$ кНс/м⁴ (акустично м'якої поверхні) провал зміщується в діапазон 500–650 Гц. При цьому зростає зниження шуму в результаті ефектів інтерференції, так максимальні dL спостерігаються для максимальних відстаней 300–500 м в районі інтерференційних провалів.

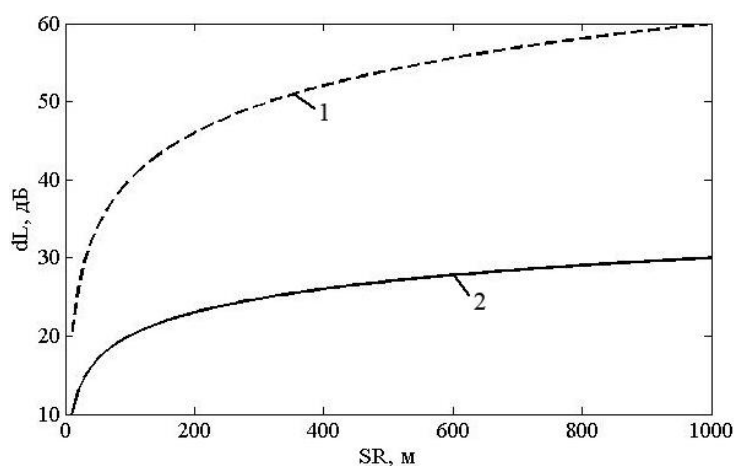


Рис. 3.15. Зниження шуму в результаті ефекту дивергенції звуку на відстані: 1 – для сферичних звукових хвиль, 2 – для циліндричних звукових хвиль

Результати моделювання впливу додаткових відбиттів від фасаду ΔL_{refl_1} наведені на рис. Б.2. На рис. Б.3 представлено порівняння впливу додаткових відбиттів при появі паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$, змодельованого різними методами. З рисунків видно, що основною відмінністю КПМ та розробленої математичної моделі є амплітуда піків та провалів в результаті ефекту конструктивної чи деструктивної інтерференції відповідно. КПМ дає більш виражені піки та провали, тоді як моделювання за допомогою розробленої моделі їх згладжує. Так, при відбиванні від фасаду будівлі максимальне підвищення рівню шуму для заданої геометрії складає 14 дБ (рис Б.2, а) для акустичної м'якої поверхні землі ($\sigma_{землі} = 200$ кНс/м⁴) та 5 дБ (рис Б.2, б) для акустичної м'якої поверхні фасаду будівлі ($\sigma_{фасаду} = 200$ кНс/м⁴).

Аналогічна картина спостерігається і для впливу додаткових відбиттів $\Delta L'_{refl}$ від паралельного фасаду (рис. Б.3).

Для акустично м'якої поверхні землі максимальне підвищення шуму складе 6 дБ, тоді як для аналогічної поверхні фасаду будівлі – 4 дБ.

Дослідження впливу імпедансних характеристик поверхні землі та фасаду будівлі приведено на рис. Б.4.

Як і в попередніх залежностях, в даному параметричному дослідженні чітко просліджується вища ефективність використання звукопоглинаючих покриттів для поверхні фасаду будівлі. Для рис. Б.4, *а* та Б.4, *в* при зміні імпедансних характеристик поверхні землі спостерігається незначна зміна загального рівня шуму, що проявляється лише в діапазоні середніх частот. Тоді як, для змінюваних характеристик поверхні фасаду будівлі (рис. Б.4, *б* та Б.4, *г*) вплив параметру чітко просліджується для широкого діапазону частот 160–10000 Гц та складає до 5 дБ.

Результати дослідження впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$ на основі розробленої математичної моделі при різних характеристиках відбиваючих поверхонь приведені на рис. Б.5.

З рис. Б.5 видно, що покриття фасадів матеріалами зі звукопоглинаючими характеристиками дозволить знизити підвищення шуму в результаті позитивної інтерференції для частот в діапазоні 500 – 1000 Гц, що становить до 5 дБ підвищення шуму. Оптимальне зниження шуму та видалення піків інтерференції досягається за рахунок використання звукопоглинаючих матеріалів як для поверхні землі (наприклад, створення газону перед фасадом будівлі) так і для поверхні фасаду. Проте використання звукопоглинаючих матеріалів саме для фасаду будівлі дає основний вклад в зниження шуму від додаткових відбиттів.

3.4.1. Дослідження формування звукового поля на вулицях міста

Розроблена в дисертаційній роботі математична модель дозволила провести параметричне дослідження впливу ширини та висоти вулиці на формування звукових полів. Висотою вулиці приймалося значення в м від рівня тротуару до найвищого поверху забудови.

На рис. Б.6. представлено зіставлення контурів рівного шуму побудованих за допомогою КПМ та розробленої моделі для змінюваної ширини вулиці від 20 до 100 м та висоти приймача шуму 1,2 м на поверхню землі. Чітке формування інтерференційної картини спостерігається для КПМ, тоді як для розробленої моделі лише в області низьких частот та на окремих частотах, як показано на рисунку. З рисунку видно, що для ширини вулиці більше 50 м вплив додаткових відбиттів від паралельного фасаду зводиться до мінімуму у всьому діапазоні частот.

Дослідження впливу ширини вулиці для заданої висоти вулиці на формування звукових полів показали пряму залежність між висотою приймача та підвищенням рівнів шуму від додаткових відбиттів від паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$. Так, для висоти приймача 1,2 м максимальне підвищення рівнів звукового тиску складає 3–4 дБ (рис. Б.7, а), для висоти 20 м – 5 та більше дБ (рис. Б.7, з), а для висоти 50 м – 10 та більше дБ (рис. Б.7, е).

Результати параметричного дослідження різної висоти вулиці для заданої ширини на розрахунок додаткових відбиттів від паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$ показано на рис. Б.8. Порівняння променевої картини додаткових відбиттів розрахованих за допомогою КПМ та розробленої математичної моделі зображено на рис. Б.8. Як і для попередніх результатів досліджень КПМ дає складну інтерференційну картину з піками та провалами від -10 дБ до 10 дБ для всього діапазону частот. Підвищення рівнів шуму внаслідок додаткових відбиттів спостерігається при збільшенні висоти вулиці. Для

сучасного міста це означає підвищенні рівнів шуму в районі багатоповерхової забудови для верхніх поверхів.

Параметричне дослідження взаємного впливу параметрів вулиці ширина/висота проводилося для змінюваної висоти вулиці та заданих величин ширини. Результати дослідження (рис. Б.9) показали найбільше підвищення рівнів шуму при мінімальній ширині вулиці та максимальній висоті для діапазону низьких та середніх частот 31.5–500 Гц (рис. Б.9, а). Максимальні підвищення рівнів шуму в результаті відбиття від паралельних фасадів складає до 10 дБ. Найменший вклад додаткових відбиттів спостерігався для максимальної досліджуваної ширини вулиці (рис. Б.9, б) та висоти вулиці до 30 м.

Для геометрично відбиваючих границь, якщо висота джерела шуму менша, ніж висота вулиці, звукове поле на вулиці залишається незмінним при подальшому збільшенні висоти вулиці, тому що збільшена границя вулиці не буде вносити додаткові відбиття вниз до дна вуличного каньйону.

На рис. 3.25–3.32 представлені результати параметричних досліджень ефектів зниження шуму на шляху його розповсюдження. Сімейства кривих наведені з метою оцінки діапазону зміни рівнів зниження шуму при дослідженні впливу заданого параметру. Контури рівного шуму показані для зіставлення спектральних залежностей для змінюваного досліджуваного параметру. Таким чином, сімейства кривих показують діапазон зміни зниження рівнів шуму, а контури шуму для яких саме значень досліджуваного параметру зміни в зниженнях рівнях шуму є максимальними та мінімальними.

Результати приведені як для зниження шуму при його поширенні від джерела шуму до приймача $A_{excess} = \Delta L_{з/екр}$ (рівняння (3.15)) так і для ефективності акустичного екрану $\Delta L_{екр}$ (рівняння (3.13)).

Результати дослідження впливу положень джерела шуму та приймача на зниження шуму показані на рис. Б.10.– Б.11.

Перш за все необхідно зазначити, що значення піків та провалів зниження шуму з встановленим екраном в спектральному діапазоні визначаються ефектами інтерференції, що прямо пов'язані з положеннями джерела шуму та приймача. Характерні залежності є аналогічними залежностям для інтерференції звуку при відбиванні від поверхні землі (рис. Б.11).

Аналіз залежностей зниження шуму при встановленому екрані (рис. Б.10– Б.11, *а, б*) та ефективності акустичного екрану (рис. Б.10– Б.11, *в, г*) від положення джерела шуму та приймача відносно поверхні акустичного екрану показав зниження ефективності акустичного екрану при віддаленні від поверхні екрану для всього діапазону частот. Найвищі значення ефективності екрану спостерігаються для положення як джерела так і приймача шуму на відстані менше 10 м від поверхні акустичного екрану з боку джерела шуму та менше 20 м від поверхні екрану з боку приймача шуму та становить до 20 дБ (рис. Б.10– Б.11, *в, г*) та до 30 дБ (рис. Б.10– Б.11, *в, г*) відповідно для діапазону частот 4000–8000 Гц, для діапазону частот 31.5–2000 Гц становить 5–10 (рис. Б.10– Б.11, *в, г*) та 10–15 дБ (рис. Б.10– Б.11, *в, г*) відповідно. Таким чином, можна зробити висновок, що при розташуванні акустичного екрану слід розміщати його ближче до джерела шуму, ніж до приймача. Перенесення положення екрану відносно джерела шуму та приймача можна змінювати ефективність екрану в основному в області середніх та високих частот, що видно на рис. Б.10, *в* та Б.11, *в*.

На рис. Б.12 показано результати параметричного дослідження впливу висоти акустичного екрану на його ефективність $\Delta L_{\text{екр}}$, а також на додаткове зниження шуму $\Delta L_{3/\text{екр}}$ при встановленому екрані. Аналіз показав, що змінюючи висоту екрану можливо змінювати як ефективність самого екрану, так і додаткове зниження шуму в діапазоні частот 63–4000 Гц. Для діапазонів до 63 Гц та 4000–10 000 Гц згідно аналізу зміна висоти екрану не впливає на ефективність та додаткове зниження шуму.

Дане параметричне дослідження проведено для абсолютно жорстких поверхонь землі як до так і після екрану. Тому слід додатково розглянути вплив імпедансних характеристик земної поверхні на додаткове зниження шуму та ефективність екрану.

На рис. Б.13 показані результати моделювання впливу імпедансних характеристик земної поверхні як до (рис. Б.13, а, в) та після екрану (рис. Б.13, б, г). Аналіз показав, що зміна імпедансних характеристик лише незначним чином впливає на ефективність акустичного екрану. Для змін характеристик землі до екрану незначні зміни в ефективності екрану на 1–3 дБ спостерігаються лише для діапазону високих частот 2500–10000 Гц (рис. Б.13, в). Проте зміна характеристик поверхні після екрану визначає зміни в ефективності екрану до 5 дБ для ширшого діапазону частот 200–4000 Гц (рис. Б.13, г). Це пояснюється тим, що при моделюванні зниження шуму при поширенні через акустичний екран враховуються додаткові промені через бокові кромки екрану, що відбиті з боку приймача шуму (за екраном).

Дослідження впливу висоти приймача на зниження шуму та ефективність акустичного екрану проводилася з метою моделювання звукових полів на території високоповерхнової забудови, коли акустичний екран встановлений перед фасадом житлових будівель.

Аналізуючи зміни додаткового зниження шуму в залежності від висоти приймача (рис. Б.14, а, б) спостерігається зміна в рівнях шуму до 5 дБ майже на всьому досліджуваному діапазоні частот 100–10000 Гц. Можна зробити висновок, що як додаткове зниження шуму так і сама ефективність акустичного екрану значним чином залежить від ефектів інтерференції при відбиванні звуку від поверхні землі за акустичним екраном. Чітке зниження $\Delta L_{3/екр}$ зі збільшенням висоти приймача шуму спостерігається лише для високих частот діапазону 4000–10000 Гц. Для решти частот не спостерігається чіткої залежності. Для низьких частот 25–80 Гц зміна положення приймача майже не впливає на зміну ефективності додаткового зниження шуму, так як в цьому діапазоні домінуються ефекти інтерференції.

Наступним кроком досліджень було виявлення залежностей для клиноподібного екрану та акустичного екрану кінцевої товщини. На рис. Б.15, *а* показано вплив зміни кута клину екрану для кутів $0-30^{\circ}$. Аналіз показав, що значних змін в додатковому зниженні шуму не спостерігається для зазначених кутів, зниження шуму коливається на 1 дБ. Проте дана залежність змінюється, коли розглядаються кути $40-90^{\circ}$ (рис. Б.15, *б*). На зображенні контурів рівного шуму (рис. Б.15, *б*) видно, що для кутів більших за 50° спостерігається значне підвищення ефективності акустичного екрану на 5 дБ при збільшенні кута клину на 5° . Дана залежність чітко прослідковується для частот 500–10000 Гц.

Результати впливу ширини акустичного екрану кінцевих розмірів на додаткове зниження шуму приведено на рис. Б.16. Результати моделювання приведені для прямокутного перерізу акустичного екрану (кути на кромках дорівнюють 90°). На рисунках чітко видно, що основний вплив на $\Delta L_{\text{екр}}$ та $\Delta L_{\text{з/екр}}$ спостерігається на частотах, вище 50 Гц та досягає 10 дБ. Проте, найвища ефективність акустичного екрану спостерігається не для максимальної ширини (в даному випадку 3 м), а для ширини екрану 2 м, що пов'язано з впливом ефектів інтерференції на формування звукового поля.

Для подальшого аналізу впливу товщини екрану на його ефективність були побудовані контури для товщини 9 та 16 м (рис. Б.16, *в* та *г*) відповідно. Вплив ефектів інтерференції зменшується для ширини екрану, вище 5 м, та основними ефектами, що визначають додаткове зниження шуму є ефекти дифракції через кромки акустичного екрану. Також, слід зазначити, що при ширині екрану більше, ніж 5 м збільшення ширини екрану призводить до підвищення додаткового зниження шуму у всьому діапазоні частот, особливо чітко залежність простежується в діапазоні 125–10000 Гц.

Дослідження впливу внутрішнього кута кромки екрану на додаткове зниження шуму показано на рис. Б.17. Збільшення внутрішнього кута в середньому змінює додаткові рівні шуму на 5 дБ. При чому, для

максимальних кутів більше 120° спостерігається зменшення ефективності. Це пояснюється тим, що при збільшенні внутрішнього кута кромки – зменшується площа зони акустичної тіні.

Параметричні дослідження проведено з метою виявлення меж застосування розроблених математичних моделей ефектів зниження шуму при його поширенні від джерела до приймача.

3.5. Моделювання проходження шуму в приміщення

Для моделювання проходження шуму всередину приміщення використовувалася модель звукоізоляції [185] для трьох зон в залежності від частотного діапазону:

- зона I, що визнається жорсткістю матеріалу:

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi f \rho_{air} c C_S} \right) - 10 \log_{10} \left(0.23026 * 4.3429 \ln \left(1 + (4\pi f \rho_{air} c C_S)^{-2} \right) \right),$$

$$\text{де } C_S = \frac{768(1 - \sigma^2)}{\pi^8 E h^3 (1/a^2 + 1/b^2)^2};$$

- зона II, де діє закон мас:

$$TL = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\pi f M_S}{\rho_{air} c_{air}} \right)^2 \right] - 5$$

$$\text{де } M_S = \rho_w h;$$

- зона III, що визначається затуханням:

$$TL = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\pi f M_S}{\rho_{air} c_{air}} \right)^2 \right] + 10 \log_{10} (\eta) + 33.22(f / f_c) - 5.7.$$

Розрахунки проводилися для 1/3 октавного діапазону частот 25–10000 Гц. З метою розбиття частотного діапазону на три зони використовувався алгоритм, зображений на рис. Б.18.

Для моделювання звукових полів всередині приміщення була використана удосконалена модель Котана [185]. Створювані РЗТ в кожній досліджуваній точці приміщення визначалися за допомогою наступної формули:

$$L_j = 120 + 10 \log \sum_{k=1}^u W_u \left(\frac{Q_{ju}}{4\pi r_{ju}^2} e^{-mr_{ju}} + \frac{4}{R'_{ju}} \right),$$

де W_u – потужність u -го джерела шуму, Q_{ju} – фактор направленості u -го джерела шуму по відношенню до досліджуваного j -го одиночного об'єму, r_{ju}^2 – відстань від u -го джерела шуму до центру j -го одиночного об'єму, m – коефіцієнт поглинання звукової енергії в повітрі, R'_{ju} – постійна приміщення, яка включає в себе вагове число g_{ju} наступним чином:

$$R'_{ju} \cong \frac{S\alpha_{surf} + 4mV}{qg_{ju}(1 - \alpha_{surf})},$$

де q – кількість одиночних об'ємів в приміщенні.

Детальне описання використаної моделі та визначення вагового параметра g_{ju} приведено в [185]. Для розрахунку коефіцієнту поглинання звукової енергії в повітрі m була використана розрахункова формула [185184].

Дана модель дозволила більш точно розраховувати рівні звукового тиску в будь-якій точці приміщення з урахуванням нерівномірного розповсюдження звукової енергії в приміщенні шляхом введення вагового

параметра g , що характеризує звукову енергію для кожного одиночного об'єму приміщення V_j . Дана модель дозволяє враховувати нерівномірні характеристики поверхонь звукопоглинання, а також кількість та розташування джерел шуму в приміщенні. При рівномірному розповсюдженні звукової енергії постійна приміщення R'_{ju} удосконаленої моделі спрощується до відомої постійної приміщення R [185]. Аналогічно коли кількість одиночних об'ємів, що розглядаються, дорівнює 1 (приміщення, як один об'єм), ваговий параметер $g = 1$, та модель спрощується до класичної формули розрахунку РЗТ в заданій точці приміщення [185].

Використання даної моделі є доцільним при створенні карт шуму приміщення, для більш точного розрахунку контурів рівного шуму.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 3

1. Сформульована та розв'язана задача оцінювання ефектів зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача. На основі проведених параметричних досліджень виявлено основні закономірності впливу факторів поширення звукових хвиль на формування звукових полів у міському середовищі.

2. Сформульована та розв'язана нова задача формування звукових полів перед фасадами будівель як напівнескінчених відбивачів. Розроблена математична модель оцінювання впливу додаєткових відбиттів від фасадів дозволила враховувати імпедансні характеристики горизонтальних та вертикальних поверхонь відбивання звукових хвиль. Проведені експериментальні та чисельні дослідження підтвердили достовірність розробленої математичної моделі в діапазоні частот 63–250 Гц з похибкою моделювання 1 дБ та похибкою моделювання 3–4 дБ для діапазону частот 315–1000 Гц.

3. Розроблена нова математична модель оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану на імпедансній поверхні землі. Достовірність моделі підтверджена для всього діапазону частот з абсолютною похибкою моделювання 2–3 дБ.

4. Удосконалена математична модель оцінювання зниження шуму на кромках клиноподібних акустичних екранів та акустичних екранів кінцевих розмірів на імпедансній поверхні землі показує кращу якісну та кількісну відповідність для всього діапазону частот, а в діапазоні низьких частот 25–250 Гц дозволила підвищити точність моделювання на 1,5–2 дБ.

5. Математичні моделі оцінювання ефективності акустичних екранів дозволили проводити моделювання звукових полів при положеннях приймача в безпосередній близькості від поверхонь акустичних екранів, що є характерною особливістю для міського середовища.

Описану в даному розділі математичну модель оцінювання ефектів зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача реалізовано у вигляді приклад програм для розрахунку зниження шуму при поширенні через будівлі житлової забудови, а також акустичні екрани. Основні результати опубліковано в наукових працях.

РОЗДІЛ 4

КОМПЛЕКСНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РІВНІВ ШУМУ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

4.1. Розробка комплексної моделі рівнів шуму у міському середовищі

Розділ 4 присвячений обґрунтуванню комплексної моделі рівнів шуму в міському середовищі, яка дозволила проводити трьохвимірне картографування шуму з урахуванням характерних особливостей поширення звукових хвиль в міському середовищі. Для цього проаналізовано основні закономірності поширення звукових хвиль від джерела шуму до приймача для типової структури міського середовища – вулиці з автомобільною дорогою, по обидва боки якої розташовані паралельні ряди житлової та нежитлової багатоповерхової забудови. Як показали дослідження, характерними ефектами, що визначають формування шумового навантаження у міському середовищі, є додаткові відбиття від вертикальних поверхонь фасадів та багаторазова дифракція на кромках акустичних перешкод в умовах невеликих відстаней між джерелом шуму та приймачем та щільною забудовою.

4.1.1. Розробка моделі розрахунку рівнів шуму для міського середовища

Розповсюдження звукових хвиль в міському середовищі описувалося рівнянням Гельмгольца (3.2) для імпедансних граничних умов (3.3). Припускалося, що джерелом шуму є транспортний потік, що є некогерентним лінійним джерелом шуму, який складається з точкових джерел.

В запропонованій моделі припускалося, що основними ефектами зниження шуму при його поширенні від джерела до приймача на території сучасних міст є такі ефекти, як дивергенція звукових хвиль, поглинання звуку в повітрі, інтерференція звукових хвиль при відбиванні від горизонтальних та вертикальних імпедансних поверхонь, дифракція звукових хвиль. В даній моделі використовувалася прямокутна система координат для описання відносного положення джерела шуму та приймача по відношенню до перешкод (рис. 4.1, *a*).

В дисертаційній роботі розроблений метод, який дозволяє побудувати горизонтальні карти шуму в площині xz (рис. 4.1, *б*) для $y = y_R$ та вертикальні – в площині xy (рис. 4.1, *в*) для $z = z_R$. Припускається, що переріз лінійного джерела шуму площиною xy розміщується в точці $S(x_S, y_S, z_S)$, а приймач – в точці $R(x_R, y_R, z_R)$. Ось z відповідає лінії джерела шуму.

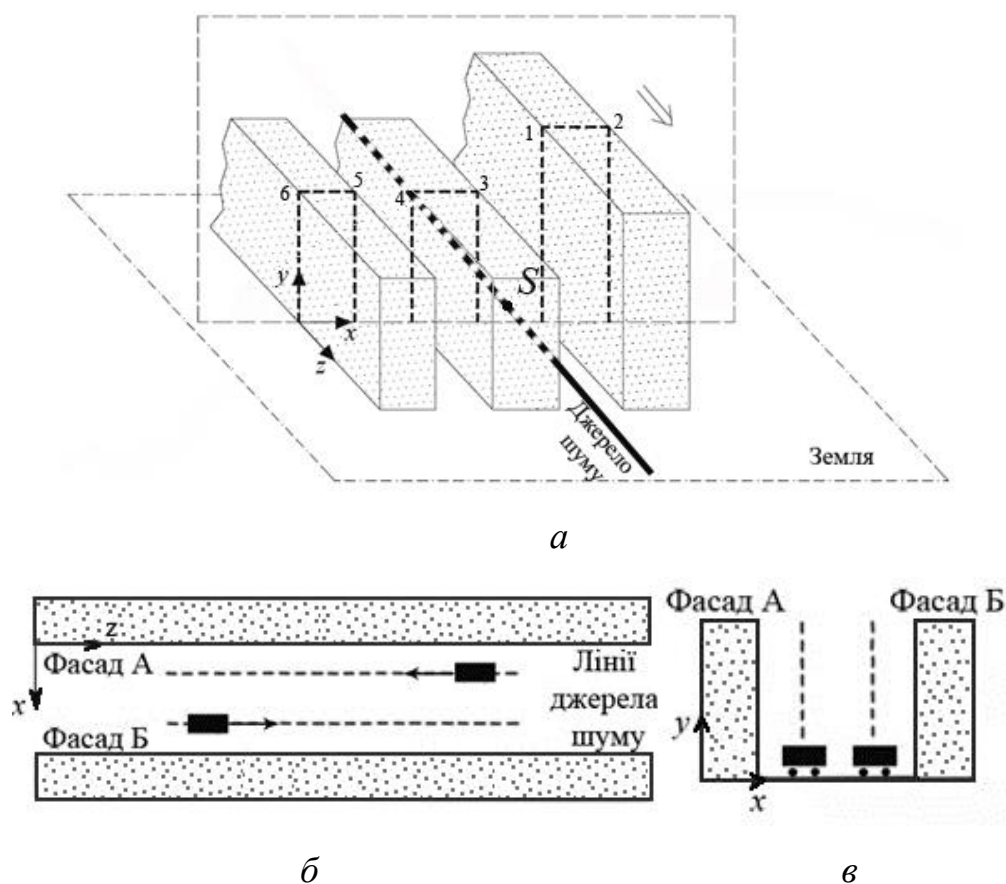


Рис. 4.1. Схематичне зображення поздовжнього *б* та поперечного *в* перерізу вулиці *a*

Для реалізації поставленої задачі була розроблена комплексна модель розрахунків рівнів шуму на території житлової забудови – біля фасадів будівель та всередині приміщень (рис. 4.2). Основна частина моделі, присвячена математичному моделюванню рівнів шуму в точці прийому, була реалізована у вигляді програмного продукту USScape1.0. На рис. 4.2 показані елементи підпрограм для розрахунків окремих блоків.

Характерною особливістю зони житлової забудови є наявність ряду перешкод на шляху поширення шуму. Тому при розробці комплексної моделі оцінювання рівнів шуму на території сучасних міст розроблена математична модель, яка дозволила оцінювати зниження шуму як результат багаторазової дифракції звукових хвиль на кромках декількох акустичних перешкод, що розташовані на лінії візування між джерелом шуму та приймачем.



Рис. 4.2. Комплексна модель оцінювання рівнів шуму від транспортних потоків для міського середовища

Аналіз умов розповсюдження шуму в сучасному місті показав, що для різних положень приймача слід застосовувати різні моделі розрахунку сумарного зниження шуму при його поширенні. Основним параметром, що визначав модель сумарного зниження шуму, було число перешкод (NoB_{IP}),

що перетиналися лінією візування (рис. 4.3). Дана схема може застосовуватися для n -ої кількості акустичних перешкод на шляху поширення звукових хвиль.

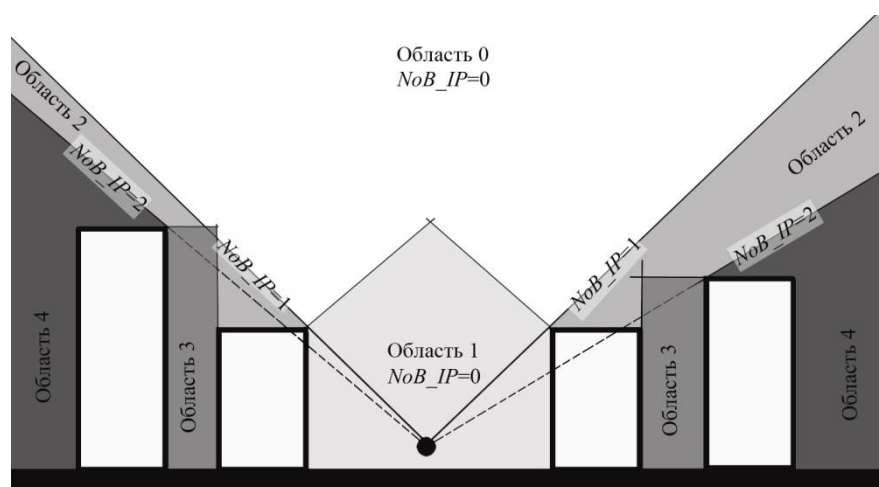


Рис. 4.3. Схематичне зонування формування звукових полів на території житлової забудови з врахуванням взаємного розташування джерела шуму та будівель, де для області 0 сумарне зниження шуму враховує ефекти дивергенції звукових хвиль, поглинання в повітрі та відбивання від поверхні землі, області 1 – додатково враховувалися ефекти впливу фасаду будівлі, область 3 відповідає положенням розрахункової точки між фасадами будівель, області 2 та 4 відповідають зонам акустичної тіні та не враховують додаткових відбиттів від фасадів будівель

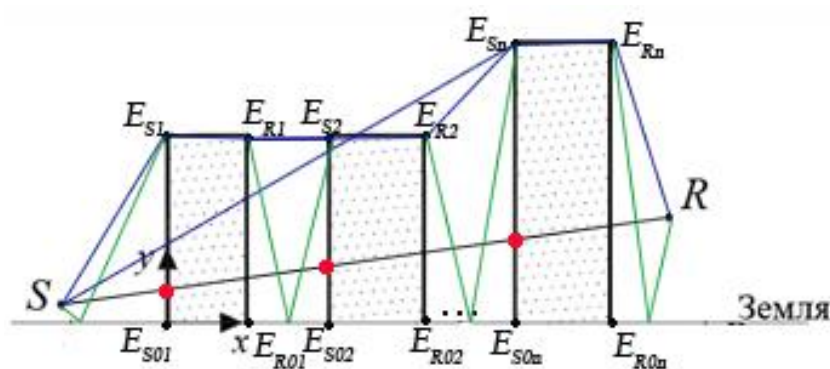
Таким чином, враховуючи досліджені ефекти, запропоновані формули розрахунку, які приведені в алгоритмі на рис. 4.4, де dL – загальне зниження шуму при поширенні від джерела шуму до приймача, ΔL_{div} – дивергенція звукових хвиль (рівняння (1.1)–(1.2)), ΔL_{abs} – поглинання звуку в повітрі (рівняння (1.3)), ΔL_{ground} – інтерференція звукових хвиль при відбиванні від горизонтальних імпедансних поверхонь (рівняння (1.4)), $\Delta L_{diff,i}$ – дифракція звукових хвиль на кромках будівель (рівняння (1.5)–(1.10)), $\Delta L_{refl,1}$ та $\Delta L_{refl,2}$ – інтерференція звукових хвиль при відбиванні поверхонь від 1-го та 2-го

фасадів будівель відповідно (рівняння (3.4)–(3.6)). Математичні моделі названих ефектів розроблені та досліджені в розділі 3.

Загальне зниження шуму розраховувалося згідно алгоритму, приведеному на рис. В.1.

Окремо розглянута задача моделювання сумарного зниження шуму в результаті багаторазової дифракції звукових хвиль на кромках перешкод, що на рис. 4.4 виділено блакитною штрихованою лінією.

Для оцінювання формування звукових полів всередині мікрорайонів та вздовж транспортних магістралей застосована модель багаторазової дифракції звукових хвиль на будівлях. Типова розрахункова схема взаємного розміщення будівель наведена на рис. 4.5. Рис. 4.5. є вертикальним перерізом зони житлової забудови (рис. 4.1) в площині $z = z_R$.



(б)

Рис. 4.5. Типова схема розташування паралельних будівель (акустичних екранів кінцевих розмірів), де S – джерело шуму та R – приймач,

$E_{S1}, E_{R1}, E_{S2}, E_{R2}, \dots, E_{Sn}, E_{Rn}$ – кромки екранів, на яких відбувається дифракція звукових хвиль; червоним позначені точки перетину акустичних перешкод з лінією візування, синім – розрахункова схема поширення дифракційних променів, зеленим – розрахункова схема поширення променів при відбиванні від поверхні землі

На рисунку 4.5 показана схема абсолютно жорстких паралельних екранів кінцевої товщини. Припускається, що будівлі розташовані на

імпедансній поверхні землі. Дана схема використовується для розрахунку ефектів дифракції та інтерференції для всіх можливих шляхів звукових променів від джерела шуму до приймача (розділ 3.3).

Для оцінювання сумарного впливу ефектів дифракції кромки будівель, що розташовані на лінії візування між джерелом шуму та приймачем був розроблений алгоритм (рис. В.1.), що використовує розроблені в дисертаційному дослідженні математичні моделі дифракції на кромці тонкого акустичного екрану, клиноподібного та екрану кінцевої товщини з використанням методики Європейської моделі Harmonoise [37].

Ефекти інтерференції оцінювалися для кожного відбивання звукових променів від поверхні землі, де відповідні кромки екранів вважалися уявним джерелом або уявним приймачем шуму (рис. 4.5). При розташуванні приймача шуму між будівлями враховувалися також додаткові відбиття від вертикальних поверхонь.

4.1.2. Порівняння розробленої комплексної моделі з результатами чисельного моделювання

Для верифікації комплексної моделі було використано результати чисельного моделювання формування звукових полів при поширенні через кромки паралельних екранів кінцевих розмірів методом кінцевих елементів та результати моделювання за допомогою програмного продукту USScape1.0. В дослідженні використано розрахункову схему, що дозволяє враховувати всі названі ефекти зниження шуму при його поширенні від джерела шуму до приймача (рис. 4.5).

Розрахунки методом кінцевих елементів для рішення рівняння Гельмгольца (3.2) проводилися в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Розрахунки здійснювалися для двохмірної задачі ($d = 2$) в площині $z = z_R$.

Геометрія взаємного розташування джерела шуму, приймача та фасаду будівлі приведена на рис. 4.6.

Для забезпечення виконання умов Зомерфельда на безкінечності [84] застосовувалася модель циліндричного ідеально поглинаючого шару (Perfectly Matched Layer), що відповідає умовам вільного поля (рис. 4.6). Геометричні розміри ідеально поглинаючого шару визначаються з умови, що мінімальний лінійний розмір ідеально поглинаючого шару повинен більше довжини звукової хвилі.

Дослідження проводилося для різних положень приймачів з метою виявлення відмінностей та закономірностей формування звукових полів для заданої геометрії.

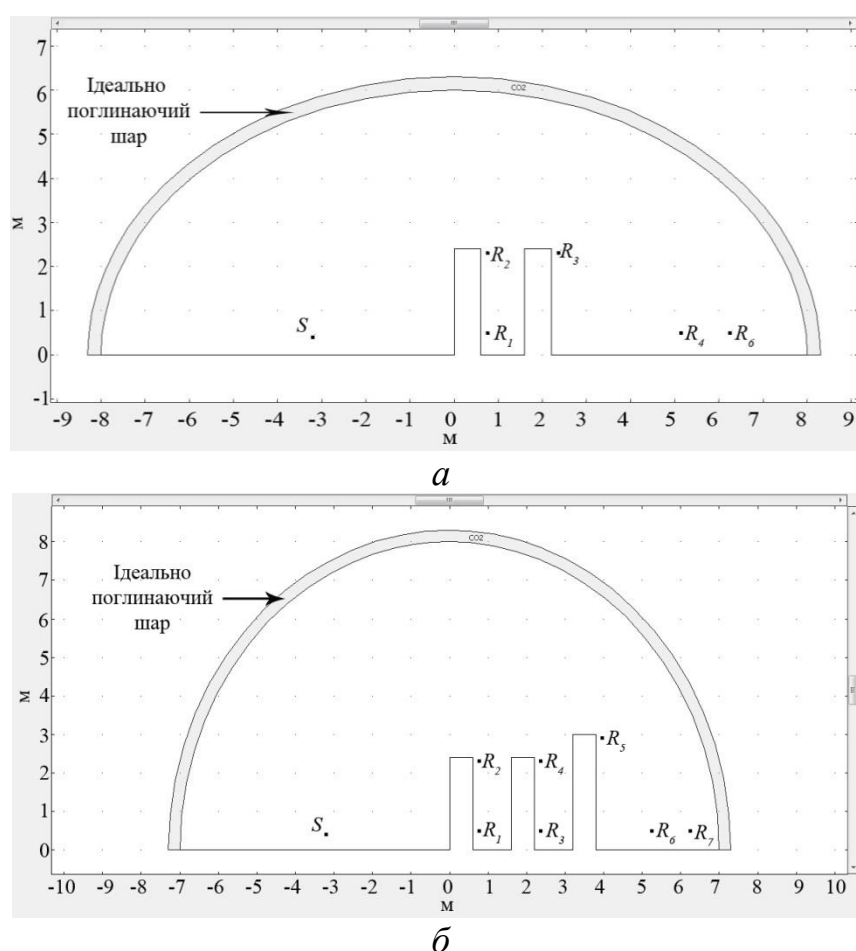


Рис. 4.6. Представлення геометрії задачі багаторазової дифракції в програмному пакеті Comsol Multiphysics: а – для двох рядів паралельних екранів кінцевих розмірів, б – для трьох рядів паралельних екранів кінцевих розмірів

Для розрахунку методом кінцевих елементів (МКЕ) було обрано чотири елементи на довжину хвилі. Для чотирьох елементів на довжину хвилі абсолютна похибка при розрахунках методом кінцевих елементів становила 1,5 %. Для моделювання сітки використовувалися квадратичні елементи Лагранжа. Розмір елементів для поточних розрахунків МКЕ для різних частот приведений в таблиці В.1.

При рішенні систем лінійних рівнянь методом кінцевих елементів використовувалися розв'язувач прямим методом UMFPACK (несиметричний мультифронтальний метод та пряме розкладання розріджених матриць).

Зміна рівнів звукового тиску визначалася як різниця рівнів звукового тиску при наявності та відсутності перешкод на лінії візування. Результати моделювання звукових полів методом кінцевих елементів приведені на рис. 4.7. для двох паралельних екранів та рис. 4.8 – для трьох екранів.

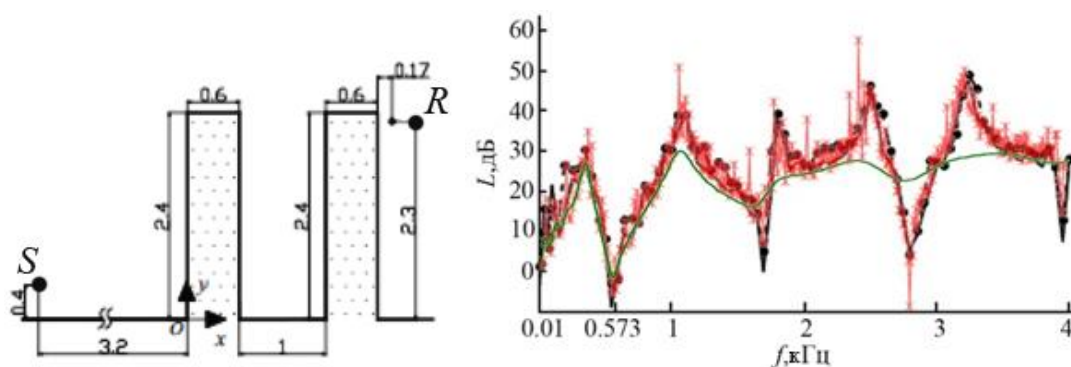


Рис. 4.7. Результати чисельного моделювання: чорна крива з маркерами – результати чисельного моделювання [164], червона крива – результати моделювання методом кінцевих елементів, зелена крива – результати моделювання на основі моделі, представленої в дисертаційній роботі

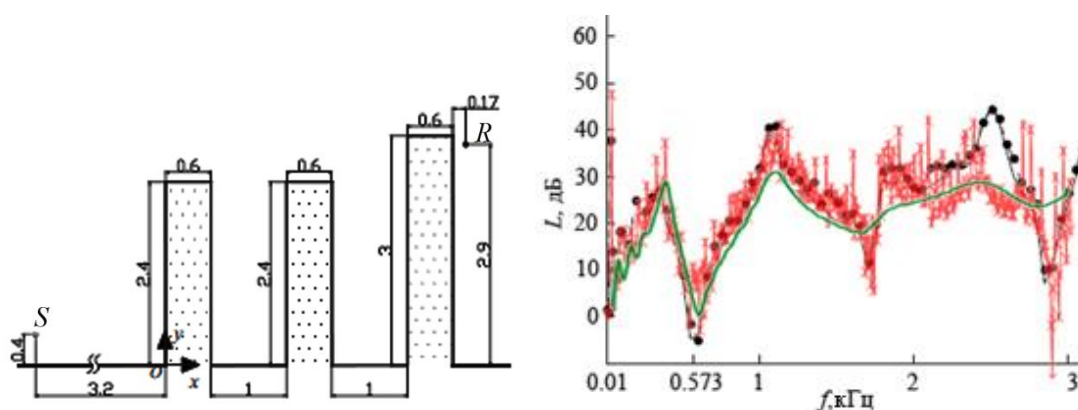


Рис. 4.8. Результати чисельного моделювання: чорна крива з маркерами – результати чисельного моделювання [164], червона крива – результати моделювання методом кінцевих елементів, зелена крива – результати моделювання на основі моделі, представленої в дисертаційній роботі

Задана товщина екранів 0,6 м відповідає довжині хвилі 573 Гц. В діапазоні частот, вище 573 Гц спостерігається відповідність між результатами чисельного моделювання, опублікованими іншими авторами, та запропонованою автором математичною моделлю в діапазоні 0,01–2,5 кГц (рис. 4.7 та 4.8). Для діапазону, нижче 573 Гц спостерігається кількісна відповідність. Всі три криві характеризуються вираженими інтерференційними піками та провалами, проте якщо для результатів чисельного моделювання (чорна та червона криві) такі піки та провали чітко виражені для всього діапазону частот, то для результатів моделювання на основі розробленої аналітичної моделі – вони згладжені. Це пояснюється тим, що для реальних умов для діапазону вище 2500 Гц в результаті впливу ряду факторів не спостерігається чітко виражених інтерференційних піків та провалів, що враховується в розробленій математичній моделі для транспортного потоку як широкопasmового джерела шуму.

Слід також зазначити, що для випадку моделювання трьох рядів забудови результати моделювання дають гіршу відповідність на частотах, вищих 2000 Гц, що пояснюється границями застосування ряду описаних моделей. Проте при моделюванні шуму транспортних потоків основний

інтерес представляють саме низькі та середні частоти. Розроблена модель може застосовуватися для моделювання розглянутих ефектів розповсюдження акустичних хвиль.

4.2. Картографування шуму як інструмент забезпечення екологічної безпеки та прогнозування акустичного забруднення сучасних міст

Основними завданнями даного розділу було розроблення удосконаленого методу картографування шуму для міського середовища та його верифікація.

Для оцінювання рівнів звукового тиску в кожній точці, що входить до складу сітки точок, які використовуються для створення контурів рівного шуму, була використана комплексна модель оцінювання рівнів шуму в точці приймача для міського середовища.

4.2.1. Формулювання удосконаленого методу картографування шуму

Так як кожне місто є унікальним та має характерне дорожнє покриття, склад автомобільного парку, необхідно враховувати конкретні умови міста для розрахунків рівнів шуму. Тому в дисертаційній роботі був розроблений удосконалений метод картографування шуму, що дозволив в процесі створення контурів рівного шуму проводити верифікацію та гармонізацію універсальної розробленої комплексної моделі та адаптувати її під умови конкретного міста. Основні переваги удосконаленого методу приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняння традиційних методів картографування шуму та
удосконаленого методу, запропонованого в дисертаційній роботі

Класичний метод картографування шуму	Авторський метод картографування шуму
1. Моделювання шуму транспортного потоку	
<p>Використовує емпіричні табличні дані $L(f)$ в спектральному діапазоні частот для окремих автомобілів з подальшим перерахунком для транспортного потоку [1,2,31–33]. Часом, використовується лише сумарна характеристика L_{eq}, що залежить від інтенсивності руху, проте не враховує швидкості руху v транспортного потоку</p>	<p>Математична модель, що дозволяє розрахувати як потужність окремого джерела в залежності від швидкості руху, характеристик руху, типу дорожнього покриття, так і акустичну потужність транспортного потоку, враховуючи такі характеристики як швидкість руху потоку, його густину та інтенсивність руху транспортних засобів на досліджуваній ділянці шляху</p>
2. Моделювання ефектів зниження шуму при його поширенні	
<p>Не враховуються імпедансні характеристики поверхонь [9–12], а також характеристики транспортного потоку, як широкополосного джерела шуму [1,3–6, 9–11]</p>	<p>Використовує удосконалені математичні моделі дифракції звукових хвиль, а також враховує нові ефекти відбивання від вертикальних поверхонь фасадів будівель</p>
3. Можливість адаптації розрахункових моделей з врахуванням характерних особливостей досліджуваного простору	
<p>–</p>	<p>Дозволяє розширити границі застосування математичної моделі розрахунку рівнів шуму за рахунок введення додаткових коефіцієнтів та</p>

	поправок на характерні особливості кожної місцевості
4. Типи контурів шуму	
Класичні методи дозволяють створювати лише горизонтальні перерізи контурів шуму [1,2]. В [2] приведено створення вертикальних перерізів житлової забудови, проте на основі емпіричних математичних моделей, що не враховують всіх ефектів поширення шуму	Розроблений метод дозволяє проводити трьохвимірне картографування шляхом створення, як горизонтальних, так і вертикальних перерізів звукових полів зони житлової забудови. Вертикальні перерізи контурів шуму дають можливість проаналізувати рівні шуму перед фасадами будівель зі змінюваною висотою приймача.

Алгоритм удосконаленого методу картографування приведений на рис. 4.9. Аналіз та паспортизація (блоки I та II на рис. 4.9.) передумов формування акустичного ландшафту міста проводяться з метою створення бази даних основних характеристик місцевості, для якої проводиться картографування. Отримані залежності та характерні особливості формування акустичного ландшафту місцевості дозволяють на етапі верифікації та адаптації (блоки III та IV на рис. 4.9) загальної математичної моделі вводити коефіцієнти та поправки на склад автомобільного парку регіону та характеристики та стан дорожніх покриттів місцевості картографування. Адаптована математична модель використовується для подальшого моделювання (блок V на рис. 4.9) в референтних точках за допомогою програмного продукту USScape1.0.

Особливістю описаного методу картографування є те, що він дозволяє розширити границі застосування математичної моделі розрахунку рівнів шуму за рахунок введення додаткових коефіцієнтів та поправок на характерні особливості кожної місцевості, а також дозволяє враховувати більше

факторів впливу на формування звукових полів в сучасних містах за допомогою моделей, розроблених в дисертаційному дослідженні.

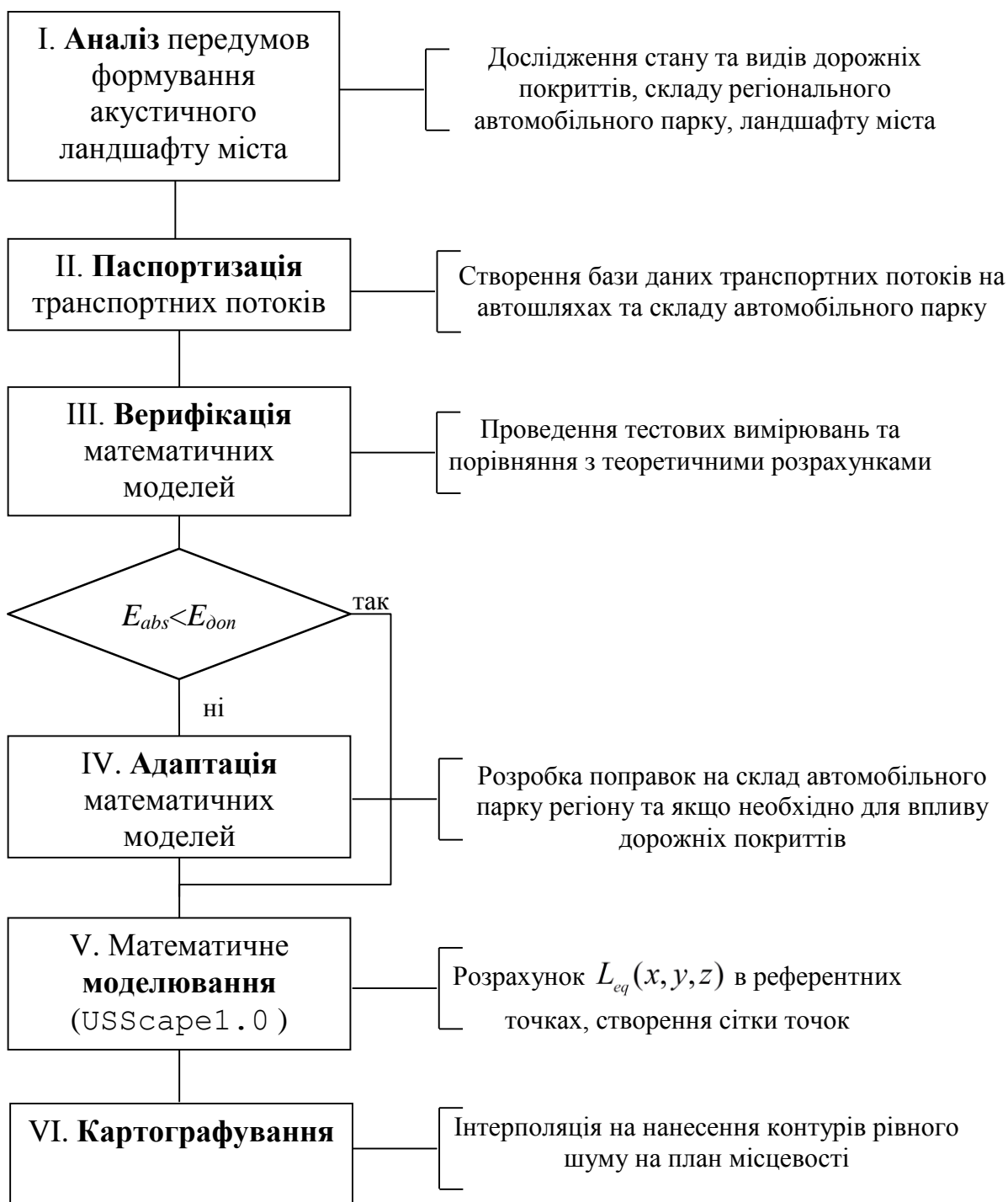


Рис. 4.9. Алгоритм удосконаленого методу створення карти шуму

4.2.2. Дослідження трьохмірних мап шуму для поздовжнього та поперечного перерізів вулиць міста

В дисертаційній роботі проведені дослідження як горизонтальних, так і вертикальних перерізів зони житлової забудови. Проте, коли горизонтальні перерізи на сьогодні добре відомі та широко використовуються на практиці [1–2], то створення та аналіз вертикальних перерізів є дуже актуальною, проте недостатньо дослідженою темою (розділ 1.3).

В якості прикладу горизонтальної карти шуму, створеної за допомогою удосконаленого методу картографування, приведена карта шуму м. Бурштин (рис. 4.10).

Для моделювання рівнів шуму використовувалася створене в дисертаційній роботі програмне забезпечення USScape1.0, а створення та нанесення контурів на основі отриманих даних створювалося за допомогою прикладного програмного забезпечення NMPLOT.

В табл. В.1 на прикладі м. Бурштин продемонстровано переваги моделювання за допомогою USScape1.0. При моделюванні акустичної потужності транспортного потоку по вул. Міцкевича м. Бурштин інтенсивність потоку становила 244, 8 та 4 авт./год. для I, II та III категорій транспортних засобів відповідно та швидкістю руху вільного потоку 65, 60, 60 км/год., приймач знаходився на відстані 38 м від дороги та 1,2 м від фасаду будівлі. Висота приймача становила 2,2 м по відношенню до рівня дороги.

Абсолютна похибка моделювання шуму транспортних потоків становила близько 4 дБ. Це пояснюється низькою інтенсивністю транспортних засобів. Загальне зниження шуму згідно експериментальним даним становило 8,6 дБ. Розрахунок загального зниження шуму був проведений за допомогою USScape1.0 та згідно стандартної моделі [2], що не враховує таких факторів впливу, як додаткові відбиття від фасаду будівлі. Загальне зниження шуму на основі експериментальних даних визначалося, як

різниця між акустичною потужністю транспортного потоку та РТЗ в точці прийому.

Так, порівнюючи абсолютну похибку моделювання загального зниження шуму для розрахунку USScape1.0 – 2,3 дБ та стандартної моделі – 3,7 дБ можна визначити, що точність моделі на 1,4 дБ вища при врахуванні додаткових відбиттів від фасаду, ніж для стандартної моделі. Тому було прийнято, що розроблена комплексна модель дозволила отримувати розрахункові дані з вищою точністю.

Для картографування шуму від транспортних потоків в м. Бурштин був обраний еквівалентний рівень шуму за одну годину в денний період доби. На карті показані еквівалентні рівні шуму за 1 год. по шкалі А для денного періоду доби для висоти приймача 1,2 м.

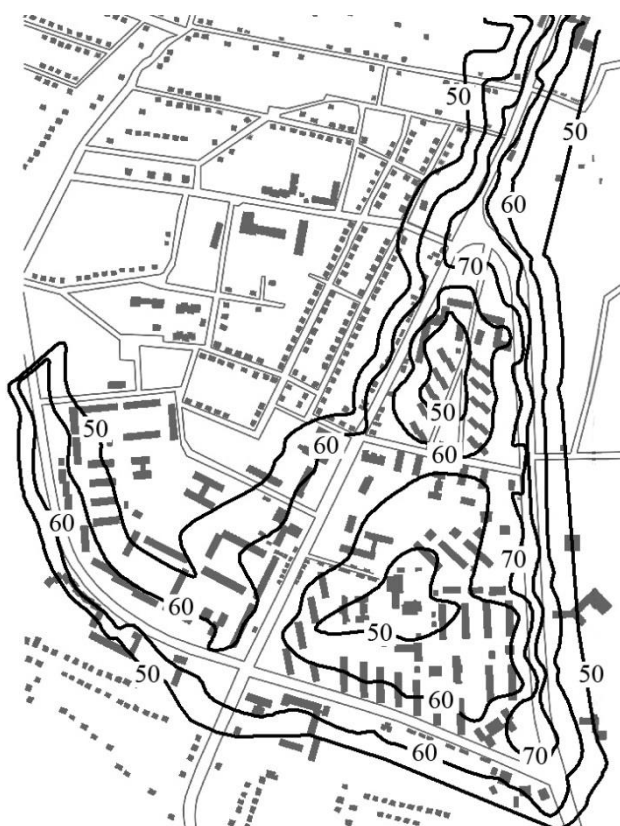


Рис. 4.10. Двовимірна горизонтальна карта шуму м. Бурштин: 50, 60 та 70 – контури рівного шуму в дБА

Використання програмного забезпечення NMPlot для нанесення горизонтальних контурів шуму також дозволило розрахувати відсоткові

співвідношення площі міста для відповідних контурів шуму (табл. В.2). Згідно таблиці приблизно для 70% дослідженої території не спостерігається перевищення санітарно-гігієнічних норм допустимих рівнів шуму [170], що для денного періоду доби на територіях, які безпосередньо прилягають до будівель з житловими приміщеннями, а також різноманітних навчальних закладів становлять 55 дБА.

Сучасною особливістю великих міст є не лише підвищення рівнів шуму в результаті збільшення інтенсивності транспортних потоків на вулицях, але і збільшення кількості високо поверхових будівель (розділ 1.3). Тому сьогодні звукові поля сучасних міст значним чином відрізняються від сільської місцевості, а також від минулого.

Для сучасного міста основним недоліком використання лише горизонтальних двомірних карт шуму є постійна та лише одна висота приймача шуму. Так, згідно існуючим національним нормам [170,171] карти шуму створюються для висоти приймача 1,2–1,5 м, що дорівнює середній висоті положення вуха людини по відношенню до поверхні землі. В Європейських вимогах висота приймача 1,5 м була замінена на висоту, що становить 4 м над поверхнею землі [172]. Але жодна з наведених висот не дозволяють в повній мірі охопити та проаналізувати звукові поля на території сучасної високоповерхової житлової забудови. Характерною особливістю тут є змінювані рівні звукового тиску в залежності від висоти точки розрахунку, що прямо впливає на рівні шуму перед вікнами різних поверхів, а значить і проходження шуму всередину приміщення.

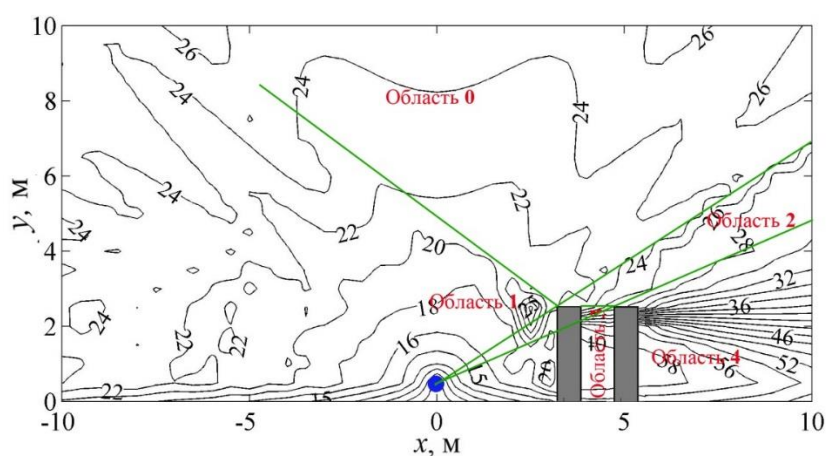
Метод картографування вертикального перерізу аналогічний створенню горизонтальних карт, та приведений на рис. 4.9. Для моделювання використовується програмний продукт. Для створення вертикальних перерізів використовувався програмний модуль `vertical_map.m`.

На рис. 4.11 створено контури шуму для випадків двох та трьох рядів будівель, досліджених для верифікації комплексної моделі в розділі 4.1.3. На

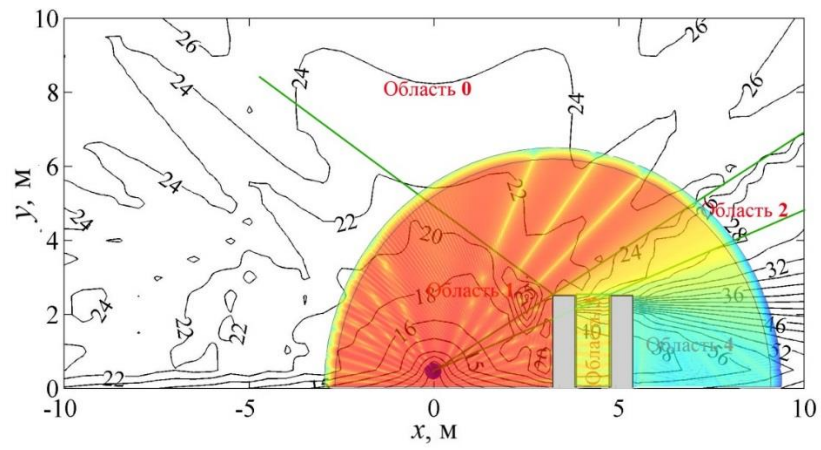
контурах нанесено загальне зниження шуму в кожній точці житлової забудови.

Для аналізу отриманих контурів вони були досліджені згідно зонування положення приймача (рис. 4.3), а також зіставлені з результатами чисельного моделювання звукових полів приведеного в розділі 4.1.3.

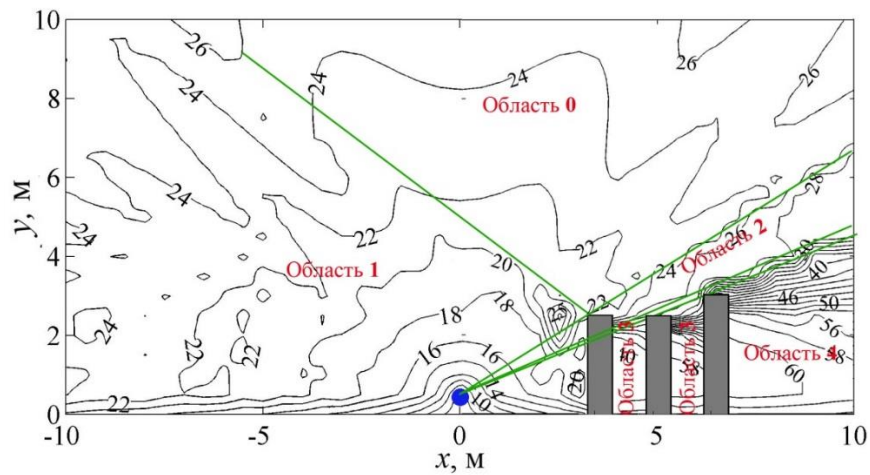
На рис. 4.11, *а* та 4.11, *в* області 0 є ідентичними та характеризуються переважаючими ефектами дивергенції та інтерференції звукових хвиль. Область 1 на обох рисунках аналогічно є ідентичною та характеризується складною картиною звукового поля. Також слід зазначити, що вплив додаткових відбиттів від фасаду будівлі основним чином прослідковується близько від поверхні фасаду, тоді як на значних відстанях від фасаду він зводиться до мінімуму, що підтверджено результатами параметричних досліджень (розділ 3.4.2). Область 1 впливу додаткових відбиттів, що знаходиться під зеленою прямою на рис.4.11б та 4.11г співпадає з інтерференційною картиною піків та провалів на нанесених поверх контурів результатах моделювання МКЕ. Над прямою, що розмежовує області 0 та 1 коливання рівнів звуку вирівнюється.



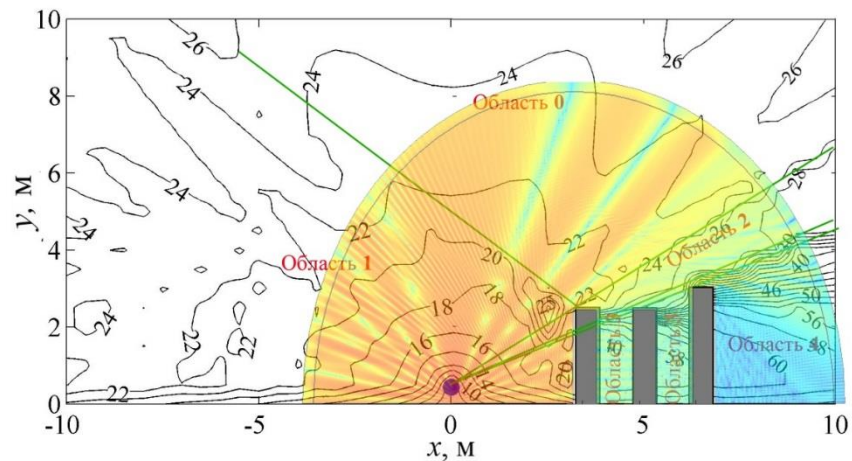
а



б



в



г

Рис. 4.11. Аналіз контурів сумарного зниження шуму A_{excess} для двох а, б та трьох рядів будівель в, г; б та в – контури шуму з нанесеними результатами моделювання звукових полів МКЕ

Аналізуючи область 3 для обох контурів, необхідно зазначити, що тут переважаючими є вплив ефектів дифракції, хоча підвищення рівнів шуму біля нижніх поверхів забудови вказує на вплив відбивання від земної поверхні та фасаду будівлі. Незважаючи на це, можна зробити висновок, що основний вклад додаткових відбиттів від поверхонь фасадів будівель спостерігається для області 1, коли лінія візування не перетинає перешкод.

Аналізуючи області 2 та 4, слід зазначити, що вони чітко відповідають границям зони акустичної тіні. Необхідно зауважити, що при наявності декількох перешкод основний вклад вносять ефекти дифракції на першій перешкоді та на найвищій перешкоді. При розташуванні будівель однакової висоти паралельними рядами ефективність кожної наступної будівлі знижується в порівнянні з попередньою.

На рис. 4.12 приведений приклад вертикальної карти шуму для будівлі 8 корпусу Національного авіаційного університету. Висота останнього 16-го поверху становила 64,1 м, а висота будівлі 71,7 м на поверхню дороги. Відстань до крайньої полоси руху – 15 м.

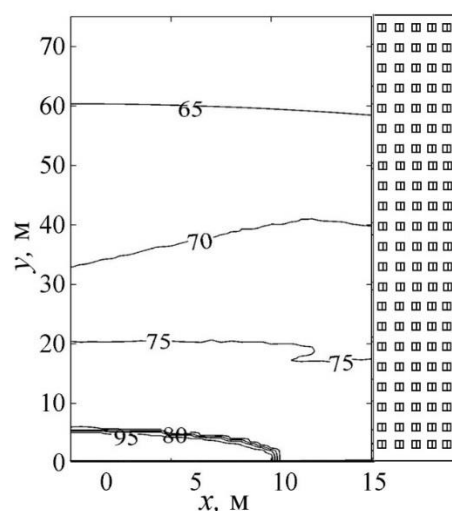


Рис. 4.12. Конттури шуму для корпусу 8 НАУ

Формування контурів рівного шуму перед фасадом характеризується впливом додаткових відбиттів від самого фасаду. Таким чином, було встановлено, що для досліджуваної геометрії вплив підвищення шуму за

рахунок впливу додаткових відбиттів від фасадів становить 4–5 дБ та характерне для поверхів з 1-го по 9-ий. Для вищих поверхів визначаючим ефектом зниження шуму є дивергенція звукових хвиль.

Для аналізу рівнів шуму перед фасадом корпусу проведено порівняння спектральних рівнів шуму в октавному діапазоні частот з допустимими значеннями [170] (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Зіставлення розрахованих значень РЗТ та допустимих рівнів перед фасадом 8 корпусу НАУ для різних поверхів

№ поверху	Висота поверху, м	Частоти, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
		РТЗ, дБ							
3	15,3	73,0	64,2	63,8	67,2	67,1	64,9	58,6	50,1
4	19,1	72,2	63,3	64,3	65,9	65,7	63,0	58,2	49,6
5	22,8	70,9	62,3	64,7	64,3	65,0	63,2	57,3	48,7
6	26,6	68,0	60,8	63,1	62,8	62,8	61,5	54,6	46,7
7	30,3	67,5	60,0	63,5	61,2	62,0	61,5	53,8	46,4
8	34,1	67,4	59,5	63,3	60,7	61,4	61,4	53,4	45,6
9	37,8	67,5	58,9	63,5	60,2	60,5	61,1	53,2	45,0
10	41,6	67,3	58,3	62,9	60,0	59,7	60,7	52,8	44,5
11	45,4	63,7	56,1	56,1	57,6	57,2	56,7	50,3	42,5
12	49,1	63,2	55,5	55,6	57,2	56,6	56,2	49,7	41,9
13	52,9	62,6	55,0	55,1	56,8	56,1	55,7	49,2	41,1
14	56,6	62,1	54,5	54,6	56,4	55,6	55,3	48,7	40,8
15	60,4	61,7	54,0	54,2	56,0	55,2	54,8	48,2	40,4
16	64,2	61,2	53,5	53,7	55,6	54,7	54,4	47,7	39,8
Допустимі значення, дБ		75	66	59	54	50	47	45	43

Порівняння проведено для поверхів з 3 по 16, де розташовані навчальні аудиторії. Рівні шуму визначалися на відстані 2 м від фасаду будівлі. Визначені перевищення над допустимим значеннями, що спостерігаються в діапазоні частот 500–400 Гц для всіх поверхів та максимальними перевищеннями до 12–17 дБ для 3–7-го поверхів, для 250 Гц – до 10-го поверху з максимальним перевищенням до 4 дБ та для 3–5 поверхів для 8000 Гц з максимальними перевищеннями 7 дБ.

Для L_{Aeq} перед фасадом корпусу (табл. 4.5) спостерігається перевищення над допустимим значенням 55 дБА [170] для всіх поверхів з максимальним перевищенням до 20 дБ для 3–5-го поверхів. Тому було проведено оцінювання рівнів шуму всередині навчальних приміщень. Використавши значення нормативних вимог до звукоізоляції вікон в навчальних приміщеннях категорій Б та В [170] були розраховані значення рівнів шуму в приміщенні та порівняні з допустимим значенням 40 дБА [170]. При такій звукоізоляції спостерігається перевищення над допустимим значенням з 3-го (до 15 дБА) по 16-ий (4 дБ) поверхи. Тому рекомендовано використовувати додаткову звукоізоляцію для досягнення необхідних значень зниження шуму, особливо в діапазоні низьких частот, так як саме вони вносять основний вклад в перевищення шуму та є характерними для шуму транспортних потоків.

Таблиця 4.5

Зіставлення розрахованих значень L_{Aeq} та допустимих рівнів перед фасадом та всередині приміщень $L_{Aeq-прим}$

№ поверху	L_{Aeq} , дБА	$R_{Атран}$, дБА	$L_{Aeq-прим}$, дБА	
3	76,1	20	56,1	
4	74,9		54,9	
5	74,1		54,1	
6	71,9		51,9	
7	71,4		51,4	
8	70,9		50,9	
9	70,4		50,4	
10	69,9		49,9	
11	66,8		46,8	
12	66,3		46,3	
13	65,8		45,8	
14	65,3		45,3	
15	64,8		44,8	
16	64,4		44,4	
Допустимі значення, дБА	55			40

Аналогічні дослідження були проведені для Чоколівського бульвару (рис. 4.13 та табл. 4.6–4.7), де по обидва боки від автошляху розташовані 5-ти поверхові житлові будівлі та для вул. Вадима Гетьмана (рис. 4.14 та табл. 4.8–4.11), де з одного боку знаходиться 9-поверхові житлова будівля, а з іншого будівля торгово-розважального комплексу.

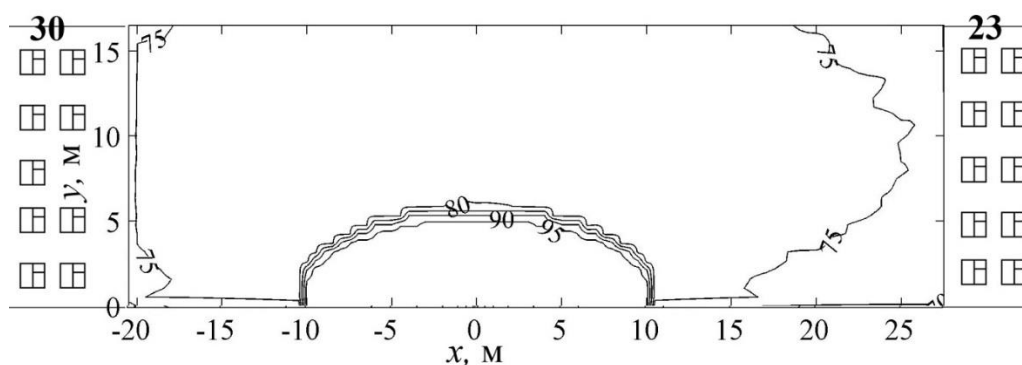


Рис. 4.13. Контури шуму для Чоколівського бульвару, 23 та Чоколівського бульвару, 30

Таблиця 4.6

Зіставлення розрахованих значень РЗТ та допустимих рівнів перед фасадом Чоколівського бульвару для різних поверхів

№ поверху	Висота поверху, м	Частоти, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
РТЗ, дБ									
1	2	70,8/ 72,8	61,1/ 62,7	65,2/ 66,3	64,7/ 66,1	64,3/ 65,6	62,5/ 64,7	54,1/ 57,6	46,3/ 48,9
2	5,3	70,8/ 72,8	60,6/ 62,0	64,9/ 65,7	63,3/ 64,6	64,7/ 66,2	63,0/ 66,8	59,3/ 59,8	49,4/ 51,5
3	8,6	70,8/ 72,7	59,7/ 61,0	64,3/ 64,7	62,6/ 65,6	64,8/ 65,2	67,1/ 66,0	57,5/ 59,6	49,6/ 51,3
4	11,9	70,8/ 72,5	58,9/ 60,0	63,6/ 64,0	64,3/ 66,9	63,9/ 66,1	65,1/ 66,3	57,8/ 58,4	50,1/ 51,2
5	15,2	70,8/ 72,4	58,1/ 59,3	62,9/ 63,9	66,6/ 65,5	64,1/ 66,3	64,2/ 65,7	57,1/ 57,9	49,2/ 50,2
Допустимі значення, дБ		75	66	59	54	50	47	45	43

Зіставлення розрахованих значень L_{Aeq} та допустимих рівнів перед фасадом та всередині приміщень $L_{Aeq-прим}$

№ поверху	L_{Aeq} , дБА	$R_{Атран}$, дБА	$L_{Aeq-прим}$, дБА
1	75,0/73,4	20	55,0/53,4
2	75,8/74,3		55,8/54,3
3	75,8/75,0		55,8/55,0
4	75,8/74,7		55,8/54,7
5	75,1/74,2		55,1/54,2
Допустимі значення, дБА	55		40

Розташування житлових будівель по обидві сторони від лінії транспортного потоку є характерним для міст України, та саме такі варіанти забудови характеризуються перевищенням над допустимими рівнями шуму.

Було встановлено, що для Чоколівського бульвару спостерігається перевищення рівнів шуму в діапазоні частот 250–8000 Гц для всіх поверхів з максимальним перевищенням до 15 дБ для 1000–2000 Гц та до 20 дБА для L_{Aeq} .

Випадок забудови по вул. Вадима Гетьмана є характерним прикладом сучасної забудови міст, коли вздовж транспортних шляхів з'являються високоповерхові будівлі, що стають додатковими поверхнями відбивання, як, наприклад, торгово-розважальний комплекс.

Так було визначено, що для 9-поверхового будинку спостерігаються перевищення для всіх поверхів для діапазону частот 250–8000 Гц. При чому, слід звернути увагу на те, що додаткові відбиття призводять до того, що рівні шуму для 1-го та 9-го поверхів є однаковими, тобто не спостерігається зниження шуму з висотою. Підвищення шуму за рахунок додаткових відбиттів становить до 5 дБА для верхніх поверхів будівлі.

Для торгівельно-розважального центру перевищення становлять до 15 дБ в діапазоні частот 500-8000 Гц та до 20 дБА для всіх поверхів.

Підвищення шуму за рахунок додаткових відбиттів аналогічно складає до 5 дБА.

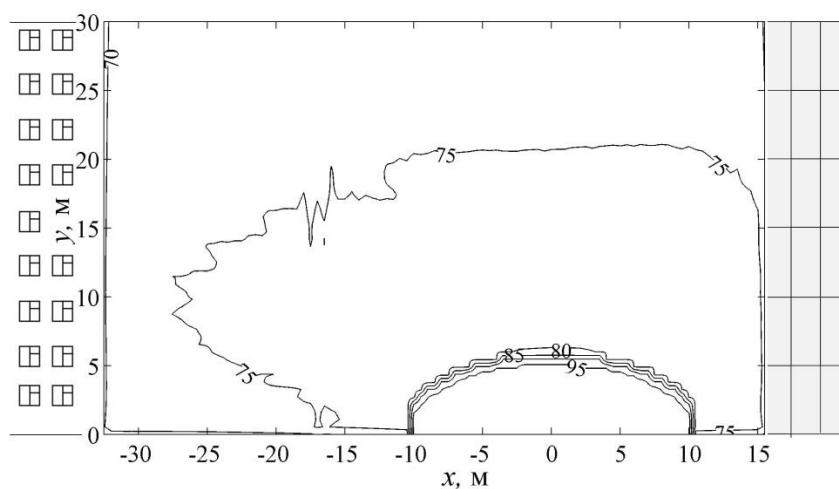


Рис. 4.14. Контури шуму для вул. Вадима Гетьмана

Таблиця 4.8

Зіставлення розрахованих значень РЗТ та допустимих рівнів перед фасадом вул. Вадима Гетьмана для різних поверхів торгово-розважального комплексу

№ поверху	Висота поверху, м	Частоти, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
		РЗТ, дБ							
1	1,5	74,6	64,6	67,5	68,1	67,6	66,3	59,6	50,6
2	6,5	74,4	64,3	65,8	67,3	67,2	68,0	61,8	52,7
3	11,5	74,0	61,8	65,2	67,3	67,6	67,2	59,1	51,9
4	16,5	73,4	61,6	64,5	66,2	65,9	64,9	58,7	50,7
5	21,5	72,8	61,7	62,6	64,5	65,5	64,6	57,8	49,4
6	26,5	72,1	61,8	61,3	64,1	64,1	63,7	57,0	48,8
Допустимі значення, дБ		90	75	66	59	54	50	47	45

Таблиця 4.9

Зіставлення розрахованих значень L_{Aeq} та допустимих рівнів перед фасадом та всередині приміщень $L_{Aeq-prim}$

№ поверху	L_{Aeq} , дБА	$R_{Атран}$, дБА	$L_{Aeq-prim}$, дБА
1	76,7	20	56,7
2	77,2		57,2
3	76,7		56,7
4	75,4		55,4
5	74,5		54,5
6	73,5		53,5
Допустимі значення, дБА	55		60

Таблиця 4.10

Зіставлення розрахованих значень РЗТ та допустимих рівнів перед фасадом вул. Вадима Гетьмана для різних поверхів жилого будинку № 22А

№ поверху	Висота поверху, м	Частоти, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
		РЗТ, дБ							
1	2,3	70,0	60,7	64,5	63,9	63,3	61,8	52,9	45,3
2	5,6	70,0	60,3	64,2	62,8	63,3	62,0	58,8	47,4
3	8,9	70,0	60,0	63,7	62,0	64,4	65,6	56,6	49,2
4	12,2	70,0	58,7	63,1	62,5	63,1	65,4	55,9	49,5
5	15,5	70,0	57,8	62,5	65,1	62,6	63,4	57,5	48,2
6	18,8	70,2	57,1	62,1	65,7	63,5	61,6	56,5	48,5
7	21,2	70,3	56,8	61,9	64,2	64,3	61,6	56,2	48,3
8	24,5	70,5	56,5	61,8	63,3	64,6	61,6	56,0	47,6
9	27,8	70,2	56,2	61,8	62,5	63,8	63,8	55,4	47,1
Допустимі значення, дБ		75	66	59	54	50	47	45	43

Зіставлення розрахованих значень L_{Aeq} та допустимих рівнів перед фасадом та всередині приміщень $L_{Aeq-прим}$

№ поверху	L_{Aeq} , дБА	$R_{Атран}$, дБА	$L_{Aeq-прим}$, дБА
1	72,4	20	52,4
2	73,1		53,1
3	73,9		53,9
4	74,2		54,2
5	73,6		53,6
6	73,2		53,2
7	72,8		52,8
8	72,4		52,4
9	72,0		52,0
Допустимі значення, дБА	55		40

Таким чином, розроблене програмне забезпечення дозволяє більш точно та детально оцінювати до досліджувати формування звукових полів в умовах комплексної житлової забудови, а також враховувати ряд фактів, які не враховуються в існуючих методах акустичної експертизи для існуючих умов, а також на стадії проектування. Особливо важливо враховувати додаткові відбиття від вертикальних поверхонь, а саме, фасадів будівель, на стадії проектування, коли нову багатоповерхову будівлі розташовують на території вже існуючої забудови.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 4

1. Розроблена комплексна модель оцінювання рівнів шуму в точці прийому для міського середовища на основі авторських математичних моделей, що враховують особливості поширення звуку в зоні багатоповерхової житлової забудови та характеристики руху транспортних потоків. Комплексна модель реалізована у вигляді програмного продукту

USScape1.0. Порівняння результатів моделювання за допомогою програмного продукту USScape1.0 з результатами чисельного моделювання МКЕ та результатами чисельного моделювання інших авторів [13] показало точність моделювання 3 дБ для діапазону частот 25–2000 Гц, що і вносять основний вклад в створювані рівні шуму від транспортних потоків.

2. За допомогою розробленої комплексної моделі проведені дослідження трьохмірного картографування шуму для високоповерхових будівель міста. При створенні горизонтального перерізу трьохмірного картографування шуму для м. Бурштин за допомогою запропонованої моделі для прогнозування шумового забруднення міста дозволило розробити ефективні методи зниження шуму з урахуванням конкретних умов: інтенсивності транспортних потоків, топографічних особливостей міста, часу доби.

3. Створення вертикальних перерізів трьохмірного картографування шуму в м. Києві для різних типів житлової забудови дозволило виявити характерні ефекти формування звукових полів перед фасадами високоповерхових будівель. Було визначено, що вплив додаткових відбиттів при розташуванні будівель по іншій бік від автомобільного шляху підвищує існуючі рівні шуму на 3–5 дБА з характерним підвищенням в районі 7–9-го поверхів багатоповерхової забудови. Таке підвищення призводить до того, що при збільшенні висоти не спостерігається зниження рівнів шуму перед фасадами. Ефект підвищення рівнів шуму не спостерігається для верхніх поверхів будівель, що мають більше 9–10-го поверхів, як у випадку 8 корпусу НАУ.

4. Розроблена модель дозволяє на стадії проектування міста розрахунковими методами оцінити на скільки та в якому місці будівлі можливо зменшити рівні шуму до нормативних з використанням існуючих методів його зниження, а також при проектуванні розташування будівлі в уже існуючій зоні житлової забудови.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МЕТОДУ РАНЖУВАННЯ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ШУМУ В ЖИТЛОВОМУ ПРИМІЩЕННІ ТА НА ТЕРИТОРІЇ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ

5.1. Екологічна оцінка внеску методів зниження транспортного шуму

В попередніх розділах дисертаційної роботи досліджено ряд методів зниження шуму на шляху його розповсюдження. Проте використання кожного з приведених методів має свої обмеження та є ефективним лише при заданих умовах. Основним критерієм потенційного використання методу зниження шуму є співвідношення екологічна ефективність/економічна ефективність. При дослідженні даної задачі запропоновано підхід вибору методів зниження транспортного шуму шляхом ранжування їх ефективності.

5.1.1. Математичне формулювання задачі спільної оцінки методів зниження транспортного шуму в житловому приміщенні та на території житлової забудови

В даному дослідженні розглядається комплексна задача зниження шуму від транспортних потоків як всередині приміщень, так і на території житлової забудови.

Зниження транспортного шуму в житловому приміщенні може бути досягнуто за рахунок зменшення у джерелі його утворення (наприклад, від шуму двигунів, шуму взаємодії коліс з дорожнім покриттям, регулювання швидкості руху транспорту та ін. методів).

Нехай P_j – відносний внесок j -го методу зменшення шуму. Так як рівні шуму транспорту нестационарні і залежать від часу, для його оцінки

використовуються еквівалентні рівні шуму. Еквівалентний рівень шуму для i -го транспортного засобу записується у вигляді:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T_0} \sum_j \tau_{efi} 10^{0,1L_{Amax i}} \right), \quad (5.1)$$

де T_0 – час спостереження, τ_{efi} – ефективний час для i -го транспортного засобу, що визначається як час звучання верхніх десяти децибел, $L_{Amax i}$ – максимальний рівень звуку i -го транспортного засобу. Ефективний час впливу для i -го транспортного засобу визначається у вигляді співвідношення:

$$\tau_{efi} = k \frac{l_i}{v_i}, \quad (5.2)$$

де k – емпіричний коефіцієнт, l_i – найкоротша відстань від i -го транспортного засобу до приймача звуку, v_i – швидкість i -го транспортного засобу. Інтервал часу спостереження поділяється на N сегментів. В цьому випадку рівняння (5.1) можна записати в наступному вигляді:

$$1 - \sum_{j=1}^{j=N} \tau_{eff} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j} = 0 \quad (5.3)$$

де $\Delta L_j = L_{Aeq} - L_{Amax}$, L_{Aeq} – задане значення рівня звуку.

В реальних умовах селітебна територія складається з багатопверхових будівель. Саме тому проводилось одночасне оцінювання методів зниження шуму для багатьох положень приймачів.

Припустимо, що розглядається i положень приймачів та використовується j -ий метод зниження шуму. Тому, рівняння (5.3) записується як система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^1} = 0 \\ 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^2} = 0 \\ \vdots \\ 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^i} = 0 \end{array} \right. \quad (5.4)$$

де $\Delta L_j^1, \Delta L_j^2 \dots \Delta L_j^i$ – значення зниження шуму на селітеній території з використанням j -го методу для i -го положення приймача.

Зменшення шуму на шляху його поширення від транспортних засобів до приймача може бути досягнуто за рахунок містобудівних методів (наприклад, шляхом зменшення відстані між джерелом і об'єктом, використання акустичних екранів, смуг зелених насаджень, використання рельєфу місцевості, збільшенні звукоізоляції вікон, встановлення в приміщенні звукопоглинальних покриттів).

Припустимо, що використовується j -ий засіб зниження шуму від транспортного потоку на шляху його поширення. Величина зниження рівня звуку дорівнює δL_j . Необхідно забезпечити сумарне зниження шуму в приміщенні від транспорту на величину:

$$\delta L = \sum_j P_j \delta L_j. \quad (5.5)$$

Для розглянутих i положень приймачів рівняння (5.5) записано у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta L_1 - \sum_j P_j \delta L_j^1 = 0 \\ \delta L_2 - \sum_j P_j \delta L_j^2 = 0 \\ \vdots \\ \delta L_i - \sum_j P_j \delta L_j^i = 0 \end{array} \right. \quad (5.6)$$

де $\delta L_1, \delta L_2, \dots, \delta L_i$ – загальне зниження шуму всередині приміщень для i -го положення приймача, $\delta L_j^1, \delta L_j^2, \dots, \delta L_j^i$ – значення зниження шуму всередині приміщення з використанням j -го методу для i -го положення приймача.

Розглянуту задачу розглядаємо з позицій аналізу складної системи [181]. У цій системі вводиться поняття ентропії [180]:

$$S = \sum_j P_j \left(1 + \ln \frac{v_j}{P_j} \right), \quad (5.7)$$

де v_j – апіорна оцінка значимості j -го методу зниження транспортного шуму в приміщенні.

Величина P_j (відносний внесок j -го методу зменшення шуму) визначається як екстремум ентропії (5.7) при обмеженнях (5.4), (5.6) [181,182]. Згідно методу множників Лагранжа запишемо допоміжну функцію у вигляді:

$$\Phi = S + \sum_i \lambda_i \left(1 - \sum_j \tau_{eff} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^i} \right) + \sum_i \beta_i \left(\delta L_i - \sum_j P_j \delta L_j^i \right) \quad (5.8)$$

де λ_i, β_i – множники Лагранжа.

Знаходимо екстремум функції (5.8):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_j} = \ln \frac{v_j}{P_j} - \sum_i \lambda_i \tau_{eff} T_0^{-1} 10^{-0,1\Delta L_j^i} - \sum_i \beta_i \delta L_j^i = 0 \quad (5.9)$$

З рівняння (5.9) знаходимо значення P_j :

$$P_j = v_j \exp(-\tau_{eff} T_0^{-1} \sum_i \lambda_i 10^{-0,1\Delta L_j^i} - \sum_i \beta_i \delta L_j^i). \quad (5.10)$$

Таким чином, задача зводиться до відшукування множників Лагранжа за допомогою рівнянь (5.4), (5.6).

Рівняння (5.8) для i -ої кількості досліджуваних точок запишеться наступним чином:

$$\Phi = S + \sum_i \lambda_i \left(1 - \sum_j \tau_{eff} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^i} \right) + \sum_i \beta_i \left(\delta L_i - \sum_j P_j \delta L_j^i \right) \quad (5.11)$$

де λ_i, β_i – множники Лагранжа, δL_j^i – величина j -го методу зниження транспортного шуму в приміщенні в i -ій точці, ΔL_j^i – величина j -го методу зниження транспортного шуму на території забудови в i -ій точці.

Знайшовши екстремум функції (5.11) $\frac{\partial \Phi}{\partial P_j}$ отримаємо значення P_j – відносного внеску j -го методу зменшення шуму для досліджуваних i точок:

$$P_j = v_j \exp(-\tau_{eff} T_0^{-1} \sum_i \lambda_i 10^{-0,1\Delta L_j^i} - \sum_i \beta_i \delta L_j^i)$$

В запропонованому методі вибору апіорної оцінки v_j (значущості j -го методу зниження транспортного шуму в приміщенні) використовується умова нормування:

$$\sum_j v_j = 1.$$

5.1.2. Дослідження ефективного часу автомобілів різних категорій

Ефективний τ_{efi} час для i -го транспортного засобу в дисертаційній роботі визначався на основі експериментальних досліджень акустичних характеристик автомобілів різних категорій. Згадані експериментальні дослідження приведені в розділі 2.2.1. для апробації математичної моделі

розрахунку рівнів звуку, створюваних окремими транспортними засобами. Результати вимірювань дозволили отримати емпіричну залежність для ефективного часу звучання для транспортних засобів різних категорій.

Для розрахунку ефективного часу звучання окремого транспортного засобу рівняння (5.1) було переписане наступним чином:

$$\tau_{ef} = T_0 10^{0.1(L_{A_{max}} - L_{eq})},$$

де $L_{A_{max}}$ та L_{eq} – результати вимірювань, а T_0 – час проїзду окремого автомобілю для стандартної встановленої відстані.

Математична модель ефективного часу звучання досліджувалася на основі бази даних проїздів окремих автомобілів. Заміри характеристик транспортного шуму проводилися для довжини ділянки проїзду 40 м. Для відомої швидкості та довжини ділянки час проїзду окремого автомобілю визначався, як:

$$T_0 = \frac{s}{v},$$

де s – довжина ділянки проїзду, v – швидкість транспортного засобу в м/с.

Для визначення коефіцієнту k рівняння (5.2) використовувався генетичний алгоритм оптимізації програмного забезпечення Matlab. Завданням генетичного алгоритму є оптимізація функції цілі [183,184]. При моделюванні ефективного часу звучання використання генетичного алгоритму зводиться до мінімізації відхилення результату виміряного значення від розрахованого еквівалентного рівня звукового тиску:

$$E = \sum_{i=1}^n (\tau_{ef,measured} - \tau_{ef,modeled})^2,$$

де $\tau_{ef,measured}$ – виміряні значення ефективного часу звучання, $\tau_{ef,modeled}$ – змодельовані значення ефективного часу звучання.

Таким чином, за допомогою генетичного алгоритму були отримані коефіцієнти k для автомобілів I та II–III категорії. II та III категорії були об'єднані, так як дослідження показали ідентичність розрахованих коефіцієнтів.

Таким чином, співвідношення (5.2) запишуться як:

- для автомобілів I категорії

$$\tau_{ef,1} = 2,19 \frac{l}{v_1},$$

- для автомобілів II та III категорії

$$\tau_{ef,2,3} = 2,27 \frac{l}{v_{2,3}},$$

де l – відстань від джерела до приймача звукових коливань.

Результати моделювання ефективного часу звучання та порівняння з експериментальними даними для різних швидкостей, що є найхарактернішими для сучасних міст приведено в табл. Д.1 для легкових автомобілів та табл. 2. для важких транспортних засобів.

Аналіз результатів досліджень показав, що при підвищенні швидкості проїзду автомобілю точність моделювання зростає. Так, для швидкостей легкових та вантажних автомобілів вище 60 км/год абсолютна похибка моделювання становить 0,04 с на відміну від 0,19 с для швидкостей 30–40 км/год. Слід зазначити, що для значних транспортних потоків сучасних міст (в тому числі і м. Київ) саме швидкості 50–70 км/год є найтипівішими, що підтверджено експериментальними дослідженнями, описаними в розділі 2 дисертаційної роботи. Менші швидкості спостерігаються лише для невеликих транспортних потоків, які не створюють перевищення над нормативними рівнями шуму.

Отримана залежність ефективного часу звучання від шив кості транспортного засобу приведена на рис. 5.1.

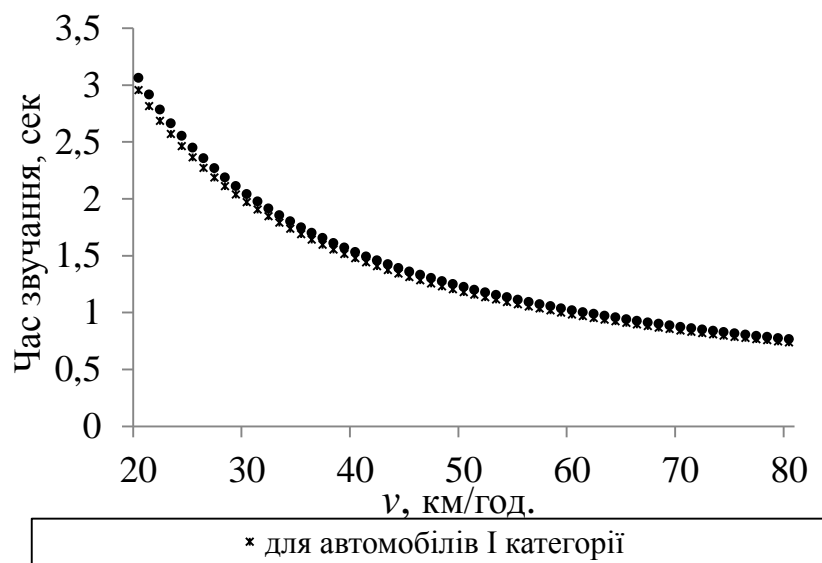


Рис. 5.1. Порівняння часу звучання верхніх 10 дБ для автомобілів різних категорії

Як видно з рис. 5.1, крива часу звучання визначається монотонною залежністю.

Отримані залежності ефективного часу звучання використовувалися для подальшого моделювання еквівалентних рівнів шуму наближеним методом.

5.1.3. Дослідження відносного внеску j -го методу зменшення шуму в загальне акустичне поле

Початковим етапом оцінювання внеску методу зниження шуму є визначення вхідних даних. Для обраного переліку методів зниження шуму розраховуються значення зниження шуму як на території житлової забудови, так і всередині приміщення. Припускається, що на території житлової забудови приймач знаходиться на відстані 2 м від фасаду будівлі, а його

висота становить 1,2 м. Всередині приміщення висота приймача залишається аналогічною, а відстань від стіни приймається 1 м. При використанні таких методів зниження шуму, як звукоізоляція або використання активних вікон – вважається, що ці методи не вносять вкладу до зниження шуму на території житлової забудови. Зниження шуму розраховуються за допомогою математичних моделей, описаних в розділах 2 та 3.

Апріорною оцінкою зниження шуму прийнято вартість використання методу зниження шуму для отримання зазначених показників. Значення апріорної оцінки визначені на основі експертного оцінювання [3]. Економічний аспект методів зниження шуму визначався на основі опублікованих даних інших авторів. Апріорна оцінка початково визначалася як вартісний показник в гривнях, але для зручності розрахунків була приведена до умовних одиниць.

Розрахунки відносного внеску j -го методу зменшення шуму проводилися для двох випадків необхідного зниження шуму всередині приміщення $\delta L = 8$ дБ та $\delta L = 17$ дБ.

Це обумовлено тим, що модель є чутливою до значення δL та розраховує відносний внесок j -го методу зменшення шуму на основі заданого δL . Ця залежність продемонстрована нижче на рис. 5.2.

Для відшукування відносного внеску j -го методу зменшення шуму за допомогою рівняння (5.9) вирішувалася задача знаходження невідомих множників Лагранжа за допомогою оптимізаційного додатку Optimization Toolbox програмного забезпечення MatLab з використанням розв'язувача системи нелінійних рівнянь.

З метою апробації розробленої математичної моделі – проводилося моделювання тестового випадку, для якого апріорна оцінка приймалася рівною 1 для всіх методів зниження шуму. Початкові дані приведені в табл. Д.3, а результати моделювання на рис. 5.2.

На рис. 5.2. можна прослідкувати різницю у розподілі відносного внеску кожного методу зниження шуму в залежності від заданого необхідного зниження δL .

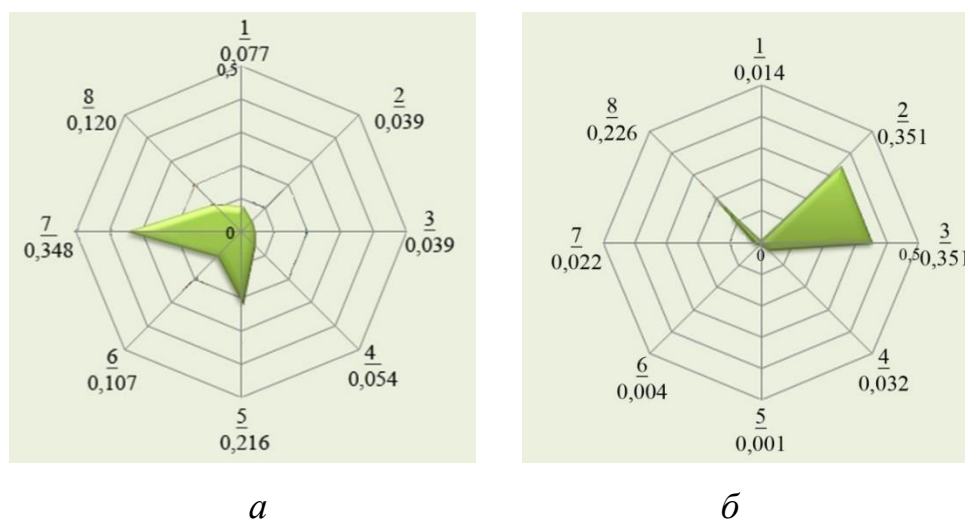


Рис. 5.2. Відносний внесок j -го методу зменшення шуму для випадку апробації математичної моделі, де в чисельнику приведений порядковий номер методу зниження шуму (табл. Д.3), а в знаменнику його відносний внесок: a – необхідне зниження шуму становило $\delta L = 17$ дБ, b – необхідне зниження шуму становило $\delta L = 8$ дБ

При $\delta L = 17$ дБ найбільші внески відповідаються таким методам, як встановлення акустичних екранів та звукоізоляція вікон, так як самі ці методи дають найбільше зниження шуму. На відміну від першого випадку, при $\delta L = 8$ дБ найбільші внески відповідають зменшенню інтенсивності транспортного потоку (від 4000 авт./год до 1000 авт./год.) та зниження швидкості транспортного потоку (на 10 км/год), так як використання таких методів дозволить досягти необхідного сумарного зниження шуму.

Саме тому при використанні запропонованої моделі важливим кроком є задання необхідного сумарного зниження шуму відповідно до поставлених задач. Цю характерну особливість була враховувана при подальшому моделюванні тестового випадку.

Початкові дані приведені в табл. Д.4. Результати моделювання показані на рис. 5.3.

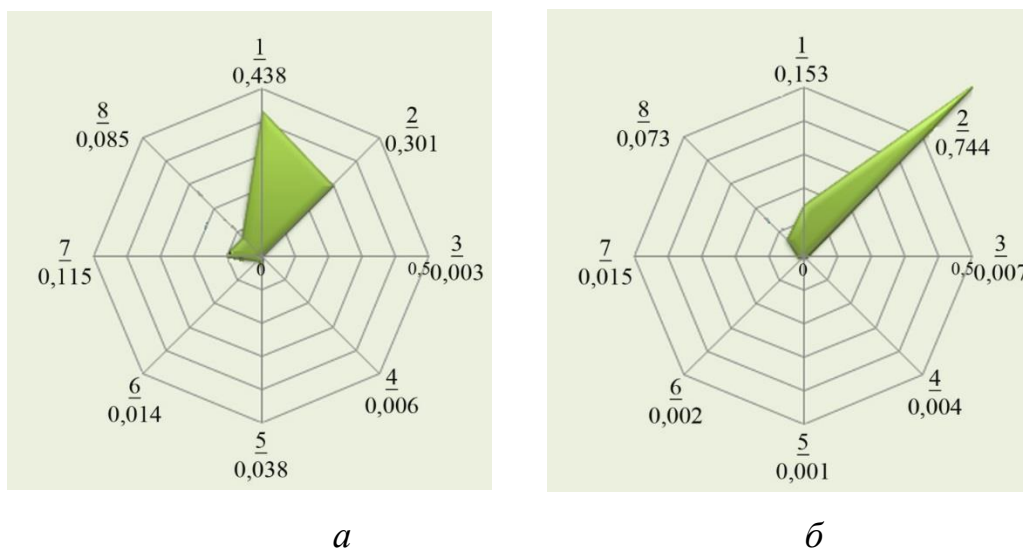


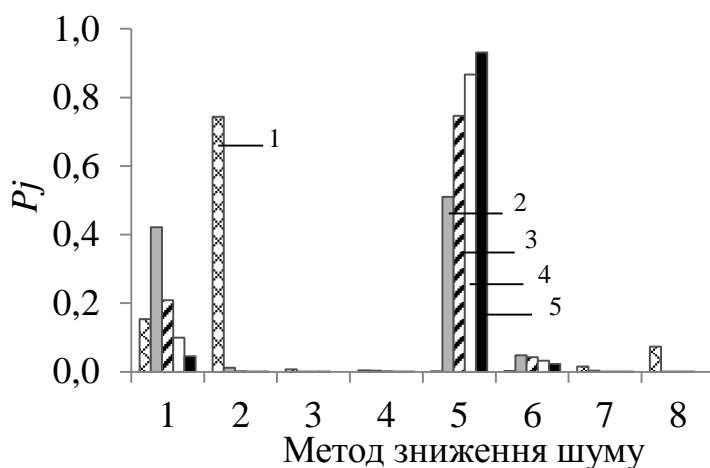
Рис. 5.3. Відносний внесок j -го методу зменшення шуму для досліджуваного випадку (табл. Д.4), де в чисельнику приведений порядковий номер методу зниження шуму (табл. Д.4), а в знаменнику його відносний внесок: a – необхідне зниження шуму становило $\delta L = 17$ дБ, b – необхідне зниження шуму становило $\delta L = 8$ дБ

Як і у випадку апробації, було проведено моделювання для зниження шуму 8 та 17 дБ. Для обох випадків найбільші внески характерні для таких методів як зменшення інтенсивності транспортного потоку та зниження швидкості транспортного потоку, а також використання активних вікон (рис.5.3). Це обумовлено встановленою апріорною оцінкою.

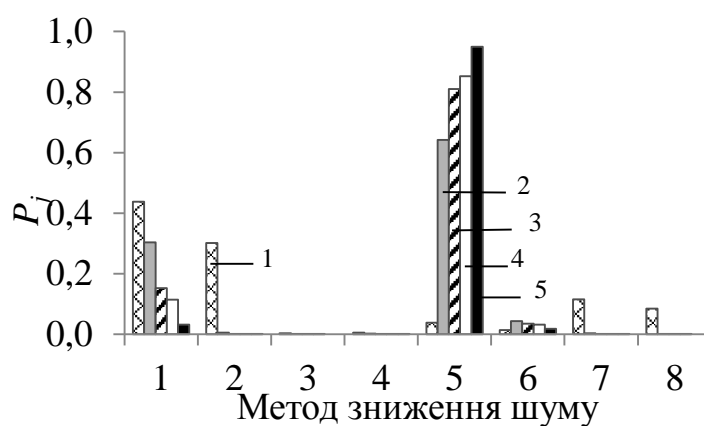
Відмінні результати були отримані для дослідження декількох положень приймача. Були проаналізовані два випадки розташування положень приймача: кількість положень приймача змінювалась від 1 до 5 з постійними значеннями δL та ΔL для кожного положення приймача; другий випадок містив дослідження для 3-ьох, 4-ьох та 5-ти положень приймача з різними значеннями зниження шуму. Початкові дані для другого випадку наведені в табл. Д.5. Припускалося, що приймачі розташовані на різних поверхах багатоповерхового будинку.

На рис. 5.4. приведені результати для першого досліджуваного випадку для різних значень δL . Чітко прослідковується, що для більш, ніж 1 положення приймача найбільший внесок належить 5-му методу зниження шуму – встановленню акустичних екранів – на відміну від випадку одного одиничного положення приймача (рис. 5.4), де найефективнішими методами було зниження інтенсивності траснопртного потоку, зниження швидкості потоку та встановлення активних вікон. Збільшення кількості положень приймачів підвищує відносний внесок одного методу зниження шуму та значення P_j наближається до 1.

Аналогічні результати найбільшого відносного внеску одного методу зниження шуму отримані для декількох положень приймача з різними значення зниження шуму (табл. Д.5) та показані на рис. 5.5. Так, якщо для трьох положень приймача були визначені два методи зниження шуму (1-ий та 5-ий методи відповідно), то для п'яти положень приймачів основний вклад належить 5-му методу – встановлення акустичних екранів.



a



б

Рис. 5.4. Відносний внесок j -го методу зниження шуму для досліджуваної кількості положень приймачів: 1 – одне положення, 2 – два положення, 3 – три положення, 4 – чотири положення, 5 – п'ять положень; a – необхідне задане зниження шуму $\delta L = 17$ dB, $б$ – необхідне задане зниження шуму $\delta L = 8$ dB

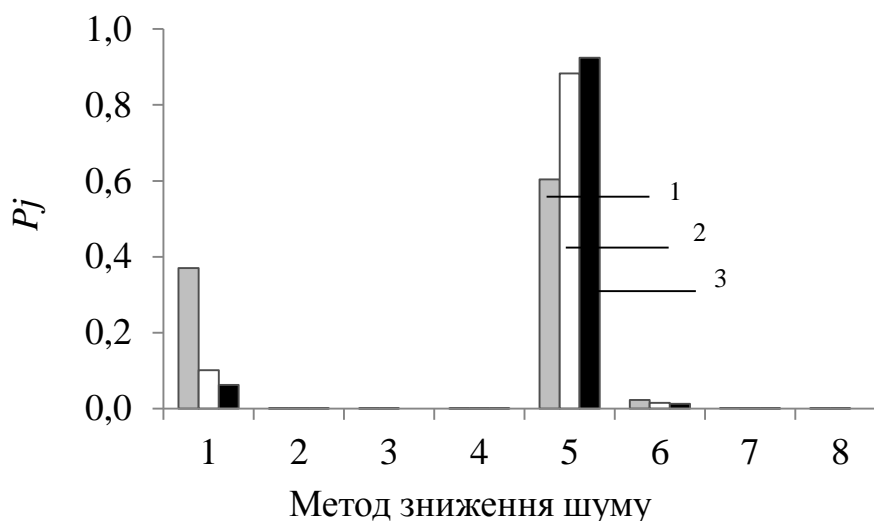


Рис. 5.5. Відносний внесок j -го методу зниження шуму (табл. 5.5) для досліджуваної кількості положень приймачів: 1– три положення, 2 – чотири положення, 3 – п'ять положень для заданого необхідного зниження шуму $\delta L = 8$ dB

5.2. Оцінювання ризику здоров'ю населення від впливу шуму автомобільного транспорту

Для розрахунків ризиків здоров'ю населення від впливу шуму автомобільного транспорту в роботі використано методикау МР 2.1.10.0059–12 [187]. Оцінювання ризиків проводилося для встановлених в розділі 4.2.2 типових рівнів шуму від транспортних потоків на території житлової забудови та всередині приміщень для денного періоду доби.

Розраховані ризики оцінювалися за допомогою коефіцієнтів приведенного ризику за критеріями [187], приведеними в табл. Д.6.

Так як, рівні ризику залежать від рівня шумового навантаження досліджуваної території та часового критерію, в роботі було проведено дослідження взаємного впливу рівня шуму автомобільного транспорту для діапазону еквівалентних рівнів шуму від 40–80 дБА на території житлової

забудови та 40–70 дБА всередині приміщення та віку населення 1–80 років, що перебуває в зоні впливу.

В дослідженнях впливу шуму автомобільного транспорту на нервову систему та порушення слухового апарату людини встановлено:

– при оцінюванні впливу шумового навантаження на території житлової забудови для фонового рівня шуму 55 дБА:

– для розвитку порушень нервової системи до 45 років у всьому діапазоні досліджуваних рівнів шуму спостерігається низький показник агрегованого ризику, для віку старше 45 років при рівнях шумового навантаження вищих, ніж 67 дБА показник ризику переходить у помірний з залежністю – зі збільшенням рівнів шумового навантаження рівень ризику порушень здоров'я зростає з віком;

– показник агрегованого ризику розвитку порушень різної тяжкості слухового апарату є низьким для віку до 70 років до 80 дБА та переходить у помірний для віку старше 70 років та рівнях шумового навантаження вищих 74 дБА;

– при оцінюванні впливу шумового навантаження всередині приміщень для фонового рівня шуму 40 дБА:

– показник агрегованого ризику розвитку порушень різної тяжкості слухового апарату є низьким у досліджуваному діапазоні шумового навантаження;

– показник агрегованого ризику розвитку порушень нервової системи є низьким у всьому досліджуваному діапазоні шумового навантаження до 43 років, та переходить у помірний за наступною залежністю – для віку 46 років при 70 дБА, для віку 50 років – 65 дБА, для віку 60, 70 та 80 років відповідно – 61, 58, 56 дБА.

Було встановлено, що основним є ризик розвитку захворювань серцево-судинної системи, що і вносить основний вклад в показник сукупного агрегованого ризику (рис. 5.6.).

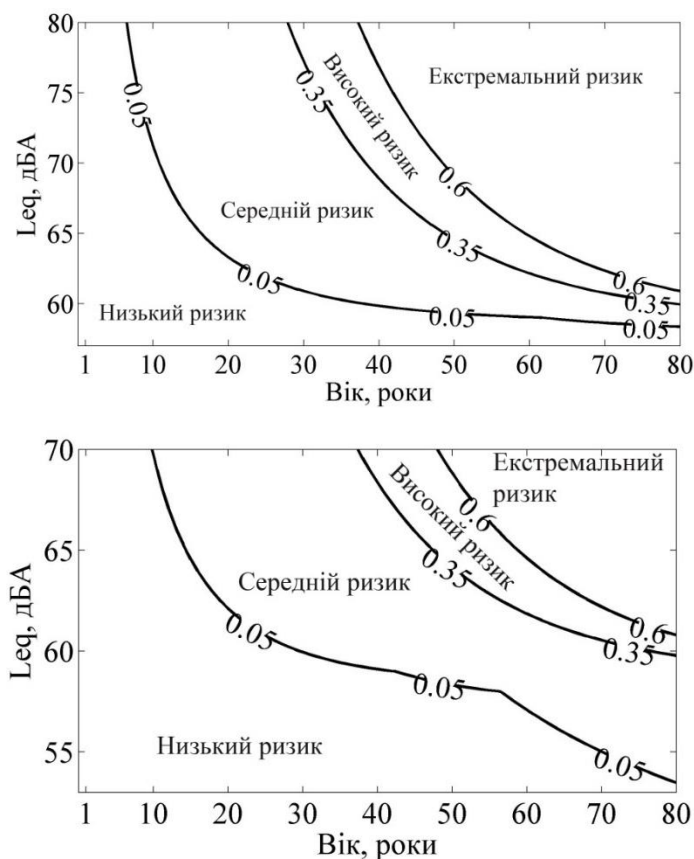


Рис. 5.6. Залежність коефіцієнту приведенного ризику від рівнів шуму автомобільного транспорту для фонового рівня шуму 55 дБА та 40 дБА та віку населення

Для оцінювання колективного ризику згідно методики було розраховано популяційний додатковий ризик захворювань на 1000 чоловік (рис 5.7). При досягненні еквівалентних рівнів шуму до 80 дБА ризик захворюваності зростає майже до 90 %.

Значення індивідуальних і популяційних ризиків відображають, головним чином, довгострокову тенденцію до зміни показників здоров'я, що формується за умови дотримання всіх прийнятих в розрахунках вихідних умов (наприклад, тривалість та інтенсивність впливу, незмінність експозиції в часі, конкретні значення факторів експозиції та ін.). Застосування отриманих результатів вимагає особливої обережності при їх інтерпретації в критеріях фактичної втрати здоров'я індивідуумом.

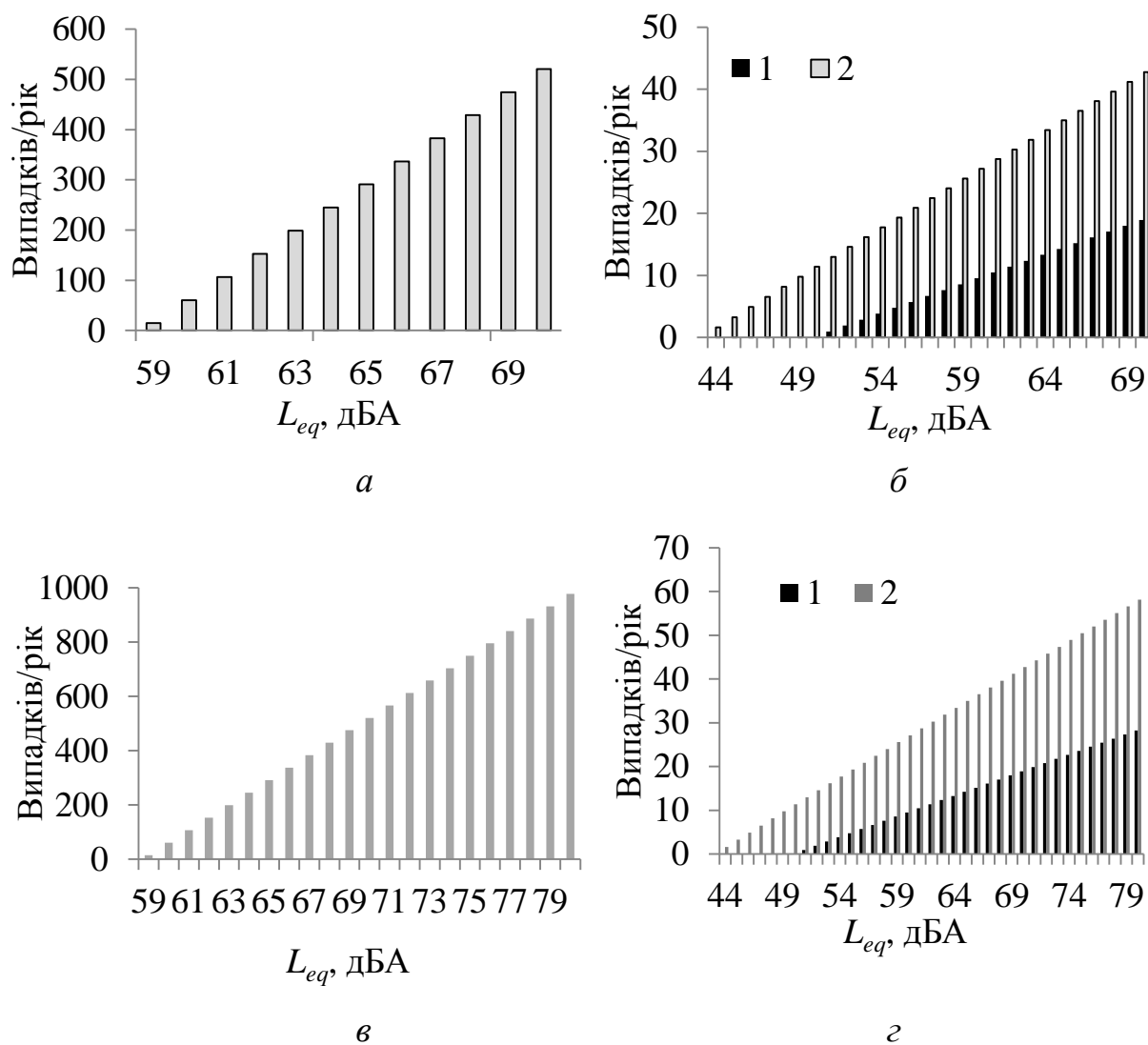


Рис 5.7. Залежність популяційного додаткового ризику захворювання на 1000 чол. від еквівалентного рівня шуму: *а, в* – серцево–судинної системи при оцінюванні всередині приміщень та на території житлової забудови відповідно; *б, г* – органів слуху (1) та нервової системи (2) при оцінюванні всередині приміщень та на території житлової забудови відповідно

Результати оцінки ризиків являють собою ефективний інструмент для порівняння шкідливого впливу шуму на різних територіях, в різні часові періоди, до і після проведення оздоровчих заходів для визначення їх ефективності і т.п.

На основі розроблених в роботі діаграм залежності між рівнями шумового навантаження, віком індивідуумів та ризиками виникнення

захворювань органів та систем органів було проведено оцінку зниження ризику при використанні досліджених методів зниження шуму.

Розроблену в роботі діаграму (рис 5.6) використано для оцінювання ефективності методів зниження шуму на території житлової забудови та всередині приміщень на прикладі Чоколівського бульвару (рис. 4.13 та табл. 5.3). Середнє значення для п'яти поверхів складає 75 дБА ззовні та 55 дБА всередині приміщень при нормативних допустимих значеннях 55 та 40 дБА відповідно. В табл. 5.7 показано, як змінюється значення коефіцієнта приведенного агрегованого ризику при зниженні рівнів шуму на 2,5, 7, 9 та 17 дБА для розташування приймача шуму на території житлової забудови біля ліній джерела шуму та на 1, 2, 3, 4, 6 та 7 дБА всередині приміщення.

Для фактичного показника еквівалентного рівня шуму значення приведенного агрегованого є помірним вже для віку 12–27 років, високим для віку до 40 років та екстремальним після 40 років. Використання методів зниження шуму дозволяє змістити екстремальний ризик до віку старше 50 років, високий старше 40 років. Зниження шуму на 9 дБА дозволить змістити границю екстремального ризику старше 55 років, а високого ризику старше 45 років. Необхідний низький показник ризику для всього вікового діапазону спостерігається при зниженні шуму на 17 дБ.

Дослідження впливу рівнів шуму всередині приміщення на ризик виникнення захворювань показали позитивні результати. Для фактичних значень рівнів шуму всередині приміщення при закритих вікнах помірні значення приведенного агрегованого коефіцієнту ризику спостерігаються лише для віку старше 70 років.

Таблиця 5.3

Вплив зниження шумового навантаження в результаті використання методів зниження шуму на значення приведеного агрегованого ризику

Вік, роки	На території житлової забудови						Всередині приміщення						
	L_{Aeq-s}	L_{Aeq-r} після використання методів зниження шуму					L_{Aeq-r}	L_{Aeq-r} після використання методів зниження шуму					
Вік, роки	75	73	70	68	66	58	55	54	53	52	51	49	48
2	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
7	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
12	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
17	П	П	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
22	П	П	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
27	П	П	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
32	В	П	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
37	В	В	П	П	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
42	Е	В	В	В	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
47	Е	Е	В	В	В	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
52	Е	Е	Е	В	В	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
57	Е	Е	Е	Е	Е	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
62	Е	Е	Е	Е	Е	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
67	Е	Е	Е	Е	Е	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
72	Е	Е	Е	Е	Е	Н	П	Н	Н	Н	Н	Н	Н
77	Е	Е	Е	Е	Е	Н	П	П	Н	Н	Н	Н	Н
82	Е	Е	Е	Е	Е	Н	П	П	Н	Н	Н	Н	Н

Таким чином, дослідження встановили, що при оцінюванні впливу шумового навантаження на здоров'я міського населення слід приділяти основну увагу формуванню звукових полів на території житлової забудови. Використання запропонованих методів зниження шуму дозволить досягти нормативних рівнів шумового навантаження, як ззовні так і всередині приміщень.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 5

1. Сформульована та розв'язана задача ранжування методів зниження транспортного шуму на території житлової забудови та всередині приміщень з врахуванням як екологічної так і економічної ефективності досліджуваних методів зниження шуму.

2. Для розробки математичної моделі спільної оцінки зниження шуму на території житлової забудови та всередині приміщень була розроблена емпірична модель ефективного часу звучання на основі проведених експериментальних досліджень. База даних вимірювань дозволила розробити емпіричні моделі ефективного часу звучання для легкових автомобілів та важких транспортних засобів.

3. На основі розробленої моделі ранжування методів зниження шуму було проведено дослідження відносного внеску j -го методу зменшення шуму при заданому необхідному зниженні шуму. Дана модель дозволяє обирати найефективніші з екологічної та економічної точок зору методи зниження шуму за рахунок використання апріорної оцінки ефективності кожного методу, проте вона обирає методи в границях заданого необхідного значення.

4. Проаналізовано індивідуальний та колективний ризик виникнення захворювань населення в залежності від рівня шумового навантаження та віку. Встановлено, що основним є ризик виникнення серцево-судинних захворювань.

ВИСНОВКИ

1. Набула подальшого розвитку математична модель шуму транспортних потоків шляхом врахування принципів макроскопічного моделювання руху автомобілів в потоці. Обґрунтовано застосування запропонованої моделі для $v \geq 40$ км/год. для автомобілів різних типів; для транспортних потоків з інтенсивністю більше 1000 авт./год. з $E_{abs} = 2,5$ дБА та з інтенсивністю більше 4000 авт./год. – $E_{abs} < 1,5$ дБА. Розроблена модель дозволила проводити моделювання руху автомобілів в потоці та відповідно рівнів шуму при наближенні до світлофору та в умовах формування заторів на автомобільних шляхах.

2. В дисертаційній роботі проведено дослідження ефектів зниження шуму при його поширенні – ефектів дивергенції звуку, поглинання в повітрі, зниження шуму зеленими насадженнями, інтерференції звукових хвиль при відбиванні від поверхонь, ефектів дифракції на кромках акустичних перешкод. Удосконалено математичну модель впливу додаткових відбиттів від фасаду будівлі шляхом внесення коефіцієнту відбиття для сферичних звукових хвиль, що дозволило досліджувати різні за імпедансними характеристиками поверхні землі та фасаду будівлі. Проведені експериментальні та чисельні дослідження підтвердили достовірність розробленої математичної моделі в діапазоні частот 63–250 Гц з похибкою моделювання 1 дБ та похибкою моделювання 3–4 дБ для діапазону частот 315–1000 Гц. Моделювання за допомогою удосконаленої математичної моделі впливу додаткових відбиттів дозволило дослідити вплив параметрів вулиць на формування звукових полів та встановити, що максимальне підвищення рівнів шуму спостерігається для $W_{str} < 50$ м та $H_{str} > 20$ м та може досягати 5...10 дБ для верхніх поверхів. Параметричні дослідження імпедансних характеристик фасадів будівлі та дорожніх покриттів показали, що використання покриття фасадів будівель матеріалами зі

звукопоглинаючими властивостями при асфальтових дорожніх покриттях дозволить знизити рівні шуму для частот 250 – 8000 Гц на 2...5 дБ.

3. Вдосконалено математичні моделі оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану та акустичних екранів кінцевих розмірів. Достовірність моделей підтверджена для всього діапазону частот з $E_{abs} = 2...3$ дБ для ТАЕ та уточнено моделювання ефективності акустичних екранів кінцевих розмірів в діапазоні частот 25...250 Гц з $E_{abs} = 1,5...2$ дБ. Удосконалені моделі дозволили проводити моделювання шумового навантаження зниження шуму в умовах щільної забудови.

4. Обґрунтовано комплексну модель оцінювання рівнів шуму в міському середовищі та реалізовано у вигляді програмного продукту USScape1.0. Удосконалений метод картографування дозволив підвищити точність картографування на 1,5 дБ для горизонтальних карт шуму в порівнянні з існуючими методами. Комплексна модель дозволила вперше створювати вертикальні карти шуму з врахуванням характеру шумового навантаження в умовах високоповерхової для кожного поверху.

5. За допомогою розробленої комплексної моделі проведені дослідження трьохмірного картографування шуму для високоповерхових будівель міста. Створення вертикальних перерізів трьохмірного картографування шуму в м. Києві для різних типів житлової забудови дозволило виявити характерні ефекти формування звукових полів перед фасадами будівель для всіх поверхів. Розроблена модель дозволяє на стадії проектування міста розрахунковими методами оцінити на скільки та в якому місці будівлі можливо зменшити рівні шуму до нормативних з використанням існуючих методів його зниження, а також при проектуванні будівлі в уже існуючій зоні житлової забудови.

6. Запропоновано метод ранжування для вибору найоптимальніших методів зниження транспортного шуму на території житлової забудови та всередині приміщень з врахуванням забезпечення екологічної безпеки та вимог економічної ефективності обраних методів зниження шуму на основі

ентропійного методу моделювання. Розроблений метод дозволяє оцінити ефективність розроблених рекомендацій для необхідної кількості положень приймачів. З метою оцінювання підвищення рівня екологічної безпеки при використанні методів зниження шуму проведено дослідження ризиків здоров'ю населення від впливу шуму автомобільного транспорту.

7. Проаналізовано індивідуальний та колективний ризик виникнення захворювань населення в залежності від рівня шумового навантаження та віку. Для індивідуального ризику встановлено, що основним є ризик розвитку захворювань серцево-судинної системи. Для колективного ризику при досягненні еквівалентних рівнів шуму до 80 дБА ризик захворюваності зростає майже до 90 %. Оцінено вплив використання методів зниження шуму на ризик виникнення захворювання. Зниження шуму на 5 дБА дозволяє зменшити екстремальний ризик до віку старше 50 років, високий старше 40 років.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Майер В. В. Градостроительные меры борьбы с шумом / В.В. Майер. – М.: Стройиздат, 1975. – 215 с.
2. Самойлюк Е. П. Борьба с шумом в градостроительстве / Е. П. Самойлюк. – К.: Будівельник, 1975. – с. 128.
3. Kang J. Urban Sound Environment / Jian Kang. – London: Taylor & Francis, 2006. – 304 p.
4. Kihlman T. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions/ Tor Kihlman, Wolfgang Kropp, and William Lang. – Göteborg: Reproservice, Chalmers University of Technology, 2014. – 28 p. Web: <http://www.ta.chalmers.se/>
5. Kihlman T. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions. Source book/ Tor Kihlman, Wolfgang Kropp, and William Lang. – Göteborg: Reproservice, Chalmers University of Technology, 2014. – 28 p. Web: <http://www.ta.chalmers.se/>
6. Jakovljevic B. Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population / Branko Jakovljevic, Katarina Paunovic, Goran Belojevic// Environment International. – Vol. 35. – 2009. – P. 552–556.
7. Jabben J. Annoyance of traffic events with high Lmax levels / Jan Jabben// Environment International. – Internoise. – 2009. – 6 p.
8. Zannin P. A survey of urban noise annoyance in a large Brazilian city: the importance of a subjective analysis in conjunction with an objective analysis/ Paulo H.T. Zannin, Alfredo Calixto, Fabiano B. Diniz, Jose A.C. Ferreira// Environmental Impact Assessment Review. – Vol. 23. – 2003. – P. 245–255.
9. Griefahn B. Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep/ Barbara Griefahn, Anke Marks, Sibylle Robens// Journal of Sound and Vibration. – Vol. 295. – 2006. – P. 129–140.

10. *Ohrstrom E.* Sleep disturbances from road traffic and ventilation noise—laboratory and field experiments/ E. Ohrstrom, A. Skanberg// *Journal of Sound and Vibration.* – Vol. 271. – 2004. – P. 279–296.
11. *Skanberg A.* Road traffic noise-induced sleep disturbances: a comparison between laboratory and field settings/ Annbritt Skanberg// *Journal of Sound and Vibration.* – Vol. 277. – 2004. – P. 465–467.
12. *Belojevic G.* Urban road-traffic noise and blood pressure and heart rate in preschool children/ Goran Belojevic, Branko Jakovljevic, Vesna Stojanov, Katarina Paunovic, Jelena Ilic// *Environment International.* – Vol. 34. – 2008. – P. 226–231.
13. *Van Kempen E.* The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis / E. Van Kempen, W. Babisch// *J Hypertens.* – Vol. 30(6). – 2012. – p. 1075–86. DOI: 10.1097/HJH.0b013e328352ac54
14. *Babisch W.* Road traffic noise and cardiovascular risk/ W. Babisch // *Noise Health.* – Vol. 10. – 2008. – P. 27–33.
15. *Babisch W.* Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis/ W. Babisch // *Noise Health.* – Vol. 16(68). – 2014. – P. 1–9.
16. *Sørensen M.* Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study/ Sørensen M, Hvidberg M, Andersen ZJ, Nordsborg RB, Lillelund KG, Jakobsen J, et al.// *Eur Heart J.* – Vol. 32. – 2011. – P. 737–744.
17. *Sørensen M.* Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study/ Mette Sørensen, Zorana J. Andersen, Rikke B. Nordsborg, Thomas Becker, Anne Tjønneland, Kim Overvad, Ole Raaschou-Nielsen// *Environ Health Perspect.* – Vol. 121. – 2012. – P. 217–222.
18. *Mutasem El-F.* Parametric sensitivity analysis of noise impact of multihighways in urban areas / Mutasem El-Fadel, Shady Shazbak, M. Hadi Baaj, Elie Saliby // *Environmental Impact Assessment Review.* – Vol. 22. – 2002. – P. 145–162.
19. *Can A.* Parametric sensitivity analysis of noise impact of multihighways in urban areas / Arnaud Can, Ludovic Leclercq, Joël Lelong, Jérôme Defrance // *Applied Acoustics.* – Vol. 70. – 2009. – P. 821–829.

20. *Cho D.* Highway traffic noise prediction using method fully compliant with ISO 9613: comparison with measurements / Dae Seung Cho, Jin Hyeong Kim, Tae Muk Choi, Byung Hee Kim, Douglas Manvell // *Applied Acoustics*. – Vol. 65. – 2004. – P. 883–892.
21. *Gajaa E.* Sampling techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions/ E. Gajaa, A. Gimenezb, S. Sanchoa, A. Reiga// *Applied Acoustics*. – Vol. 64. – 2003. – P. 43–53.
22. *Li B.* Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing/ Bengang Li, Shu Tao, R.W. Dawson// *Applied Acoustics*. – Vol. 63. – 2002. – P. 1137–1142.
23. *Neuhofer R.* Problems of urban and regional planning with reference to the environmental factor noise and results from studies conducted in the industrial region around Halle/ R. Neuhofer// *Urban Ecology*. – Vol. 4. – 1980. – P. 287–316.
24. *Potter R.* A study of urban motorway noise/ R. C. Potter, B. C. Ross// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 41(1). – 1975. – P. 63–72.
25. *Botteldooren D.* Conclusions from 13 years of repeated traffic noise exposure measurements in Flanders-Belgium/Dick Botteldooren, Timothy Van Renterghem//*Internoise–2011*, Osaka, Japan, September, 4–7, 6 p.
26. *Schreurs E.* Maximum pass-by noise levels from vehicles in real road traffic streams: comparison to modeled levels and measurement protocol issues/ Eric Schreurs, Lex Brown, Deanna Tomerini// *Inter–noise*. – Osaka, Japan, September 4–7 2011. – p. 6.
27. *Houzu H.* Development of sound source localization system to detect noisy vehicles from traffic flow// Hiroyuki Houzu, Ichiro Sakamoto, Takeharu Tanaka, Takayuki Murakami, Masao Ishihama and Katsumi Sawatari// *Internoise 8* p.
28. *Watts G.* Identifying the characteristics of noisy vehicles at the roadside/ Greg Watts// *internoise 9* p.
29. *T. Bravo* Maximum Noise Levels produced by light vehicles in relation with the radiated sound field/Teresa Bravo, David Ibarra, Pedro Cobo// *internoise 6* p.

30. *Can A.* Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence / Arnaud Can, Ludovic Leclercq, Joël Lelong, Jérôme Defrance // *Applied Acoustics*. – Vol. 70. – 2009. – P. 821–829.
31. Поспелов П.И. Борьба с шумом на автомобильных дорогах. – М.:Транспорт, 1981. – 88 с.
32. Прутков Б. Г. (ред.). Борьба с шумом в городах. – М: Стройиздат, 1987. – 244 с.
33. Защита городов от транспортного шума / А.А. Факторович, Г.И. Постников. к. : Будівельник, 1982. 144 с.
34. *Stephenson R.* Traffic noise/ R. J. Stephenson, G. H. Vulkan// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 7(2) . – 1968. – P. 247–262.
35. *Jones R.* Techniques for the investigation of road traffic noise in regions of restricted flow by the use of digital computer simulation methods /R. R. K. Jones, D. C. Hothersall, R. J. Salter // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 75(3) . – 1981. – P. 307–322.
36. *Lewis P. T.* The noise generated by single vehicles in freely flowing traffic/ P. T. Lewis// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 30 (2) . – 1973. – P. 191–206.
37. Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Harmonoise WP 3, Technical Report HAR32TR–040922–DGMR20, written by Renez Nota, Robert Barelds, Dirk van Maercke, agreed by Hans van Leeuwen, 2005.
38. B. Peeters and G. v. Blokland, “The Noise Emission model for European Road Traffic.” Deliverable 11 of the IMAGINE project. www.imagine-project.org (2007). Retrieved in 2011.
39. B. Plovsing and J. Kragh, “Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction,” DELTA Acoustics & Vibration, Report AV 1849/00 (revised), Hørsholm. (2006).
40. *Jonasson H.* Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Road Traffic Noise/ Hans G. Jonasson, Svein Storeheier// SP Rapport 2001:10, Acoustics, Borås 2001. – 59 p.

41. *Banerjee D.* Modeling of road traffic noise in the industrial town of Asansol, India/ D. Banerjee, S.K. Chakraborty, S. Bhattacharyya, A. Gangopadhyay// *Transportation Research Part D.* – Vol. 13. – 2008. – P. 539–541.
42. *Васильев А.В.* Моделирование, расчет и мониторинг шума транспортных потоков/ А.В. Васильев, Д.П. Шевченко// *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – Том 6(2). – 2004. – С. 399–407.
43. *Васильев А. В.* Снижение шума транспортных потоков в условиях современного города / Экологическая безопасность / А. В. Васильев // *Экология и промышленность России ЭЖиП : Общественный научно-технический журнал .* – 2004 . – № 6 . – С. 37–41.
44. *Lewis P. T.* Noise levels in the vicinity of traffic roundabouts/ P. T. Lewis, A. James// *Journal of Sound and Vibration.* – Vol. 71 (2). – 1980. – P. 51–69.
45. *Tansatcha M.* Motorway noise modelling based on perpendicular propagation analysis of traffic noise/ M. Tansatcha, P. Pamanikabud, A.L. Brown, J.K. Affum// *Applied Acoustics.* – Vol. 66. – 2005. – P. 1135–1150.
46. *Николов Н.* Градоустройствена акустика/ Н.Д. Николов. – София: Университетско издателство "Св. Климент Охридски", 2006. – 236 с.
47. *Санник А.О.* Комплексная оценка влияния динамических характеристик автотранспортного потока на уровень загрязнения окружающей среды города/ Санник А.О., Егоров А.Л., Черняков Е.Н., Чернякова О.О.// *Современные проблемы науки и образования.* – 2013. – № 5. – 6 с. URL: www.science-education.ru/111-10173
48. *Дідковський В.С.* Основи акустичної екології / В.С. Дідковський, В.Я. Акименко, О.І. Запоржець та ін.. – Кіровоград: Імпекс ЛТД, 2001. –520 с.
49. *Salomons E. M.* Efficient numerical modeling of traffic noise/ E. M. Salomons, Han Zhou, J. A. Walter// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 127 (2). – 2010. – P. 796–803.
50. *Quartieri J.* A review of traffic noise predictive models/ J. Quartieri, N. E. Mastorakis, G. Iannone, C. Guarnaccia, S. D'Ambrosio, A. Troisi, TLL Lenza// *Recent*

advances in applied and theoretical mechanics. – Vol. – 2009. – P. 72–80. ISBN: 978–960–474–140–3. ISSN: 1790–2769.

51. *Guarnaccia C.* Advanced Tools for Traffic Noise Modelling and Prediction/ Claudio Guarnaccia// WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS. – Vol. 12(2). – 2013. – P. 121–130.

52. Austroads research report AP–R277/05. Modelling, Measuring and Mitigating Road Traffic Noise. – Sydney: Austroads Incorporated, 2005. – 94 p.

53. *Abo–Qudais Saad.* Statistical models for traffic noise at signalized intersections / Saad Abo-Qudais, Arwa Alhiary // Building and Environment. – Vol. 42. – 2007. – P. 2939–2948.

54. *Chevallier E.* Dynamic noise modeling at roundabouts / E. Chevallier, L. Leclercq, J. Lelong, R. Chatagnon// Applied Acoustics. – Vol. 70. – 2009. – P. 761–770.

55. *Chevallier E.* Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics/ E. Chevallier, A. Can, M. Nadji, L. Leclercq// Transportation Research Part D. – Vol. 14. – 2009. – P. 100–110.

56. *Andersen P. K.* Regularity of traffic noise signals/ P. K. Andersen// Journal of Sound and Vibration. – Vol. 80(2). – 1982. – P. 267–274.

57. *Guarnaccia C.* Acoustical Noise Analysis in Road Intersections: a Case Study / Claudio Guarnaccia // RECENT ADVANCES in ACOUSTICS & MUSIC. – Vol. 42. – 2007. – P. 208–215.

58. *Can A.* Dynamic estimation of urban traffic noise: Influence of traffic and noise source representations / A. Can, L. Leclercq, J. Lelong // Applied Acoustics. – Vol. 69. – 2008. – P. 858–867.

59. *Can A.* Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. experimental observations / A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, D. Botteldooren // Applied Acoustics. – Vol. 71. – 2010. – P. 764–770.

60. *Can A.* Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence / A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, J. Defrance// Applied Acoustics. – Vol. 70. – 2009. – P. 821–829.

61. *Jacobs L. J. M.* A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light conditions/ L. J. M. Jacobs, L. Nijs, J. J. Van Willigenburg // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 72(4). – 1980. – P. 523–537.
62. *Givargis Sh.* Converting the UK calculation of road traffic noise (CORTN) to a model capable of calculating $L_{Aeq,1h}$ for the Tehran's roads / *Sh. Givargis, M. Mahmoodi* // *Applied Acoustics*. – Vol. 69. – 2008. – P. 1108–1113.
63. *Givargis Sh.* A basic neural traffic noise prediction model for Tehran's roads / *Sh. Givargis, H. Karimi* // *Journal of Environmental Management*. – Vol. 91. – 2010. – P. 2529-2534.
64. *Calixto A.* The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting / *Alfredo Calixto, Fabiano B. Diniz, Paulo H.T. Zannin* // *Cities*. – Vol. 20, No. 1. – 2003. – P. 23–29.
65. *De Coensel B.* The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes/ *Bert De Coensel, Tom De Muer, Isaak Yperman, Dick Botteldooren* *Applied Acoustics*. – Vol. 66. – 2005. – P. 175–194.
66. *Geist R.* Correlational and distributional effects in network traffic models/ *Robert M. Geist, James M. Westall* // *Performance Evaluation*. – Vol. 44. – 2001. – P. 121–138.
67. *Lamure C.* The twelfth Sir Richard fairey memorial lecture: the annoyance due to road traffic noise, the mathematical modelling of such noise and the sound proofing of road vehicles/ *C. Lamure* // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 79 (3). – 1981. – P. 351–386.
68. *Maruyama M.* Estimation of LAeq based on a dynamic model for road traffic noise/ *M. Maruyama, K. Kuno, T. Sone* // *Internoise* – 6 p.
69. *Ahmed Abdel-Rahim.* *Intelligent Transportation Systems* // *Ahmed Abdel-Rahim*. – Rijeka: InTech, 2012. – 214 p.
70. *Serge P. Hoogendoorn.* State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling // *Journal of Systems and Control Engineering*. – 46 p. – <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9913&rep=rep1&type=pdf>

71. *Delany M. E.* The prediction of noise levels L_{10} due to road traffic / M. E. Delany, D. G. Harland, R. A. Hood, W. E. Scholes // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 48(3). – 1976. – P. 305–325.
72. *Delany M. E.* A scale model technique for investigating traffic noise propagation / M. E. Delany, A. J. Rennie, K. M. Colins // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 56(3). – 1978. – P. 325–340.
73. *Cho D.* Development of a highway traffic noise prediction model that considers various road surface types / Dae Seung Cho, Sungho Mun // *Applied Acoustics*. – Vol. 69. – 2008. – P. 1120–1128.
74. *Cho D.S.* Highway traffic noise prediction using method fully compliant with ISO 9613: comparison with measurements / Dae Seung Cho, Jin Hyeong Kim, Tae Muk Choi, Byung Hee Kim, Douglas Manvell // *Applied Acoustics*. – Vol. 65. – 2004. – P. 883–892.
75. *Kagawa Y.* Finite element simulation of non-linear sound wave propagation / Y. Kagawa and T. Tsuchiya // *Journal of Sound and Vibration*. – 154(1) . – 1992. – P. 125–145.
76. *Wilson D. K.* Time-domain calculations of sound interactions with outdoor ground surfaces / D. Keith Wilson, Vladimir E. Ostashev, Sandra L. Collier, Neill P. Symons, David F. Aldridge, David H. Marlin // *Applied Acoustics*. – 68. – 2007. – P. 173–200.
77. *Dokumaci E.* A study of the failure of numerical solutions in boundary element analysis of acoustic radiation problems / E. Dokumaci // *Journal of Sound and Vibration*. – 139(1). – 1990. – P. 83–97.
78. *Quiros y Alpera S.* A BEM approach to validate a model for predicting sound propagation over non-flat terrain / Susana Quiros y Alpera, Finn Jacobsen, Peter Møller Juhl, Vicente Cutanda Henriquez // *Applied Acoustics*. – Vol. 64. – 2003. – P. 781–791.
79. *Rizos D. C.* An advanced direct time domain BEM for 3-D wave propagation in acoustic media / D.C. Rizos, S. Zhou // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 293. – 2006. – P. 196–212.

80. *Habault D.* Sound propagation above an inhomogeneous plane: boundary integral equation methods / D. Habault // *Journal of Sound and Vibration*. – 100(1) . – 1985. – P. 55–67.
81. *Li W.L.* A Half-Space Boundary Element Method for Acoustic Problems With a Reflecting Plane of Arbitrary Impedance / W.L. Li, T.W. Wu, A.F. Seybert // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 171(2). – 1994. – P. 173–184.
82. *Marburg S.* Six boundary elements per wavelength: is that enough? / Steffen Marburg // *Journal of Computational Acoustics*. – Vol. 10(1). – 2002. – P. 25–51.
83. *Marburg S.* Influence of element types on numeric error for acoustic boundary elements / Steffen Marburg, Stefan Schneider // *Journal of Computational Acoustics*. – Vol. 11(3). – 2003. – P. 363–386.
84. *Marburg S.* *Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods* / Steffen Marburg, Bodo Nolte – Springer; Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2008 edition. – 578 c.
85. *Sack R. A.* The Lagrange Pad6 Parabolic Equation (LP-PE) for the Prediction of Long Range Sound Propagation in the Atmosphere / R. A. Sack & M. West // *Applied Acoustics*. – Vol. 49, No. 2. – 1996. – P. 105–125.
86. *Richards T. L.* Accurate FFT-based Hankel transforms for predictions of outdoor sound propagation / T. L. Richards and K. Attenborough// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 109(1) . – 1986. – P. 157–167.
87. *Barrera Roll L.* A forward-advancing wave expansion method for numerical solution of large-scale sound propagation problems / L. Barrera Roll, H.J. Rice // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 296. – 2006. – P. 406–415.
88. *Van Renterghem T.* Prediction-step staggered-in-time FDTD: An efficient numerical scheme to solve the linearised equations of fluid dynamics in outdoor sound propagation /T. Van Renterghem, D. Botteldooren // *Applied Acoustics*. – Vol. 68. – 2007. – P. 201–216.
89. *Bohlender D.A.* A pulsed harmonic technique for the study of sound propagation in the atmosphere / D. A. Bohlender, F. Babott, P. J. Irwin and T. Mathews // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 105(2). – 1986. – P. 283–290.

90. *Wilson D. K.* Outdoor sound propagation: recent modeling developments and applications to noise control / D. Keith Wilson // Inter-noise 2011 Osaka Japan 4–7 September
91. Международные стандарты и рекомендуемая практика «Охрана окружающей среды». Приложение 16 к Конвенции о международной ГА, том 1, «Авиационный шум».
92. *Chien C. F.* Sound propagation along an impedance plane / C. F. Chien and W. W. Soroka // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 43. – 1975. – P. 9–20.
93. *Chien C. F.* A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface / C. F. Chien and W. W. Soroka // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 69(2). – 1980. – P. 340–343.
94. *Chandler-Wilde S. N.* Sound propagation above an inhomogeneous impedance plane / S. N. Chandler-Wilde, D. C. Hothersall // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 98(4). – 1985. – P. 415–491.
95. *Rathe E. J.* Note on two common problems of sound propagation / E. J. Rathe // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 10 (3). – 1969. – P. 472–479.
96. *Ingard U.* On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane / Uno Ingard // Journal of the Acoustical Society of America. – Vol. 23 (3). – 1951. – P. 329–335.
97. *Attenborough K.* Predicted ground effect for highway noise / K. Attenborough // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 81(3). – 1982. – P. 413–424.
98. *Attenborough K.* Acoustical impedance models for outdoor ground surface / K. Attenborough // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 99(4). – 1985. – P. 521–544.
99. *Delany M. E.* Monopole radiation in the presence of an absorbing plane / M. E. Delany, E. N. Bazley // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 13 (3). – 1970. – P. 269–279.
100. *Harriott J. N. B.* Long-distance sound propagation over an impedance discontinuity / J. N. B. Harriott, S. N. Chandler-Wilde, D. C. Hothersall // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 148(3). – 1991. – P. 365–380.

101. *Jonasson H. G.* Sound reduction by barriers on the ground / H. G. Jonasson // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 22 (1). – 1972. – P. 113–126.
102. *Kawai T.* Sound propagation above an impedance boundary / T. Kawai, T. Hidaka, T. Nakajima // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 83(1). – 1982. – P. 125–138.
103. *Moore C. J.* A solution to the problem of measuring the sound field of a source in the presence of a ground surface / C. J. Moore // *J. Sound Vib.* – Vol. 16 (2). – 1971. – P. 269–282.
104. *Rasmussen K. B.* Sound propagation over ground under the influence of a sound speed profile in the atmosphere / K. B. Rasmussen // *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 139(1). – 1990. – P. 71–81.
105. *Xie Z. N.* Mean interference effects among tall buildings / Z.N. Xie M. Gu // *Engineering Structures*. – Vol. 26. – 2004. – P.1173–1183.
106. *Xie Z. N.* Simplified formulas for evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings / Z.N. Xie, M. Gu // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – Vol. 95. – 2007. – P. 31–52.
107. *Andersen L.* Impedance of surface footings on layered ground / L. Andersen, J. Clausen // *Computers and Structures*. – Vol. 86. – 2008. – P. 72–87.
108. *Buret M.* Optimisation of ground attenuation for moving sound sources / M. Buret, K.M. Li, K. Attenborough // *Applied Acoustics*. – Vol. 67. – 2006. – P. 135–156.
109. *Thorsson Pontus J.* Combined effects of admittance optimization on both barrier and ground / Pontus J. Thorsson // *Applied Acoustics*. – Vol. 64. – 2003. – P. 693–711.
110. *Dickinson P. J.* Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces / P. J. Dickinson // *J. Sound Vib.* – Vol. 13 (3). – 1970. – P. 309–322.
111. *Hashemineja M.* Diffraction of sound by a poroelastic cylindrical absorber near an impedance plane Seyyed / M. Hashemineja, M.A. Alibakhshi // *International Journal of Mechanical Sciences*. – Vol. 49. – 2007. – P. 1–12.

112. *Hess H.M.* Ground characterization by short-ranger propagation measurements / H.M. Hess, K. Attenborough, N.W. Heap // *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 85(4). – 1990. – P. 1975–1986.
113. *Kruse R.* Effect and minimization of errors in in situ ground impedance measurements / Roland Kruse, Volker Mellert // *Applied Acoustics.* – Vol. 69. – 2008. – P. 884–890.
114. *Nogamia T.* Simple formulations of ground impedance functions for rigid surface foundations / T. Nogamia, K. Konagaib, A. Mikami // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* – Vol. 21. – 2001. – P. 475–484.
115. *David W.* A Pulsed Level Difference Technique for Ground Characterization / David W. Craig & James M. Sabatier // *Applied Acoustics.* – Vol. 44. – 1995. – P. 1–6.
116. *Soh Jin H.* A direct method for measuring acoustic ground impedance in long-range propagation experiments / Jin H. Soh, Kenneth E. Gilbert, Wm. Garth Frazier, Carrick L. Talmadge, and Roger Waxler // *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 128(5). – 2010. – Published Online:
http://asadl.org/jasa/resource/1/jasman/v128/i5/pEL286_s1?bypassSSO=1
117. *Memoli G.* Testing the acoustical corrections for reflections on a facade/ G. Memoli, M. Paviotti, S. Kephelopoulos, G. Licitra// *Applied Acoustics.* – Vol. 69. – 2008. – P. 479–495.
118. *Wetzela E.* Modelling the propagation pathway of street-traffic noise: practical comparison of German guidelines and real-world measurements/ E. Wetzela, J. Nicolas, Ph. Andreb, J.J. Boreuxb// *Applied Acoustics.* – Vol. 57. – 1999. – P. 97–107.
119. *Picaud J.* A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas/ J. Picaud, L. Simon// *Applied Acoustics.* – Vol. 62. – 2001. – P. 327–340.
120. *Picaud J.* Experimental study of sound propagation in a street/ J. Picaud, T. Le Polles, P. L’Hermite, V. Gary// *Applied Acoustics.* – Vol. 66. – 2005. – P. 149–173.
121. *Itiki T* An investigation on sound propagation in a street canyon/ Tomoyuki Itiki, Akinori Fukushima// *Internoise* 6 p.

122. *Kirkpatrick A.* Sound propagation in the vicinity of an isolated building: An experimental investigation/ W. C. Kirkpatrick Alberts II, John M. Noble, and Mark A. Coleman// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 124 (2). – 2008. – P. 733–742.
123. *Okada Y.* A simple noise calculation model in city street canyons based on a diffusion method/ Yasuaki Okada, Koichi Yoshihisa, Teruo Iwase, Kazuhiro Kuno4// *Internoise* 8 p.
124. *Hopkins C.* Sound fields near building facades – comparison of finite and semi-infinite reflectors on a rigid ground plane/ C. Hopkins, Y. Lam // *Applied Acoustics.* – Vol. 70. – 2009. – P. 300–308.
125. *Picaud J.* Sound field modeling in streets with a diffusion equation/ J. Picaud, L. Simon, J. Hardy// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 106(5). – 1999. – P. 2638–2645.
126. *Picaud J.* Numerical modeling of urban sound fields by a diffusion process/ J. Picaud // *Applied Acoustics.* – Vol. 63. – 2002. – P. 965–991.
127. *Kang J.* Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries/ J. Kang// *Journal of Sound and Vibration.* – Vol. 258(2). – 2002. – P. 793–813.
128. *Kang J.* Numerical modeling of the sound fields in urban squares/ J. Kang// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 117(6). – 2005. – P. 3695–3706.
129. *Kang J.* Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries/ J. Kang// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 107 (3). – 2000. – P. 1394–1404.
130. *Hornikx M.* The extended Fourier pseudospectral time-domain method for atmospheric sound propagation/ Maarten Hornikx, Roger Waxler, Jens Forssén// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 128 (4). – 2010. – P. 1632–1646.
131. *Iu K.* The propagation of sound in narrow street canyons/ K. K. Iu and K. M. Li// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 12(2). – 2002. – P. 537–550.
132. *Heimann D.* Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects/ Dietrich Heimann// *Applied Acoustics.* – Vol. 68. – 2007. – P. 217–237.

133. *Van Renterghem T.* Parameter study of sound propagation between city canyons with a coupled FDTD-PE model/ T. Van Renterghem, E. Salomons, D. Botteldooren// Applied Acoustics. – Vol. 67. – 2006. – P. 487–510.
134. *Heutschi K.* A Simple Method to Evaluate the Increase of Traffic Noise Emission Level Due to Buildings, for a Long Straight Street/ K. Heutschi// Applied Acoustics. – Vol. 44. – 1995. – P. 259–274.
135. *Ismail M.* A scale model investigation of sound reflection from building facades/ M.R. Ismail, D.J. Oldham// Applied Acoustics. – Vol. 66. – 2005. – P. 123–147.
136. *Hall F.L.* Comparison of outdoor microphone locations for measuring sound insulation of building facades /F.L. Hall, M.J. Papakyriakou, J.D. Quirt // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 92(4). – 1984. – P. 559–567.
137. *Quirt J.D.* Sound fields near exterior building surfaces/ J.D. Quirt // Journal of Acoustic Society of America. – Vol. 77(2). – 1985. – P. 557–566.
138. *Li K.M.* A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen / K.M. Li, H.Y. Wong // Applied Acoustics. – Vol. 66. – 2005. – P. 45–76.
139. *MacDonald H. M.* A class of diffraction problems / H. M. MacDonald // Proc. Lond. Math. Soc. – Vol. 14. – 1915 – P. 410–427.
140. *Pierce A.D.* Diffraction of sound around corners and over wide barriers / A.D. Pierce // J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 55(5). – 1974. – P. 941–955.
141. *Hadden W.J.* Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point-source locations/ W.J. Hadden, A.D. Pierce // J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 69(5). – 1981. – P. 1266–1276.
142. *Rathe E. J.* Note on two common problems of sound propagation / E. J. Rathe// Journal of Sound and Vibration. – Vol. 10. – 1969. – P. 472–479.
143. *Rasmussen K. B.* On the effect of terrain profile on sound propagation outdoors / K. B. Rasmussen // Journal of Sound and Vibration. – Vol. 98(1) . – 1985. – P. 35–44.
144. *Maekawa Z.* Noise reduction by screens / Z. Maekawa // Applied Acoustics. – Vol. 1. – 1968. – P. 157–173.

145. *Kurze U. J.* Sound attenuation by barriers/ Kurze U.J., Anderson G.S.// Applied Acoustics. – Vol. 4. – 1971. – P. 35–53.
146. *Kurze U. J.* Noise reduction by barriers/ Kurze U.J.// J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 55. – 1974. – P. 504–518.
147. *Yamamoto K.* Expressions of Maekawa's chart for computation/ K. Yamamoto, K. Takagi // Applied Acoustics. – Vol. 37. – 1992. – P. 75–82.
148. *Menounou P.* A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers / Penelope Menounou // J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 110 (4). – 2001. – P. 1828–1838.
149. *O.Zaporozhets, V. I.Tokarev* Aircraft noise modelling for environmental assessment around airports // Applied Acoustics. – Vol. 55(2). – P. 99–127
150. *O. Zaporozhets.* Aircraft noise. Assessment, prediction and control / Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. // Spon Press, Great Britain. – 2011. – 414 p.
151. *Lam Y.W.* A simple method for accurate prediction of finite barrier insertion loss/ Lam Y.W., Roberts S.C.// J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 93. – 1993. – P. 1445–1452.
152. *Li K.M.* A simple method for accurate prediction of finite barrier insertion loss/ K.M. Li, T. Waters-Fuller, K. Attenborough// J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 98. – 1994. – P. 679–685.
153. *Salomons E.* Numerical computation of sound propagation over a noise screen based on an analytic approximation of the wind speed field/ Erik M. Salomons, Karsten B. Rasmussen// Applied Acoustics. – Vol. 60. – 2000. – P. 327–341.
154. *Lam Y.* A boundary element method for the calculation of noise barrier insertion loss in the presence of atmospheric turbulence/ Yiu Wai Lam// Applied Acoustics. – Vol. 65. – 2004. – P. 583–603.
155. *Jin B. J.* Sound diffraction by a partially inclined noise barrier/ B.J. Jin, H.S. Kim, H.Y. Kang, J.S. Kim// Applied Acoustics. – Vol. 62. – 2001. – P. 1107–1121.
156. *Ishizuka T.* Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions/ Takashi Ishizuka, Kyoji Fujiwara// Applied Acoustics. – Vol. 65. – 2004. – P. 125–141.

157. *Forssern J.* Thick barrier noise-reduction in the presence of atmospheric turbulence: measurements and numerical modelling/ J. Forssern, M. Ogren// *Applied Acoustics*. – Vol. 63. – 2002. – P. 173–187.
158. *Duhamel D.* Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier / D. Duhamel// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 197(5). – 1996. – P. 436–460.
159. *Duhamel D.* Sound propagation over noise barriers with absorbing ground/ D. Duhamel, P. Sergent// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 218(5). – 1998. – P. 688–712.
160. *De Lacerda L.A.* A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane/ L.A. De Lacerda, L.C. Wrobel, W. J. Mansur// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 202(2). – 1997. – P.124–136.
161. *Lim C.W.* Time-domain numerical computation of noise reduction by diffraction and finite impedance of barriers/ Chang Woo Lim, Cheolung Cheong, Seong-Ryong Shin, Soogab Lee// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 268. – 2003. – P. 385–401.
162. *Ouis D.* Noise attenuation by a hard wedge-shaped barrier/ D. Ouis// *Journal of Sound and Vibration*. – Vol. 262. – 2003. – P. 347–364.
163. *Kim H.* Sound diffraction by multiple wedges and thin screens/ Hyun-Sil Kim, Jae-Sueng Kim, Hyun-Ju Kang, Bong-Ki Kim, Sang-Ryul Kim// *Applied Acoustics*. – Vol. 66. – 2005. – P. 1102–1119.
164. *Min H.* Multiple acoustic diffraction around rigid parallel wide barriers/ Hequn Min, Xiaojun Qiu// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 126(1). – 2009. – P. 179–186.
165. *Chu D.* Higher-order acoustic diffraction by edges of finite thickness/ Dezhang Chu, Timothy K. Stanton, Allan D. Pierce // *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 122(6). – 2007. – P. 3177–3194.
166. *Stanton T.* Acoustic diffraction by deformed edges of finite length: Theory and experiment/ Timothy K. Stanton, Dezhang Chu, Guy V. Norton// *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 122(6). – 2007. – P. 3167–3176.

167. *Li K. M.* A ray model for hard parallel noise barriers in high-rise cities/ Kai Ming Li, Man Pun Kwok, Ming Kan Law// J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 123(1). – 2008. – P. 121–132.
168. *Bullen K.* Sound propagation through vegetation/ R. Bullen, F. Fricke// Journal of Sound and Vibration. – Vol. 80(1). – 1982. – P. 11–23.
169. *Van Renterghema E.* Numerical evaluation of tree canopy shape near noise barriers to improve downwind shielding/ T. Van Renterghema, D. Botteldooren// J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 123(2). – 2008. – P. 648–657.
170. СН 3077–84. Санитарные нормы допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки. – http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/v7_84400-84
171. ГОСТ 20444–85. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики. – <http://vsegost.com/Catalog/20/20016.shtml>
172. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise // Official Journal of the European Communities. – Vol. 189 – 18.7.2002. – P.12–25.
173. *Hoar C.* An integrated technology-based framework for community noise management/ Christopher Hoar, Hartmut Stapelfeldt, and Wing Ho Chung// *internoise 2011.* – p. 7.
174. *Escribano D.G.* Measurement of the acoustic noise map of a city using acoustic vector sensors/ Dolores Garcia Escribano, Emiel Tijs// *internoise 2011.* – p. 6.
175. *Probst F.* Comparison of Noise Calculation Methods/ Fabian Probst, Wolfgang Probst, Bernd Huber// *internoise 2011.* – p. 6.
176. *Stapelfeldt H.* Using Dynamic Noise Mapping for Pro-Active Environment Noise Management/ Hardy Stapelfeldt, Douglas Manvell// *internoise 2011.* – p. 9.
177. *Picaut J.* A simplified approach for making soundmaps within a GIS software/ Judicaël Picaut, Nicolas Fortin, and Guillaume Dutilleux// *internoise 2011.* – p. 6.
178. ГОСТ 31330.1–2006 (ИСО 11819–1:1997). Шум. Оценка влияния дорожного покрытия на транспортный шум. Часть 1. Статистический метод. – Введ. 01.06.2007. – М.: Стандартинформ, 2007. – 43 с.

179. *Шевченко Ю.С.* Метод картографування шуму від транспортних потоків у сучасному місті / Ю.С. Шевченко // Вісник НАУ.– 2012.– № 4(53). – С. 242–247.
180. *Шевченко Ю.С.* Аналіз формул розрахунку ефективності акустичних екранів на вулицях / Ю.С. Шевченко // Вісник НАУ.– 2010.– № 4(45). – С. 94–99.
181. Вильямс А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978, 248 с.
182. Имельбаев Ш.С., Шмутьян Б.Л. Моделирование стохастических коммуникационных систем /В книге Вильямс А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978, с.170 – 233.
183. *Gundogdu O.* A traffic noise prediction method based on vehicle composition using genetic algorithms. O. Gundogdu, M.Gokdag, F.Yuksel // Applied Acoustics. – Vol. 66. –2005 – P. 799–809.
184. Rahmani S. Modeling of road-traffic noise with the use of genetic algorithm /S. Rahmani, S.M. Mousavi, M.J. Kamali // Applied Soft Computing. – Vol. 11. – 2011. – P. 1008–1013.
185. *Cotana F.* An improved room acoustic model / Franco Cotana// Applied Acoustics. – Vol. 61. – 2000. – P. 1–25.
186. *Antonio J. B.* Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation /Antonio J.B. Tadeu, Diogo M.R. Mateus // Applied Acoustics. – Vol. 62. – 2001. – P. 307-325.
187. Методические рекомендации МР 2.1.10.0059–12 "Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума".
188. *Shevchenko Yu.* Estimation Methods for Acoustic Improvement of Rooms Using Measurements of Reverberation Time / Yu. Shevchenko, O. M. Beregovoj, A. A. Kozlitin, O. Y. Kravchuk // Proceedings of National Aviation University.– 2008.– № 2(35). – P. 73–77.
189. *Запорожець О. І.* Чинники формування екологічного стану урбанізованого довкілля / Запорожець О. І., Мовчан Я. І., Гроза В. А.,

Савченко В. І., Соловейкіна А. К., Карпенко С. В., Шевченко Ю. С. // Вісник НАУ. – 2010. – № 4(45). – С. 94–99.

190. *Шевченко, Ю. С.* Моделивання впливу фасаду будівлі на формування звукового поля / Ю. С. Шевченко, О. М. Береговий, В. Г. Паращанов // Вісник НАУ. – 2012. – № 1 (50). – С. 242–247.

191. *Коротченко, М. В.* Дослідження ефективності акустичних екранів на автомобільних дорогах України / М. В. Коротченко, Ю. С. Шевченко // Науково-виробничий журнал. – 2012. – № 6 (230). – С. 40–42.

192. *Shevchenko Yu.* New Ranking Method of Traffic Noise Reduction Measures / Yu. Shevchenko // Proceedings of National Aviation University. – 2013. – № 3. – р. 105–111.

193. *Шевченко, Ю. С.* Математична модель шуму транспортних потоків / Ю. С. Шевченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/4 (70). – С. 47–51.

ДОДАТОК А (до розділу 2)

А.1. Дослідження сегментування лінійного некогерентного джерела шуму

Транспортні шляхи (вулиці, шосе, залізничні дороги), а також довгі промислові установки представляють собою сконцентровані на лінії скупчення некогерентні джерела звуку. Розрахунок рівнів звукового тиску в безпосередній близькості від конкретних джерел (коли відстані до них порівняні з їх розмірами) проводиться для кожного з них окремо з наступним сумуванням. При віддаленні від лінії випромінювання джерела можна вважати рівномірно розподіленими.

У випадку умов вільного поля та однонаправлених (omnidirectional) точкових джерел найефективнішою сегментацією лінійного джерела шуму є сегментування постійними кутами $\delta\varphi_j$. Припускається, що рівні кутові інтервали мають однаковий вклад в сумарний рівень звукового тиску. В роботі для постійних кутових сегментів використовувалася величина $\delta\varphi_j = 5^\circ$.

На практиці зниження шуму A_{excess} (розділ 3) при поширенні від джерела до точки спостереження не є нульовим. Це може призводити до того, що сегментування кутовими сегментами постійної величини для випадків змінних умов поширення шуму буде знижувати ефективність розрахунків. Під змінними умовами поширення мається на увазі різні імпедансні поверхні, наявність перешкод та відбиваючих поверхонь і т.д. Для того, щоб максимально виключити всі можливі чисельні похибки в результаті інтегрування сегментів кінцевої довжини, необхідно так обирати довжину сегментів, щоб вона визначалась з умов поширення шуму від джерела до приймача.

З метою вирішення даної задачі в роботі був використаний оптимізований алгоритм сегментування [49,193] лінійного некогерентного джерела шуму. Даний алгоритм був адаптований для розробленої математичної моделі визначення рівнів шуму в точці його прийому. На основі проведених параметричних досліджень за допомогою адаптованого оптимізованого алгоритму було розраховано ряд числових параметрів, що використовуються в розробленій математичній моделі як вхідні дані при розрахунках рівнів шуму в точках спостереження, а також при подальшому картографуванні.

Основною перевагою запропонованого алгоритму є те, що він дозволяє вирішувати задачі інтегрування лінійного джерела шуму для таких ситуацій, коли точка спостереження знаходиться на продовженні лінії джерела шуму, як показано на рис. А.1 для точок В та С. На даному рисунку крайні точки джерела шуму можуть представляти перехрестя, де сходяться декілька автомобільних шляхів або точки початку підземних тунелів. Описані ситуації є характерними для міського середовища. При створенні карт шуму використання існуючих підходів може давати похибки до 10 дБ [49] для показаних положень точки спостереження.



Рис. А.1. Ділянка лінійного джерела шуму (жирна лінія), продовжена ось лінійного джерела шуму (штрихована лінія) та три положення приймача А, В, та С

На основі параметричних досліджень розробленої математичної моделі були визначені мінімально допустимі значення ряду параметрів, що є вхідними даними для оптимізованого алгоритму сегментування, як показано на блок-схемі (рис. А.2).

Фізичний зміст параметрів d_{min} та s_{min} показаний на рис. А.3. Згідно оптимізованому методу сегментування якщо d менше за d_{min} , то приймач шуму зміщується на нормальну відстань d_{min} , як показано в нижній частині рис. А.3. Зниження шуму розраховується для зміщеного положення приймача, так що $d = d_{min}$ та відповідними кутовими секторами $\delta\varphi_j$. Додатково необхідно виключити приймачів в області $s < s_{min}$.

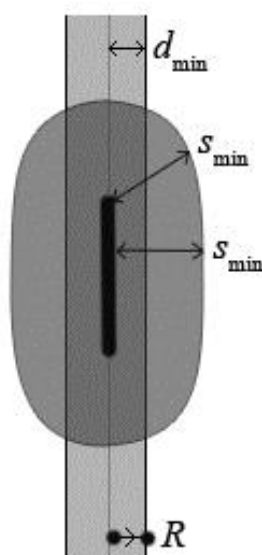


Рис. А.3. Ділянка лінійного джерела шуму (жирна лінія) з областю $s < s_{min}$, де виключені точки спостереження (темно-сіра область) та областю $d < d_{min}$ біля осі лінійного джерела шуму, де приймачі зміщені до найближчої точки так, що $d = d_{min}$ (світло-сіра область)

Необхідно зазначити, що рис. А.3 зображує одиночну площину через лінійне джерело шуму, наприклад, горизонтальну площину.

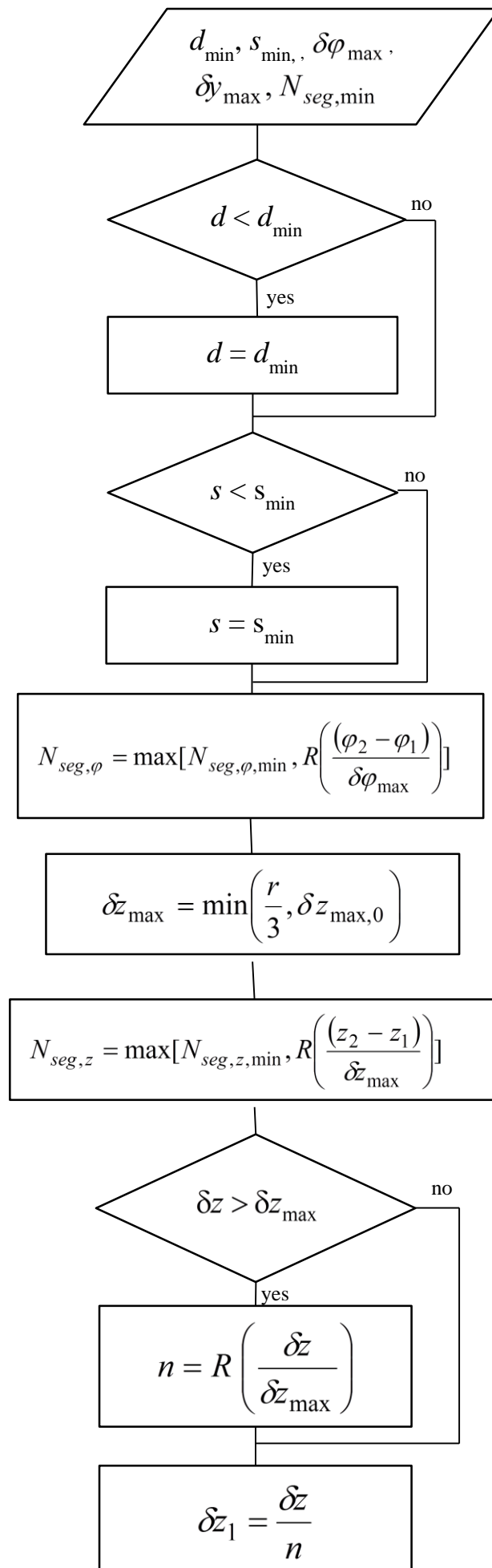


Рис. А.2. Блок–схема оптимізованого алгоритму сегментування лінійного джерела шуму

Для трьохвимірною випадку область $d < d_{min}$ є циліндричним об'ємом навколо лінійного джерела, а область $s < s_{min}$ є циліндричним об'ємом з заокругленими кінцями навколо лінійного джерела. Наприклад, приймач на мості над дорогою може бути розташований за цими об'ємами.

Кутовий інтервал $[\varphi_1, \varphi_2]$ (рис. 2.1) розділяється на N_{seg} кутових секторів $\delta\varphi_j = (\varphi_2 - \varphi_1) / N_{seg}$ з $N_{seg} = \max[N_{seg,min}, R((\varphi_2 - \varphi_1) / \delta\varphi_{max})]$. Функція $R(x)$ округляє x до найближчого більшого цілого, а $N_{seg,min}$ та $\delta\varphi_{max}$ – числові параметри.

Далі деякі сегменти поділяються на менші сегменти. Максимальна довжина сегментів розраховується наступним чином:

$$\delta z_{max} = \min\left(\frac{r}{3}, \delta z_{max,0}\right), \quad (A.1)$$

де $\delta z_{max,0}$ – числовий параметр.

Кожен сегмент з довжиною δz більшою, ніж δz_{max} розбивається на мінімальну кількість n сегментів (однакової довжини) менших, ніж δz_{max} , де $n = R(\delta z / \delta z_{max})$.

Член $r/3$ в рівнянні (A.1) забезпечує уникнення сферичного ближнього поля точкових джерел на лінії джерела шуму. Дане твердження базується на аналізі поля ряду точкових джерел, де показано, що перехід від сферичного до циліндричного розповсюдження відбувається на відстані $r/\pi \approx r/3$. Параметр $\delta z_{max,0}$ в рівнянні (A.1) може використовуватися для детальніших вибірок у випадках з значними коливаннями в додатковому зниженні шуму, наприклад, в результаті змінних характеристик земної поверхні або змінного екранування біля вертикальних кромки акустичних екранів.

Обґрунтування виробу мінімально допустимих значень наведених числових параметрів та результати параметричних досліджень описані нижче та показані на рис. А.3 – А.4.

Визначення мінімального допустимого значення $s_{min}=7,5$ м пояснюється тим фактом, що максимальна потужність транспортного потоку досягається

на даній відстані. Згідно нормативній документації [170,171] при вимірюванні рівнів шуму від транспортних потоків мікрофон розташовується на відстані 7,5 м від осі руху. При положенні приймача на відстані, меншій за встановлене значення – в розрахунках приймається, що точка спостереження знаходиться на даній відстані.

На рис. А.3 приведено дослідження вибору мінімального значення параметру d_{min} при сегментуванні лінійними сегментами постійної довжини δz . З рисунку видно, що в розробленій математичній моделі крива зниження шуму є гладкою, а проблема розрахунку для $\delta z \rightarrow 0$ не впливає на результати моделювання.

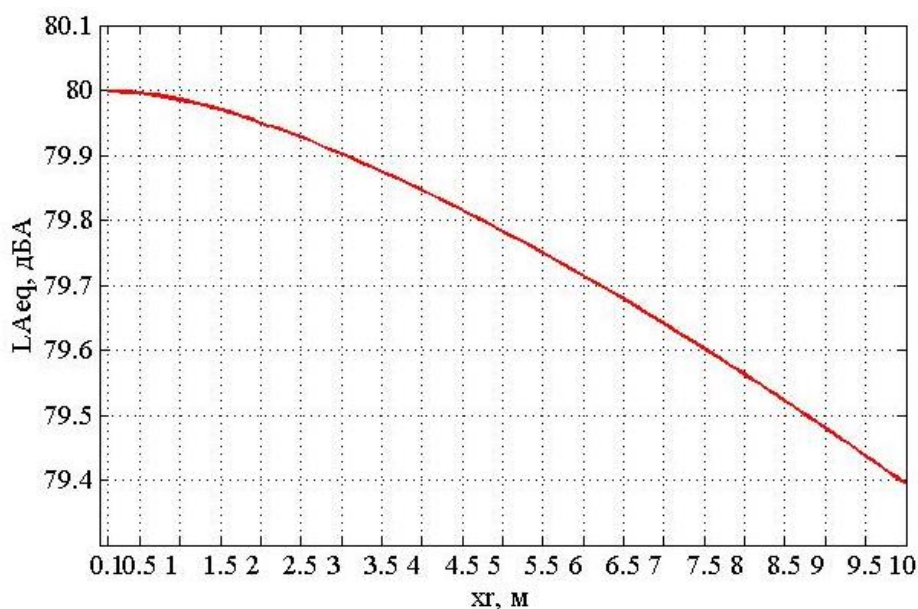


Рис. А.3. Вплив положення приймача шуму по відношенню до осі лінії шуму при координаті джерела шуму $x_s=0.1$ м відповідно до проблеми, зображеної на рис. А.1.

Дослідження ділянки l лінійного джерела, для якої проводиться інтегрування проводилися з метою визначення мінімальної довжини такої ділянки при якій досягається стабільне значення еквівалентного рівня шуму.

На рис. А.4 показано залежність рівня шуму від довжини l для розміру сегментів $\delta z=10$ м. Аналіз отриманих результатів показав, що при збільшенні довжини ділянки від 10 до 100 м рівень шуму зростає на 12 дБА, тоді як при збільшенні довжини від 100 до 200 м – лише на 1,2 дБА, від 200 до 300 м – лише на 0,5 дБА. Тому при виборі ділянки l лінійного джерела,

для якої проводиться інтегрування рекомендовано використовувати мінімальний значення $l=100$ м.

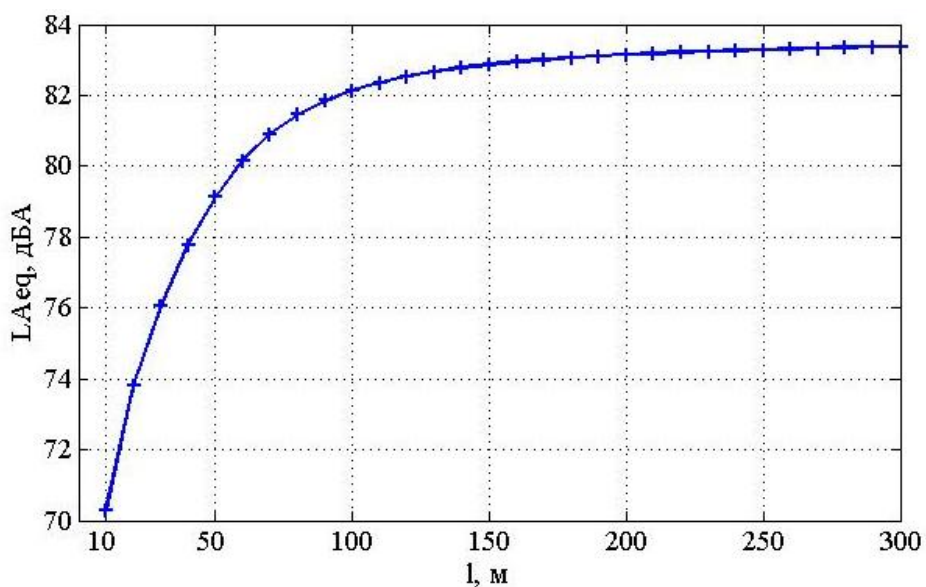


Рис. А.4. Залежність еквівалентних рівнів шуму від довжини ділянки лінійного джерела, для якої проводиться інтегрування

На рис. А.5 та А.6 досліджено вплив довжини ділянки та швидкості транспортного потоку на створювані рівні шуму.

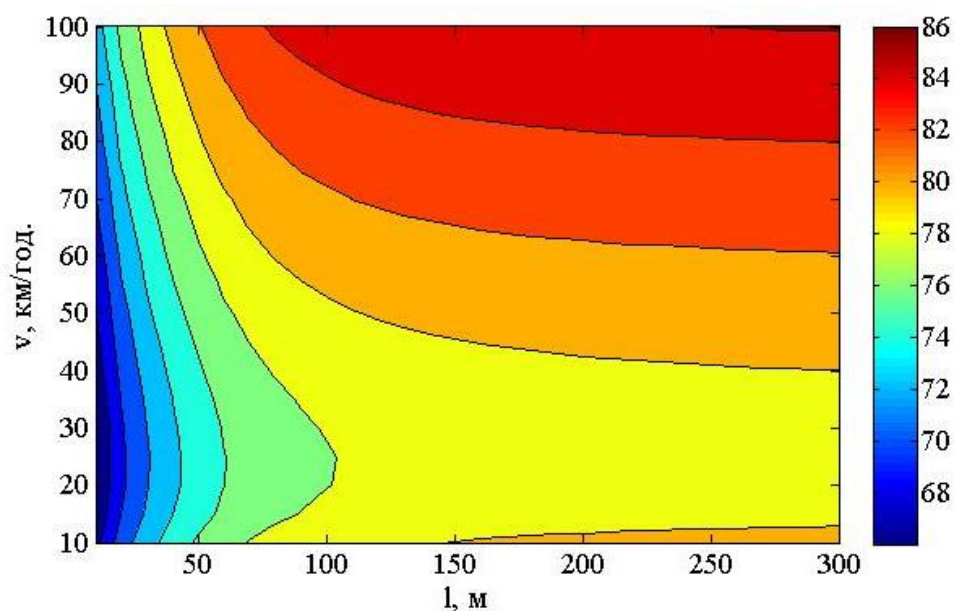


Рис. А.5. Залежність створюваних еквівалентних рівнів шуму від довжини ділянки лінійного джерела, для якої проводиться інтегрування та швидкості

На рис. А.6 показано швидкості зміни рівня шуму на кожному наступному кроці збільшенні довжини ділянки порівняно з попередньою $dL_{Aeq}(n,l) = L_{Aeq}(n,l) - L_{Aeq}(n-1,l)$. З рисунку видно, що всі контури паралельні осі y , тому можна зробити висновок, що швидкість транспортного потоку не впливає на вибір довжини ділянки інтегрування. Тому значення l визначаються на основі попереднього параметричного дослідження. Стабільної швидкості зміни рівня шуму досягається при $l > 80$ м, що підтверджується стабільністю кольору на діаграмі (рис. А.6).

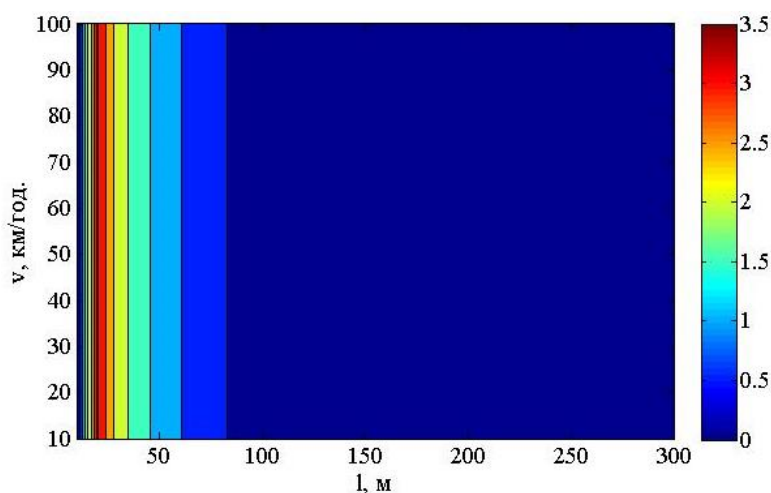


Рис. А.6. Зміна рівнів шуму dL_{Aeq} для кожної наступної довжини ділянки лінійного джерела, для якої проводиться інтегрування порівняно з попередньою

При дослідженнях величини довжини сегмента δz основними припущеннями були: (1) сегменти повинні бути достатньо малі, щоб забезпечити однорідність автомобілів на сегменті, та (2) становити не менше одного корпусу автомобіля, щоб припущення мало фізичний зміст.

Для однорідних умов поширення шуму від джерела до приймача можна використовувати лінійні сегменти джерела шуму більшої довжини, так як величина A_{excess} змінюється лише залежно від взаємного розташування джерела шуму та приймача.

На рис. А.7 показано залежності між довжиною сегментів δz та створюваними рівнями шуму для $l=100$ м. Аналізуючи рисунок слід розглядати $\delta z > 6$ м згідно припущення (2). З рисунка видно, що існує тісна

взаємозалежність між довжиною ділянки l , кількістю сегментів, що на ній поміщаються та впливом розміру сегментів на створювані рівні шуму. Значні коливання рівнів шуму спостерігаються при $\delta z > 36$, тому як кількість сегментів N_{seg} для $\delta z = 36$ м становить $R\left(\frac{100}{36}\right) = 3$, а для $\delta z = 41$ м – $R\left(\frac{100}{41}\right) = 2$. Таким чином, можна зробити висновок, що мінімальна кількість сегментів повинна становити $N_{seg, \min} \geq 3$.

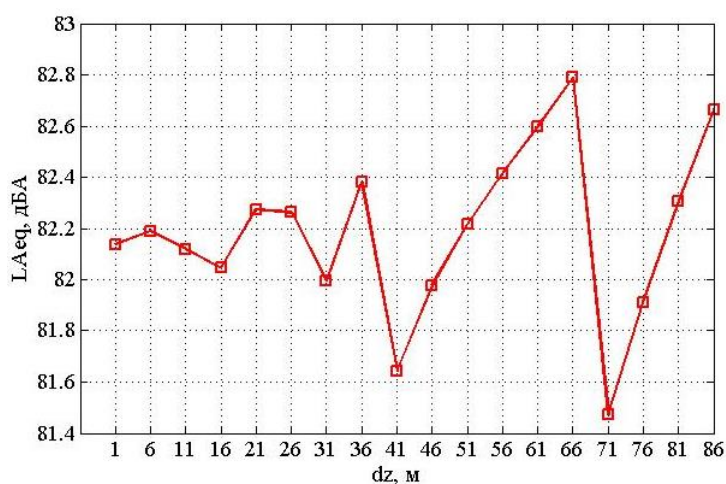


Рис. А.7. Вплив сегментування лінійного джерела на створювані рівні шуму для довжини лінійного джерела шуму 100 м

На рис. А.8 показано залежність еквівалентних рівнів шуму від довжини ділянки l та розміру сегментів δz . Аналогічно як і для рис. А.5 видно та А.6 можна зробити висновок, що швидкість зміни рівнів шуму зводиться до 0 при довжині ділянки інтегрування $l \geq 100$ м та коли дана ділянка розбивається мінімум на три сегменти.

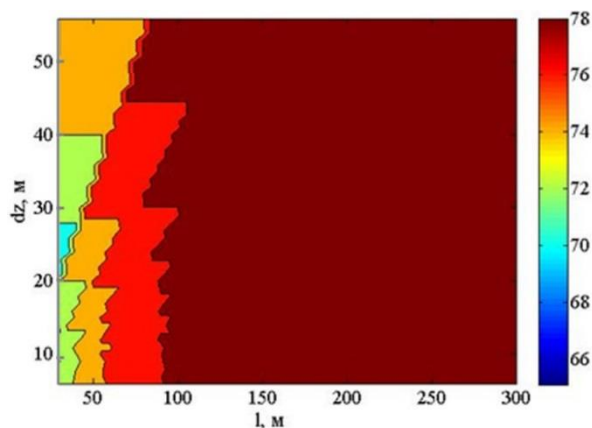


Рис. А.8. Залежність створюваних рівнів шуму від довжини ділянки інтегрування та розміру сегментів

Таблиця А.1

Розраховане стандартне відхилення для сумарного еквівалентного рівня шуму для проїздів легкових автомобілів

v , км/год.	L_{Aeq} , дБА	σ , дБА
20	57,46	2,3
30	54,30	1,0
40	66,81	1,4
50	69,64	1,8
60	70,31	1,4
70	74,53	1,1

Таблиця А.2

Кількісний склад виміряних транспортних потоків (табл. 2.4)

Категорії транспортних засобів	Бурштин	м. Київ, просп. Відрадний	м. Київ, Чоколівський бульвар
Категорія I	61	461	1094
Категорія II	2	14	30
Категорія III	1	3	15

ДОДАТОК Б
(до розділу 3)

Б.1. Розрахунок коефіцієнта Q відбиття у формулі для сферичної звукової хвилі

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w),$$

коефіцієнт відбиття R_p для плоскої звукової хвилі

$$R_p = \frac{\cos\theta - \beta}{\cos\theta + \beta},$$

фактор втрат $F(w)$ звуку при його розповсюдженні вздовж поверхні

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi}w \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw),$$

β – акустичний адмітанс, є оберненим параметром до імпедансу Z поверхні $\beta = \frac{1}{Z}$, чисельна відстань w :

$$w \approx \frac{1}{2}(1+i)\sqrt{kR'}(\cos\theta + \beta),$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt = 1 - \operatorname{erf}(x),$$

де $\operatorname{erf}(x)$ – інтеграл вірогідності.

$$\Delta L_{ground} = 10 \lg \left\{ 1 + S^2 |Q|^2 + 2S \frac{\sin(k\Delta R \Delta f)}{k\Delta R \Delta f} [\cos(k\Delta R) \operatorname{Re} Q - \sin(k\Delta R) \operatorname{Im} Q] \right\}$$

де $S = \frac{R}{R'}$, $\Delta R = (R' - R)$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\Delta f = 0,116$, символи Re , Im визначають

відповідно дійсну і уявну частину функції Q .

В наведених співвідношеннях використано дані акустичних властивостей поверхонь. Для визначення імпедансу поверхні використано наступну формулу [93].

$$Z = 1 + 9,08(1000f/\sigma)^{-0.754} + i11,9(1000f/\sigma)^{-0.732},$$

де σ – опір продуванню поверхні.

Таблиця Б.1

Розмір елементів при розрахунках методом кінцевих елементів для чотирьох елементів на довжину хвилі

Частота, Гц	Довжина хвилі, м	Максимальний розмір елементів, м
50	6.80	1.700
63	5.40	1.349
80	4.25	1.063
100	3.40	0.850
125	2.72	0.680
160	2.13	0.531
200	1.70	0.425
250	1.36	0.340
315	1.08	0.270
400	0.85	0.213
500	0.68	0.170
630	0.54	0.135
800	0.43	0.106
1000	0.34	0.085

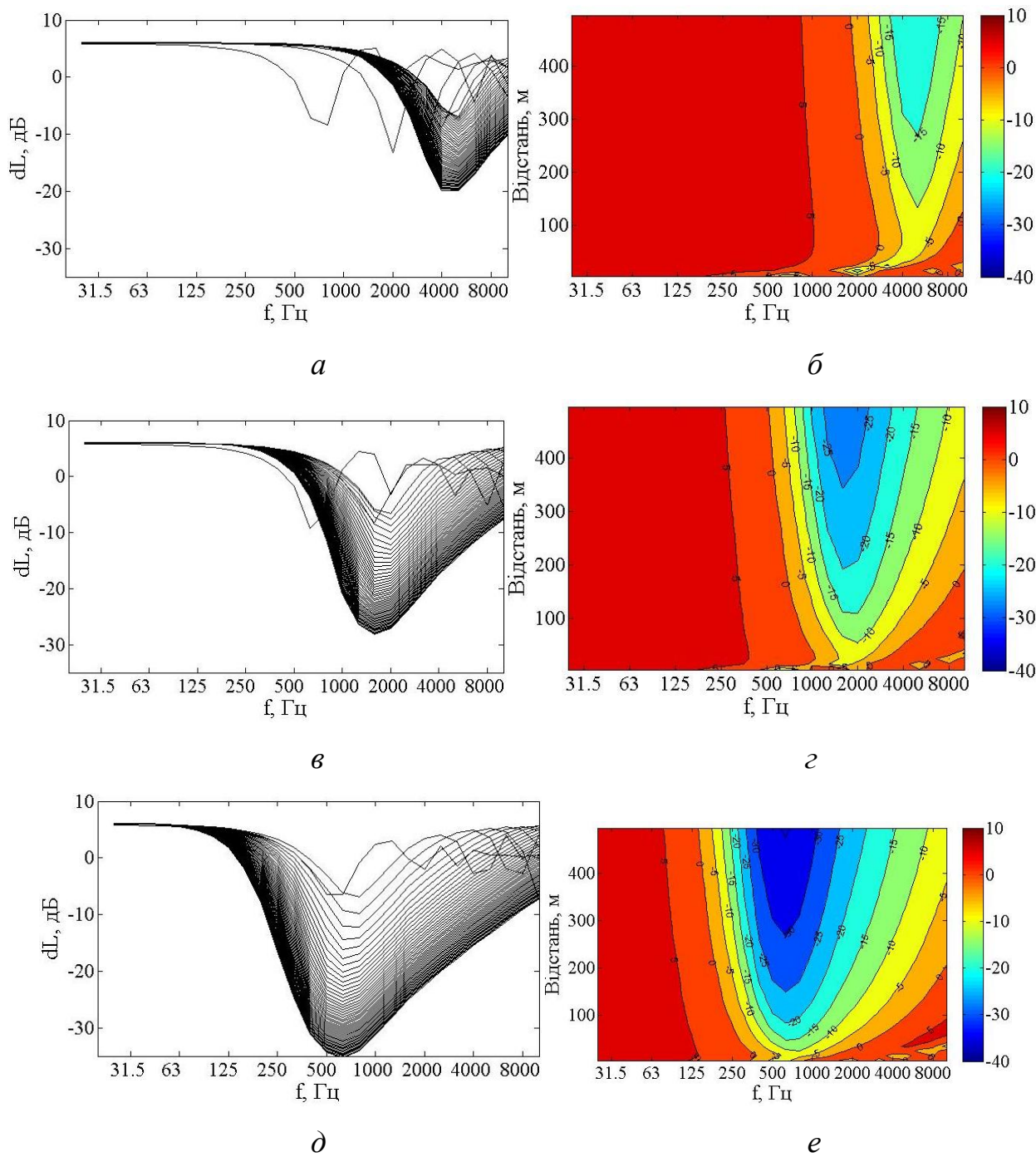


Рис. Б.1. Зміна рівнів звукового тиску в точці прийому в результаті ефектів інтерференції для різних імпедансних поверхонь: *a, б* – $\sigma = 20\,000$ кНс/м⁴, *в, г* – $\sigma = 2\,000$ кНс/м⁴, *д, е* – $\sigma = 200$ кНс/м⁴, відстань змінюється від 10 до 500 м між джерелом шуму та приймачем

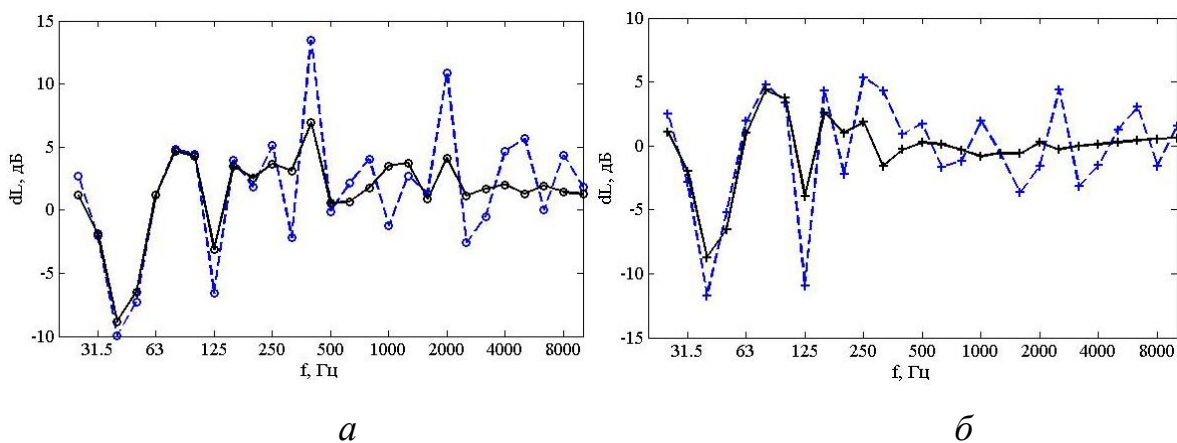


Рис. Б.2. Порівняння зміни рівнів звукового тиску в результаті додаткових відбиттів від фасаду ΔL_{refl_1} для удосконаленої моделі впливу додаткових відбиттів від фасаду та КПМ для поверхонь землі та фасаду $\sigma_{землі} = 200 \text{ кНс/м}^4$ та $\sigma_{фасаду} = 200 \text{ кНс/м}^4$ відповідно

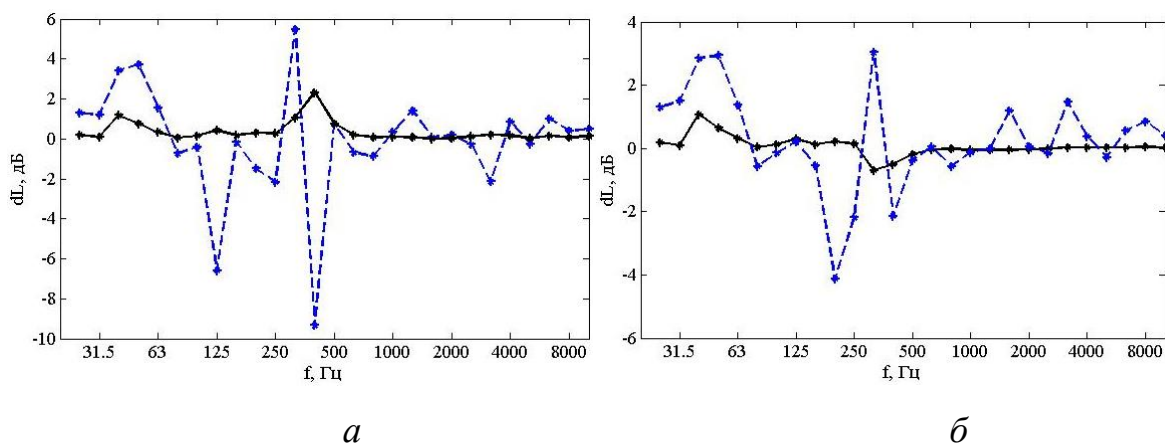


Рис. Б.3. Порівняння впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$ для удосконаленої моделі впливу додаткових відбиттів та КПМ для поверхонь землі та фасаду $\sigma_{землі} = 200 \text{ кНс/м}^4$ та $\sigma_{фасаду} = 200 \text{ кНс/м}^4$ відповідно

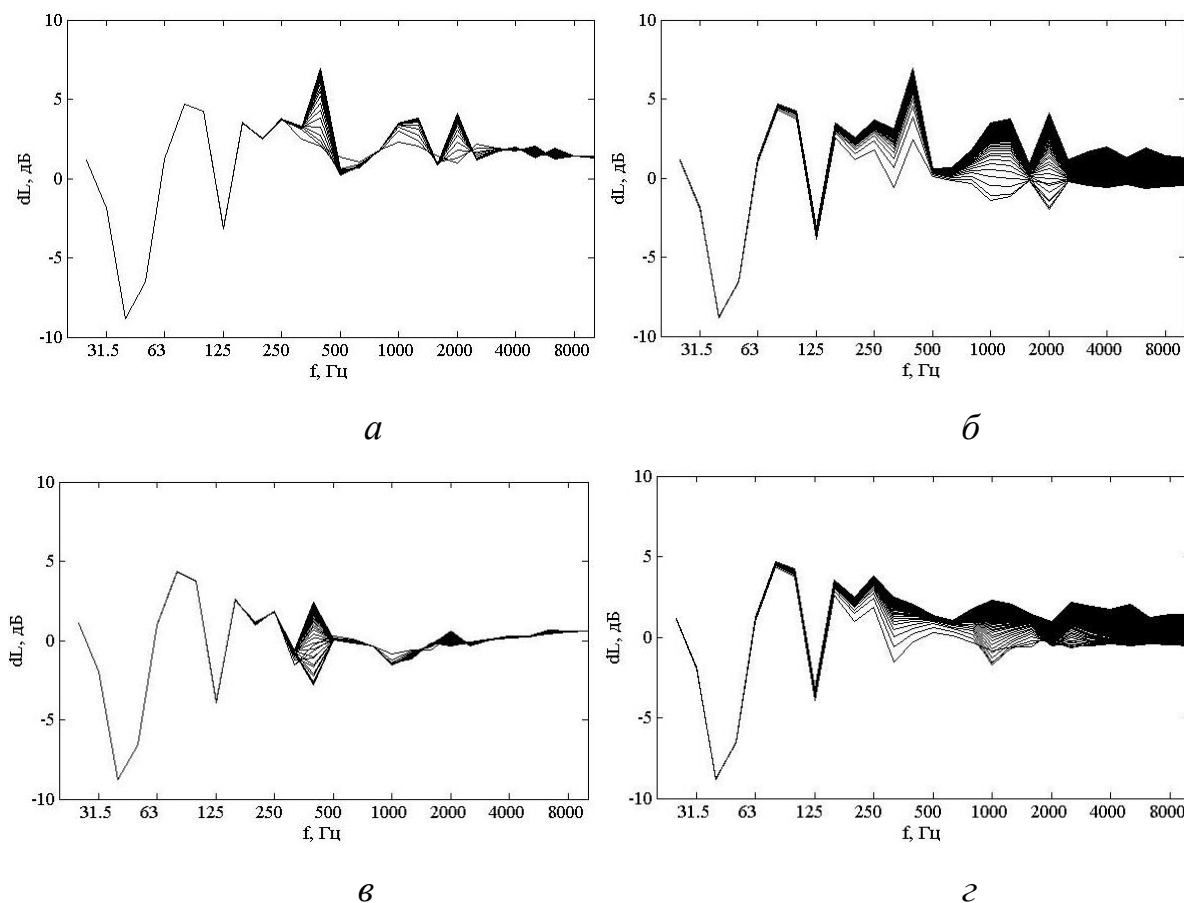


Рис. Б.4. Криві зміни рівнів звукового тиску в 1/3-октавній смузі частот перед фасадом будівлі для змінюваної характеристики σ від 200 до 20 000 кНс/м⁴: *a* – для постійної величини $\sigma_{\text{фасаду}} = 20\,000$ кНс/м⁴ та змінюваної $\sigma_{\text{землі}}$, *б* – для постійної величини $\sigma_{\text{землі}} = 20\,000$ кНс/м⁴ та змінюваної $\sigma_{\text{фасаду}}$, *в* – для постійної величини $\sigma_{\text{фасаду}} = 200$ кНс/м⁴ та змінюваної $\sigma_{\text{землі}}$, *г* – для постійної величини $\sigma_{\text{землі}} = 200$ кНс/м⁴ та змінюваної $\sigma_{\text{фасаду}}$

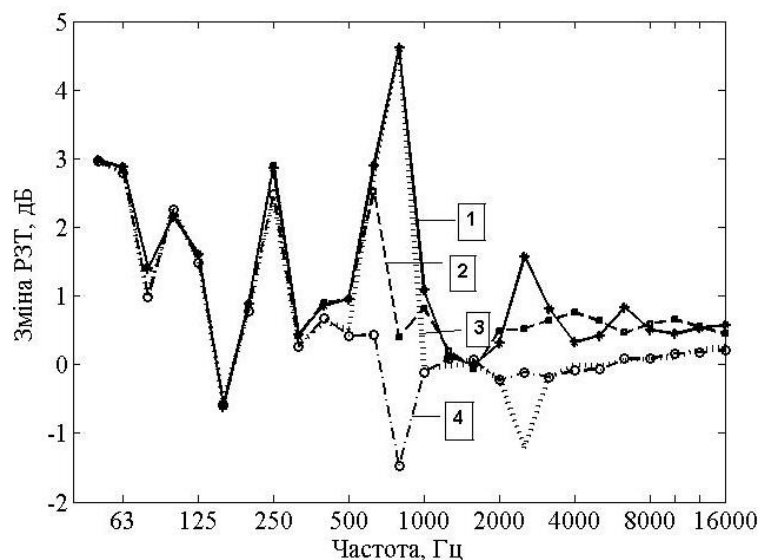


Рис. Б.5. Зміна РЗТ за рахунок додаткових відбиттів від паралельного фасаду для різних імпедансних поверхонь фасаду та землі: 1 – $\sigma_{землі} = 20\,000$ та $\sigma_{фасаду} = 200$, 2 – $\sigma_{землі} = 20\,000$ та $\sigma_{фасаду} = 20\,000$, 3 – $\sigma_{землі} = 20\,000$ та $\sigma_{фасаду} = 200$, 4 – $\sigma_{землі} = 200$ та $\sigma_{фасаду} = 200$

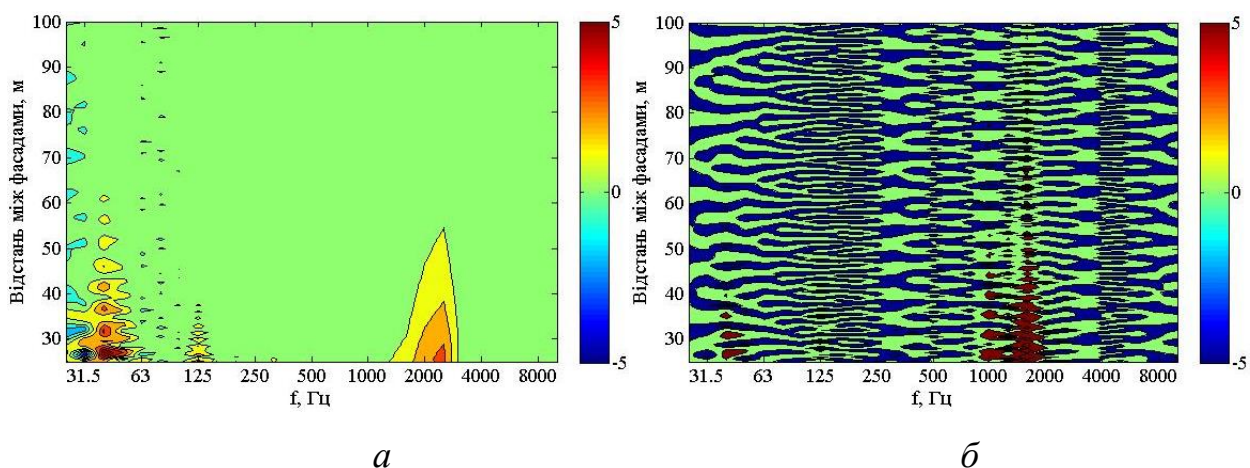


Рис. Б.6. Порівняння впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду $\Delta L'_{refl}$ в залежності від ширини вулиці – кольором позначено зміну РЗТ:
 а – удосконалена математична модель оцінювання впливу додаткових відбиттів, б – КПМ

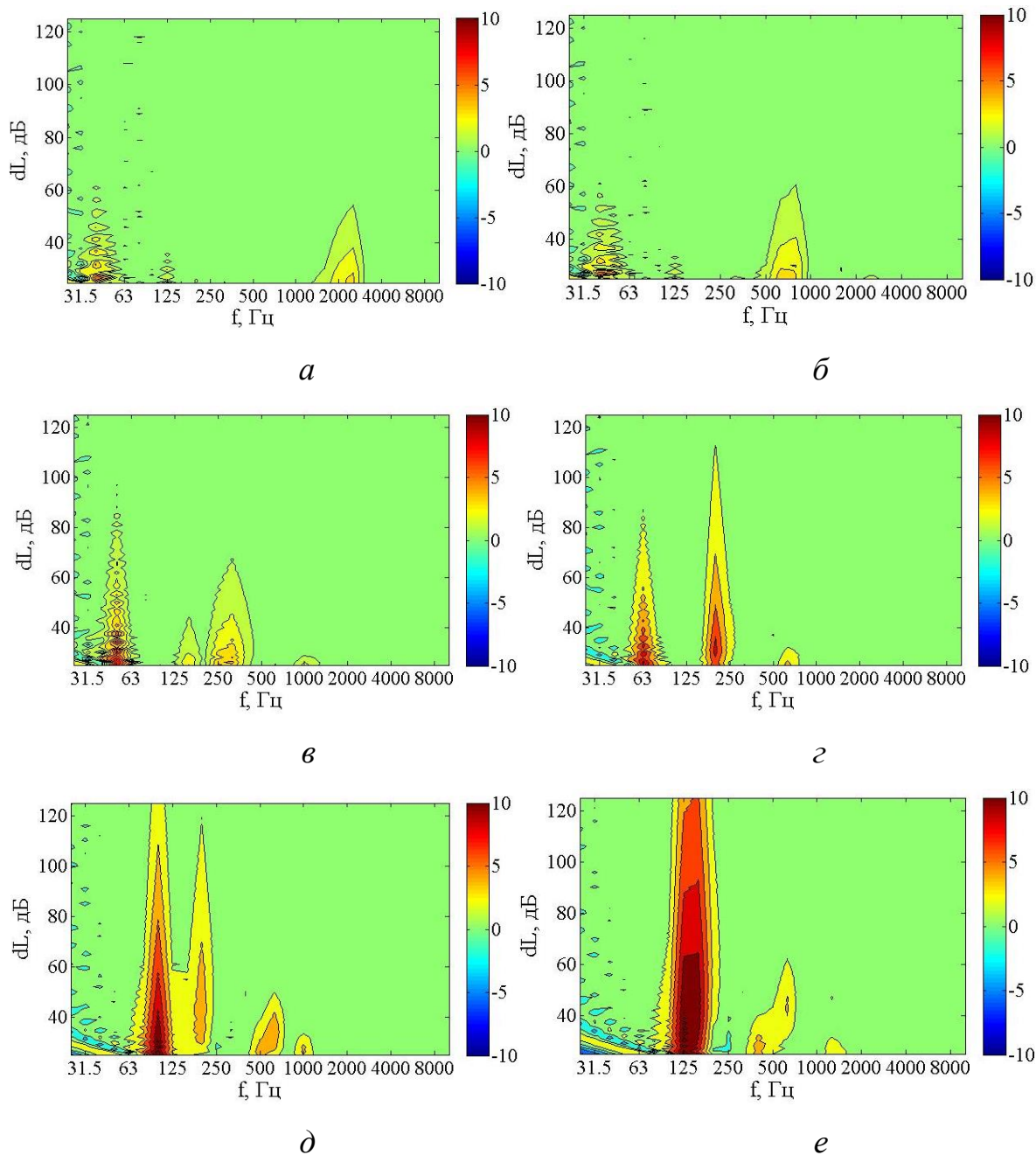


Рис. Б.7. Порівняння впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду в залежності від ширини вулиці – кольором позначено зміну РТЗ: *a* – 1,2 м, *б* – 4 м, *в* – 10 м, *г* – 20 м, *д* – 35 м, *е* – 50 м (кольором позначено зміну РТЗ)

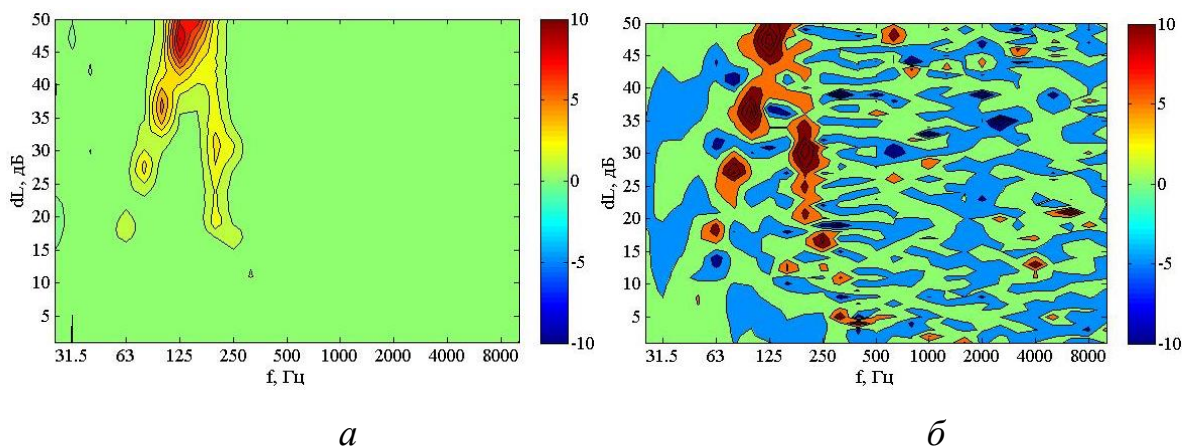


Рис. Б.8. Порівняння впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду в залежності від висоти вулиці – кольором позначено зміну РТЗ: *a* – удосконалена математична модель впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель, *б* – класична променева модель

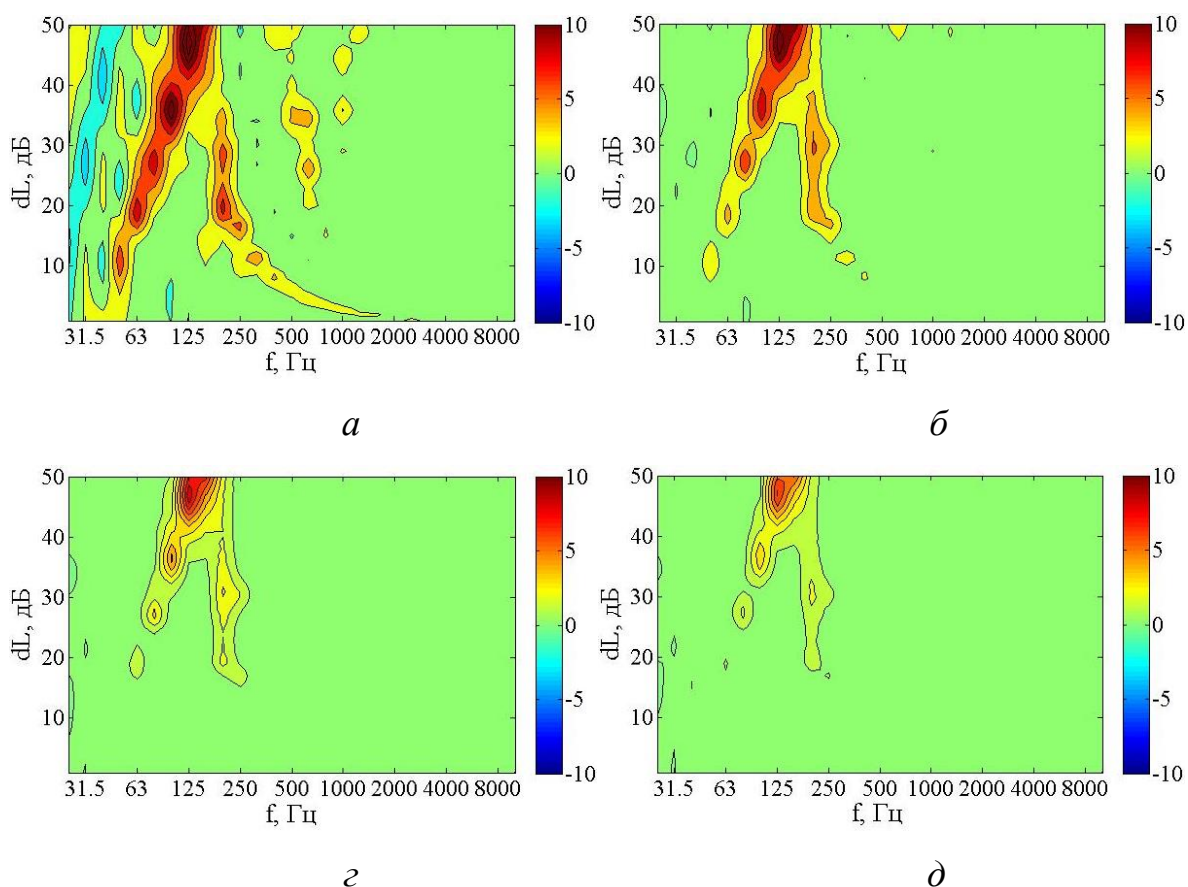


Рис. Б.9. Порівняння впливу додаткових відбиттів від паралельного фасаду в залежності від змінюваної висоти вулиці для заданої ширини вулиці: *a* – 50 м, *б* – 75 м, *в* – 100 м, *г* – 125 м (кольором позначено зміну РТЗ)

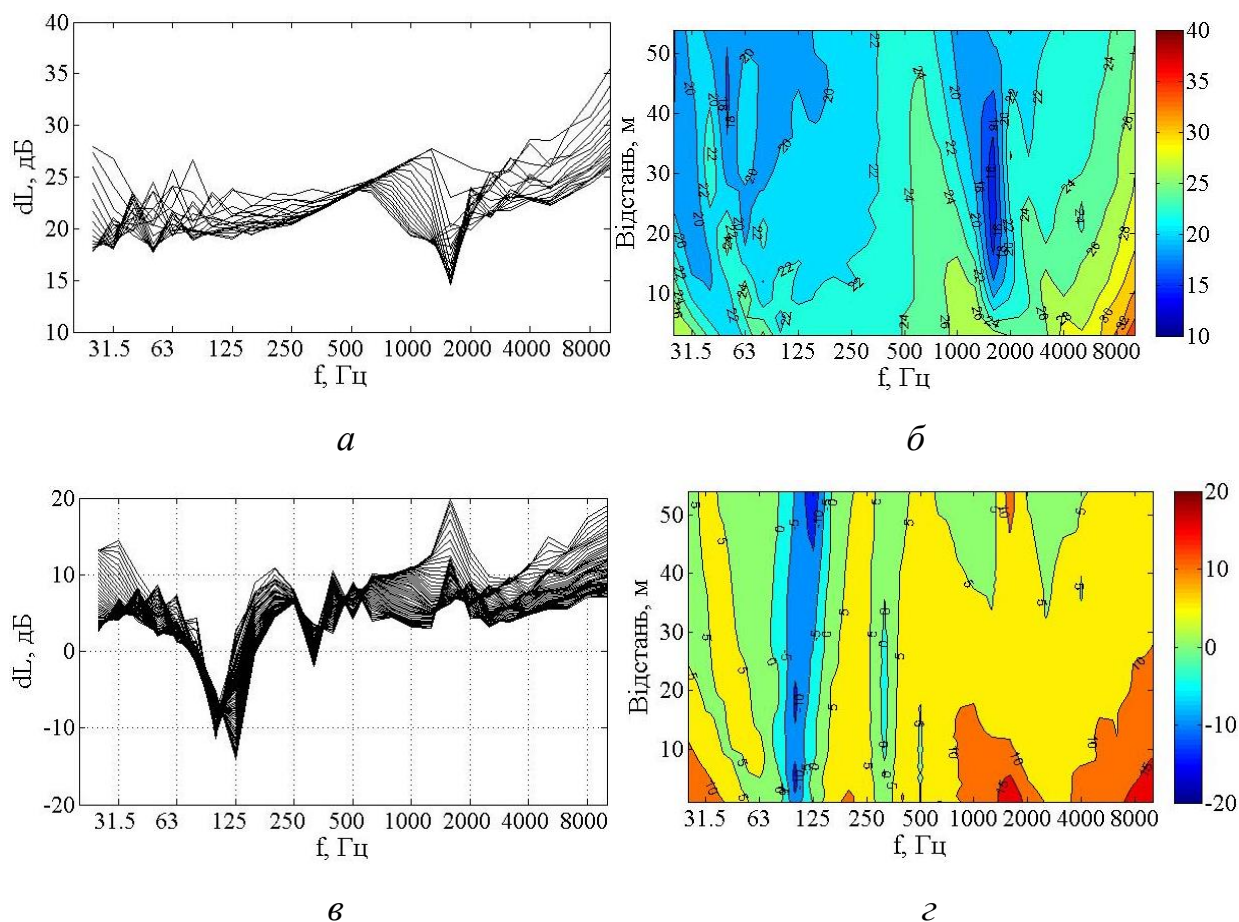


Рис. Б.10. Залежність зниження шуму при тонкому акустичному екрані від відстані між джерелом шуму та поверхнею акустичного екрану: *а* – сімейство кривих та *б* – контури рівного шуму для додаткового зниження шуму, *в* – сімейство кривих та *г* – контури рівного шуму для ефективності акустичного екрану

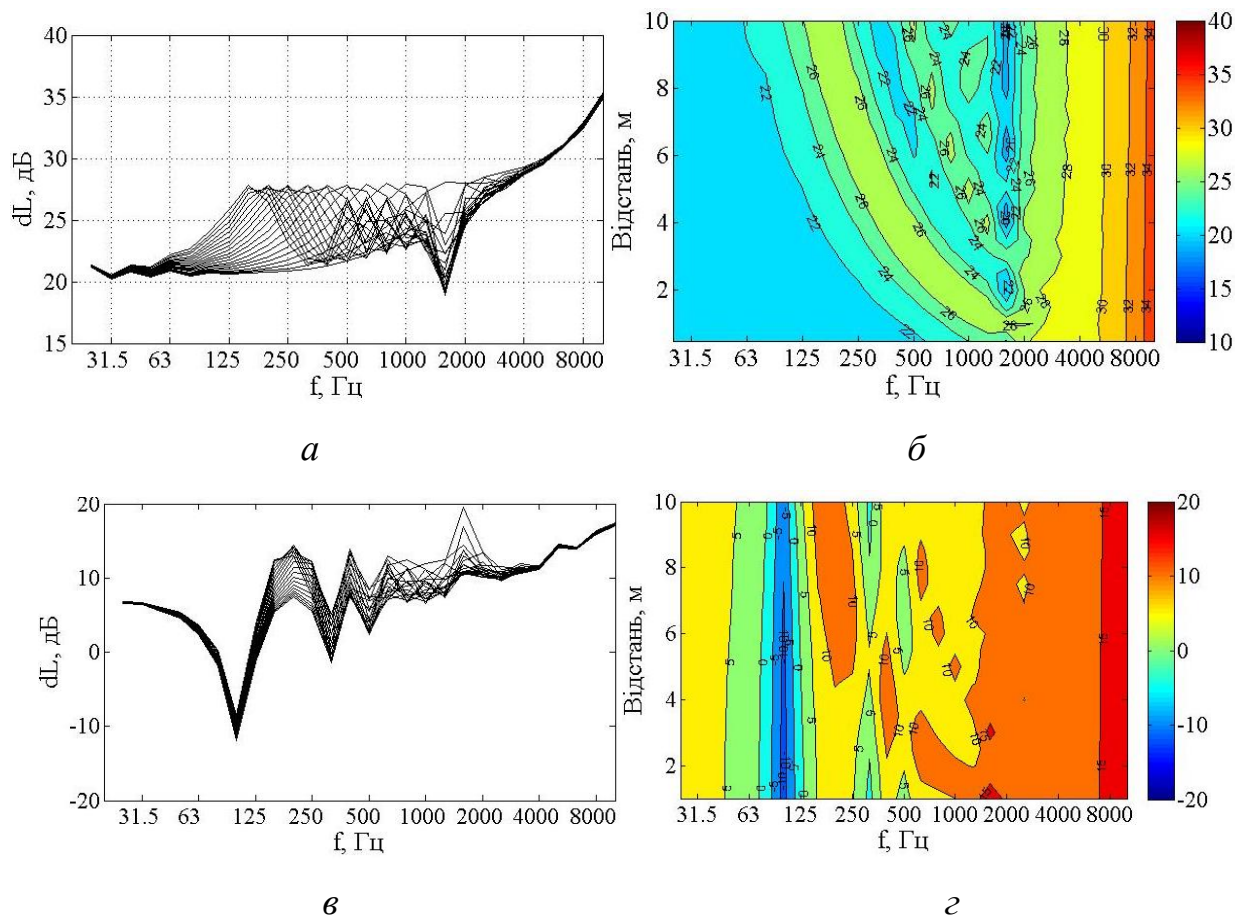


Рис. Б.12. Залежність зниження шуму при тонкому акустичному екрані від висоти акустичного екрану: *a* – сімейство кривих та *б* – контури рівного шуму для додаткового зниження шуму, *в* – сімейство кривих та *г* – контури рівного шуму для ефективності акустичного екрану

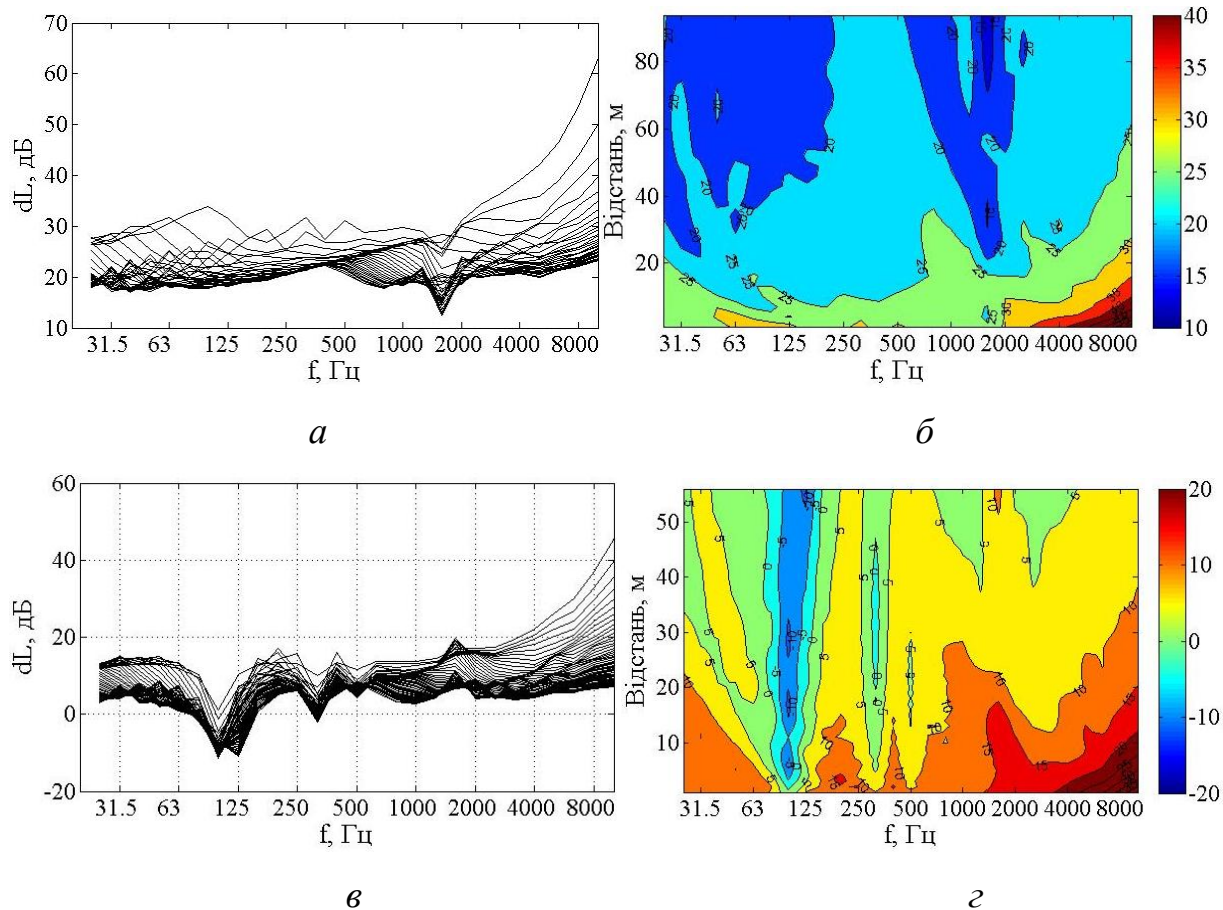


Рис. Б.11. Залежність зниження шуму при тонкому акустичному екрані від відстані між поверхнею акустичного екрану та точкою спостереження: *a* – сімейство кривих та *б* – контури рівного шуму для додаткового зниження шуму, *в* – сімейство кривих та *г* – контури рівного шуму для ефективності акустичного екрану

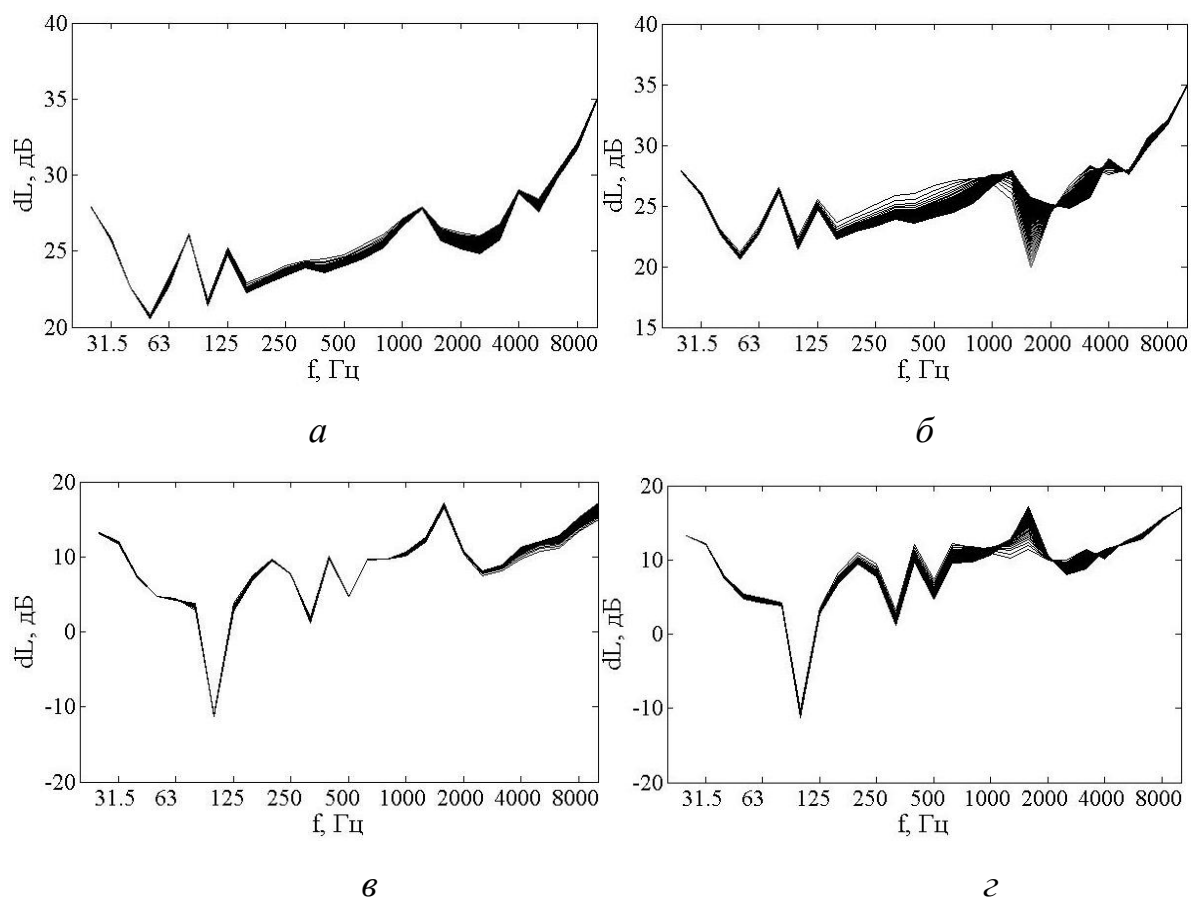


Рис. Б.13. Залежність зниження шуму при тонкому акустичному екрані від покриття поверхні землі: *a*, *в* – додаткове зниження шуму та ефективність екрану при зміні імпедасних характеристик до екрану, *б*, *г* – додаткове зниження шуму та ефективність екрану при зміні імпедасних характеристик після екрану

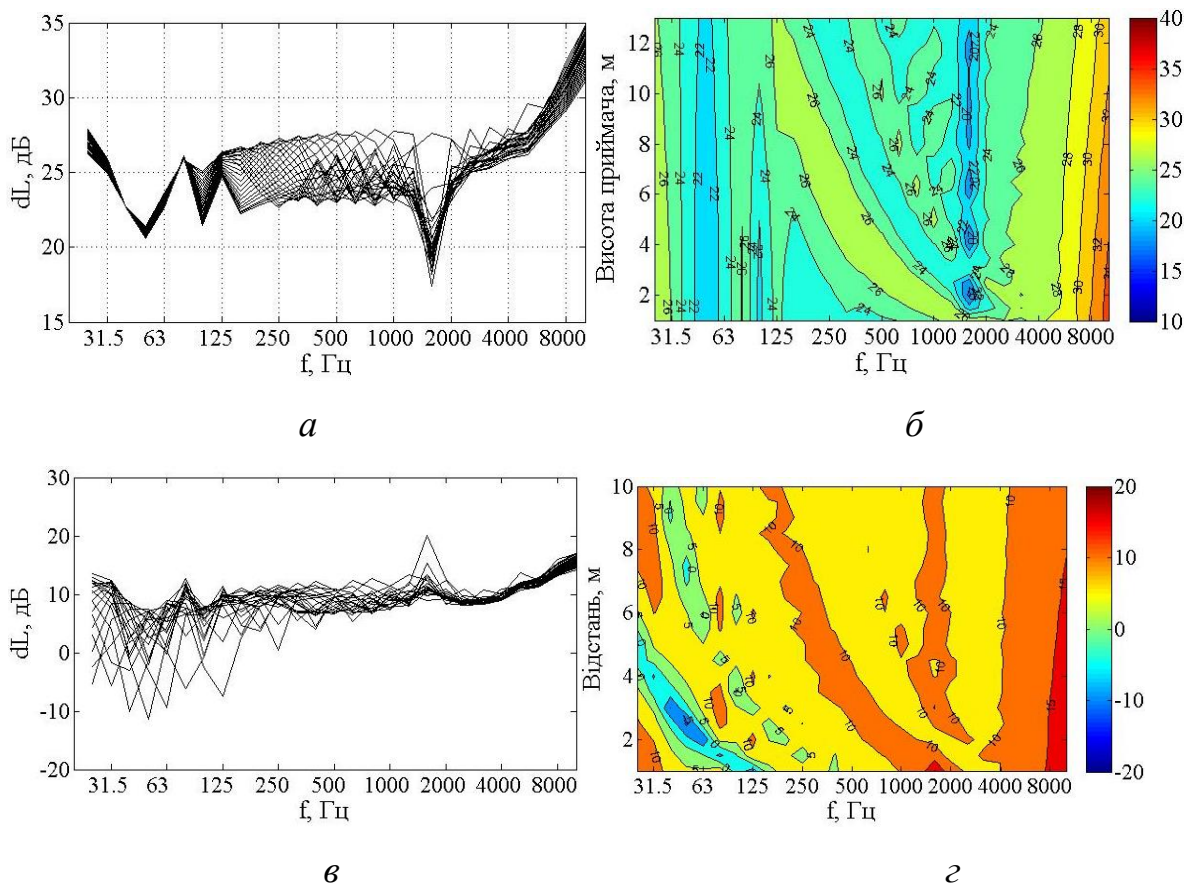


Рис. Б.14. Залежність зниження шуму при тонкому акустичному екрані від висоти приймача шуму для висоти екрану 3 м: *a* – сімейство кривих та *б* – контури рівного шуму для додаткового зниження шуму, *в* – сімейство кривих та *г* – контури рівного шуму для ефективності акустичного екрану

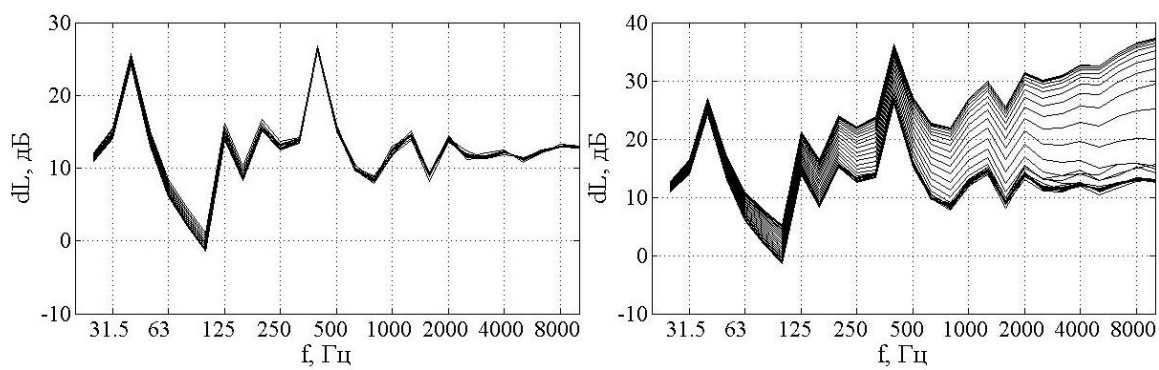
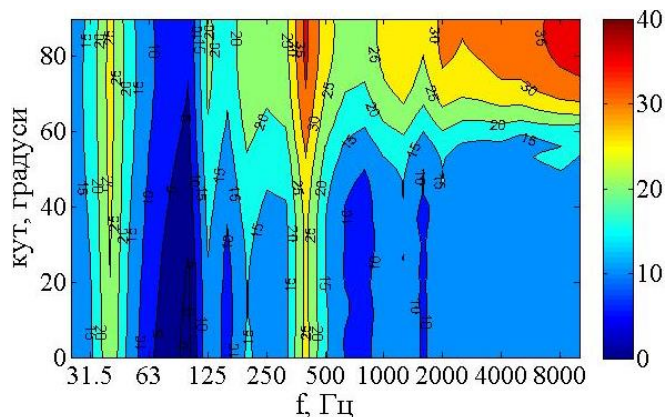
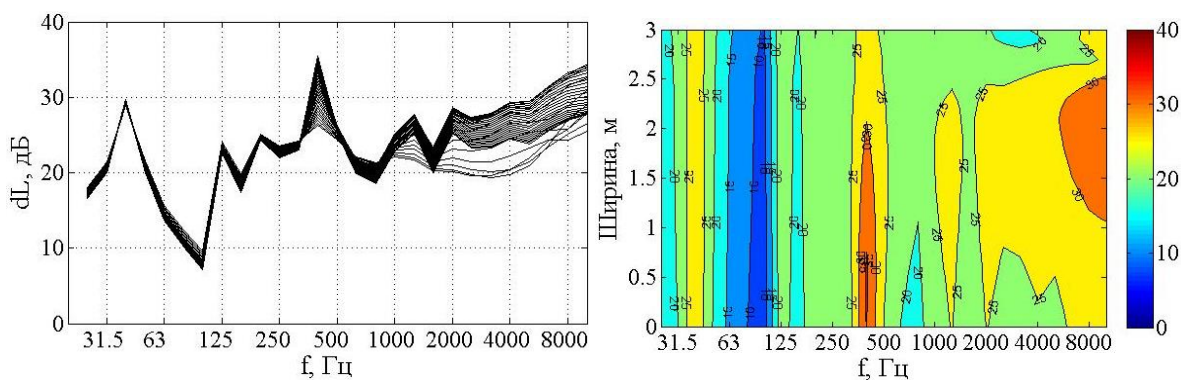
*а**б**в*

Рис. Б.15. Залежність зниження шуму при клиноподібному акустичному екрані від кута клину на кромці екрану: *а* – для кутів від 0 до 30°, *б* – для кутів від 0 до 90°, *в* – поверхня

*а**б*

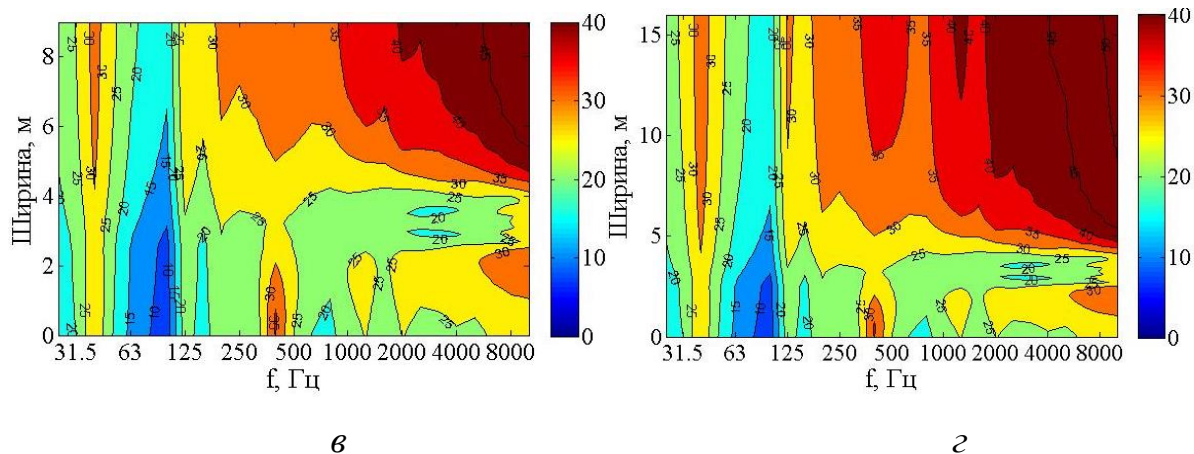


Рис. Б.16. Залежність зниження шуму при акустичному екрані кінцевої довжини від ширини кромки екрану: *а* – сімейство кривих, контури рівного шуму для ширини екрану *б* – 3 м, *в* – 9 м, *г* – 16 м

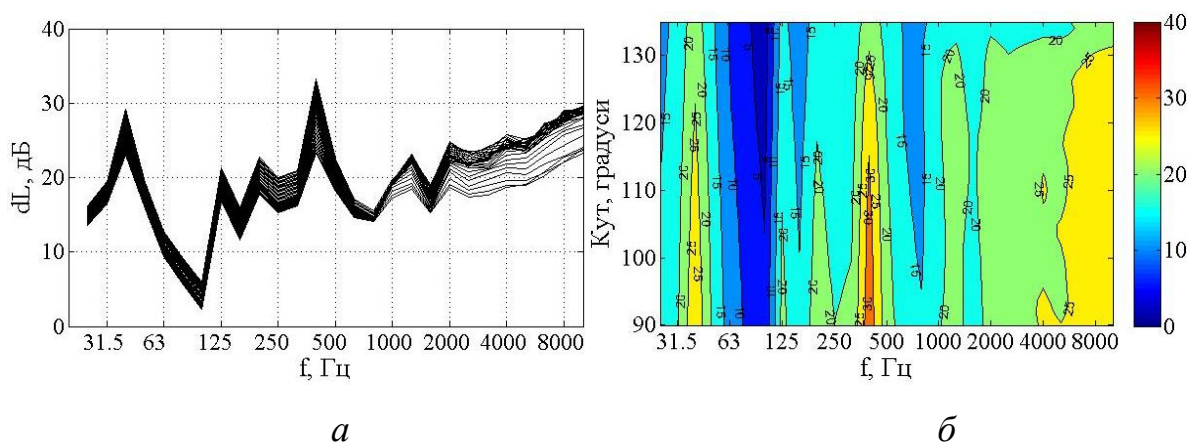


Рис. Б.17. Залежність зниження шуму при клиноподібному акустичному екрані від кута клину на кромці трапецієвидного екрану для постійної ширини: *а* – сімейство кривих, *б* – контури рівного шуму

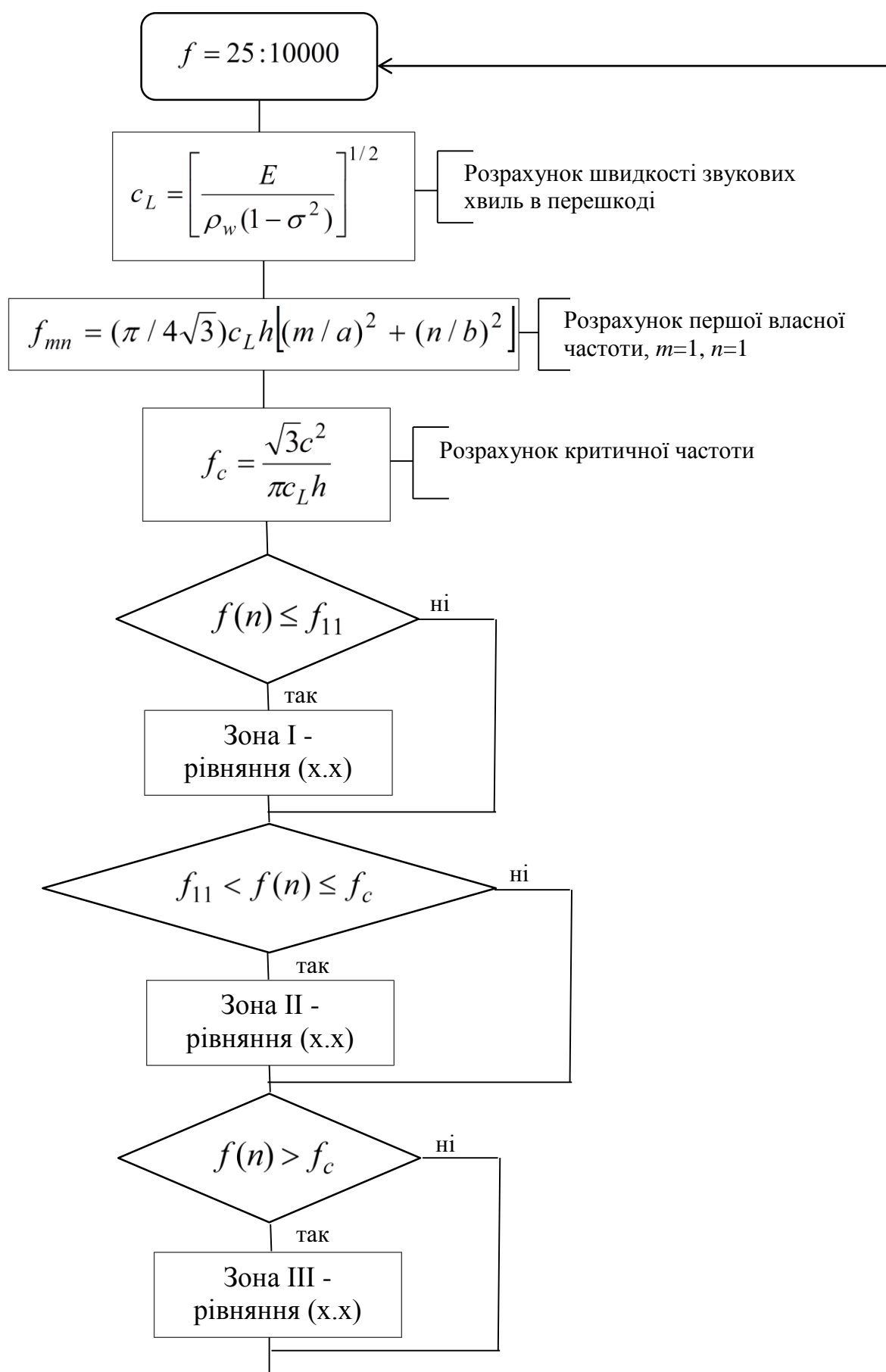


Рис. Б.18. Алгоритм моделювання розрахунку звукоізоляції для різних зон

Додаток В
(до розділу 4)

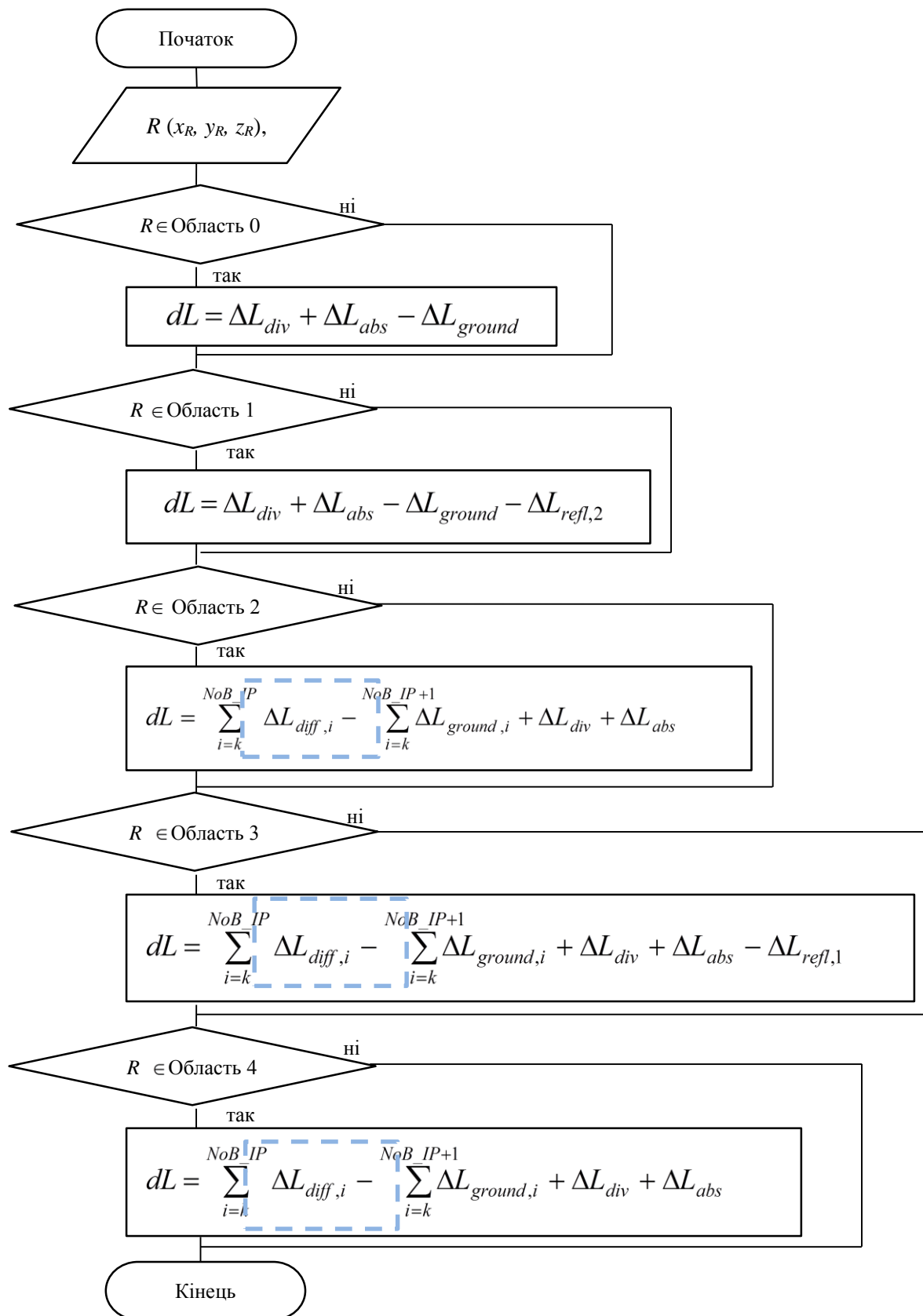


Рис. В.1. Алгоритму моделювання сумарного зниження шуму для різних положень приймача

Таблиця В.1

Порівняння експериментальних даних для м. Бурштин та моделювання

Джерело отриманих результатів	Акустична потужність транспортного потоку, дБА	РЗТ, дБА		Загальне зниження шуму USScape1.0, дБ	Загальне зниження шуму без врахування впливу фасаду, дБ	Абсолютна похибка моделювання зниження шуму, дБ	
USScape1.0	71,2	60,6	59,3	10,9	12,3		
Результати вимірювань	66,9	57,3		8,6		2,3	3,7

Таблиця В.2

Відносна частка території міста, що входить до відповідних рівних контурів шуму

$L_{Aeq,T}$, дБА	Частина території міста з нанесеними контурами шуму, %
50	39
55	29
60	19
65	10
70	3

ДОДАТОК Д
(до розділу 5)

Таблиця Д.1

Порівняння експериментально визначеного часу звучання $\tau_{ef,exp}$ та теоретично розрахованого $\tau_{ef,mod}$ за допомогою розробленої емпіричної моделі для автомобілів I категорії та приведена абсолютна похибка моделювання

v , КМ/ГОД.	v , М/С	$\tau_{ef,exp}$, С	$\tau_{ef,mod}$, С	E , С
30	8,3	1,78	1,97	0,19
35	9,7	1,60	1,69	0,09
40	11,1	1,55	1,48	0,07
50	13,9	1,25	1,18	0,07
60	16,7	1,03	0,98	0,04

Таблиця Д.2

Порівняння експериментально визначеного часу звучання $\tau_{ef,exp}$ та теоретично розрахованого $\tau_{ef,mod}$ за допомогою розробленої емпіричної моделі для автомобілів II та III категорії та приведена абсолютна похибка моделювання

v , КМ/ГОД.	v , М/С	$\tau_{ef,exp}$, С	$\tau_{ef,mod}$, С	E , С
30	8	2,05	1,99	0,06
46	12,9	1,47	1,28	0,19
63	17,4	0,84	0,95	0,11
69	19,0	0,91	0,87	0,04
72	20,0	0,75	0,83	0,08

Таблиця Д.3

Початкові дані для апробації моделі розрахунку відносного внеску j -го методу зниження шуму

Метод зниження шуму	Зниження шуму в приміщенні з використанням j -го методу δL , дБ	Зниження шуму на шляху його розповсюдження з використанням j -го методу ΔL , дБ	Вартість використання j -го методу ν , відносні одиниці	Нормована апріорна оцінка ν_j
Зменшення інтенсивності транспортного потоку (від 4000 авт./год до 1000 авт./год.)	3	5	1	0,125
Зниження швидкості транспортного потоку (на 10 км/год)	1	2	1	0,125
Пористі дорожні покриття	1	2	1	0,125
Зелені насадження	2	5	1	0,125
Встановлення акустичних екранів:				
- Тонкий АЕ	6	9	1	0,125
- АЕ кінцевої товщини	4	7	1	0,125
Звукоізоляція вікон	7	0	1	0,125
Використання активних вікон	4	0	1	0,125

Початкові дані для розрахунку вкладу j -го методу зниження транспортного шуму

	Метод зниження шуму	Зниження шуму в приміщенні з використанням j -го методу δL , дБ	Зниження шуму на шляху його розповсюдження з використанням j -го методу ΔL , дБ	Вартість використання j -го методу ν , відносні одиниці	Нормована апріорна оцінка ν_j
1	Зменшення інтенсивності транспортного потоку (від 4000 авт./год до 1000 авт./год.)	3	5	100	0,463
2	Зниження швидкості транспортного потоку (на 10 км/год)	1	2	100	0,463
3	Пористі дорожні покриття	1	2	1	0,005
4	Зелені насадження	2	5	2	0,009
	Встановлення акустичних екранів:				
5	- Тонкий АЕ	6	9	3,3	0,015
6	- АЕ кінцевої товщини	4	7	2,5	0,012
7	Звукоізоляція вікон	7	0	2	0,009
8	Використання активних вікон	4	0	5	0,023

Розрахунку вкладу j -го методу зниження транспортного шуму для декількох положень приймача (ПП)

Метод зниження шуму	Кількість положень приймача = 5									
	ПП № 1		Кількість положень приймача = 4							
			ПП № 2		Кількість положень приймача = 3					
	ПП № 3				ПП № 4		ПП № 5			
	ΔL	δL	ΔL	δL	ΔL	δL	ΔL	δL	ΔL	δL
Зменшення інтенсивності транспортного потоку (від 4000 авт./год до 1000 авт./год.)	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3
Зниження швидкості транспортного потоку (на 10 км/год)	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Пористі дорожні покриття	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Зелені насадження	5	2	5	2	5	2	2	0	1	0
- Тонкий АЕ	9	6	9	6	9	6	6	3	4	2
- АЕ кінцевої товщини	7	4	7	4	7	4	4	3	3	2
Звукоізоляція вікон	0	7	0	7	0	7	0	7	0	7
Використання активних вікон	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4

Характеристика рівня ризику здоров'ю міського населення, пов'язаного
з шумовим чинником

Коефіцієнт приведеного ризикау	Тип ризику	Рекомендовані заходи
<0.05	Низький (Н)	<ul style="list-style-type: none"> – вибірковий моніторинг; – планування заходів, які можуть бути реалізовані в довгостроковій перспективі (5 років і більше); – плановий перегляд рівнів ризику з частотою не рідше, ніж один раз на п'ять років;
0.05–0.35	Помірний (П)	<ul style="list-style-type: none"> – постійний моніторинг; – розробка заходів щодо зниження шумового навантаження з урахуванням середньострокової та короткострокової перспективи (1–3 роки); – плановий перегляд з частотою не рідше одного разу на три роки;
0.35–0.6	Високий (В)	<ul style="list-style-type: none"> – розширена програма моніторингу шумового навантаження з проведенням додаткових досліджень в місцях та/або в періоди максимальних рівнів шуму; – розробка заходів щодо зниження шумового навантаження на найближчу короткострокову перспективу протягом року; – перегляд ступеня ризику щороку;
>0.6	Екстремальний (Е)	<ul style="list-style-type: none"> – негайне припинення діяльності основних джерел шуму або виселення населення із зони шкідливого впливу; – повторна оцінка рівнів ризику після ухвалення заходів щодо зниження несприятливого впливу транспортного шуму на здоров'я населення.

Додаток Ж

Структура програми USScape розробленої в дисертаційній роботі на основі проведених досліджень

На основі приведено алгоритму в процесі підготовки дисертаційної роботи була розроблена програма для розрахунку рівнів шуму в міському середовищі USScape (Urban Soundscape). Структура програми показана на рис. Ж.1. Програмування виконувалося на мові програмування Matlab.

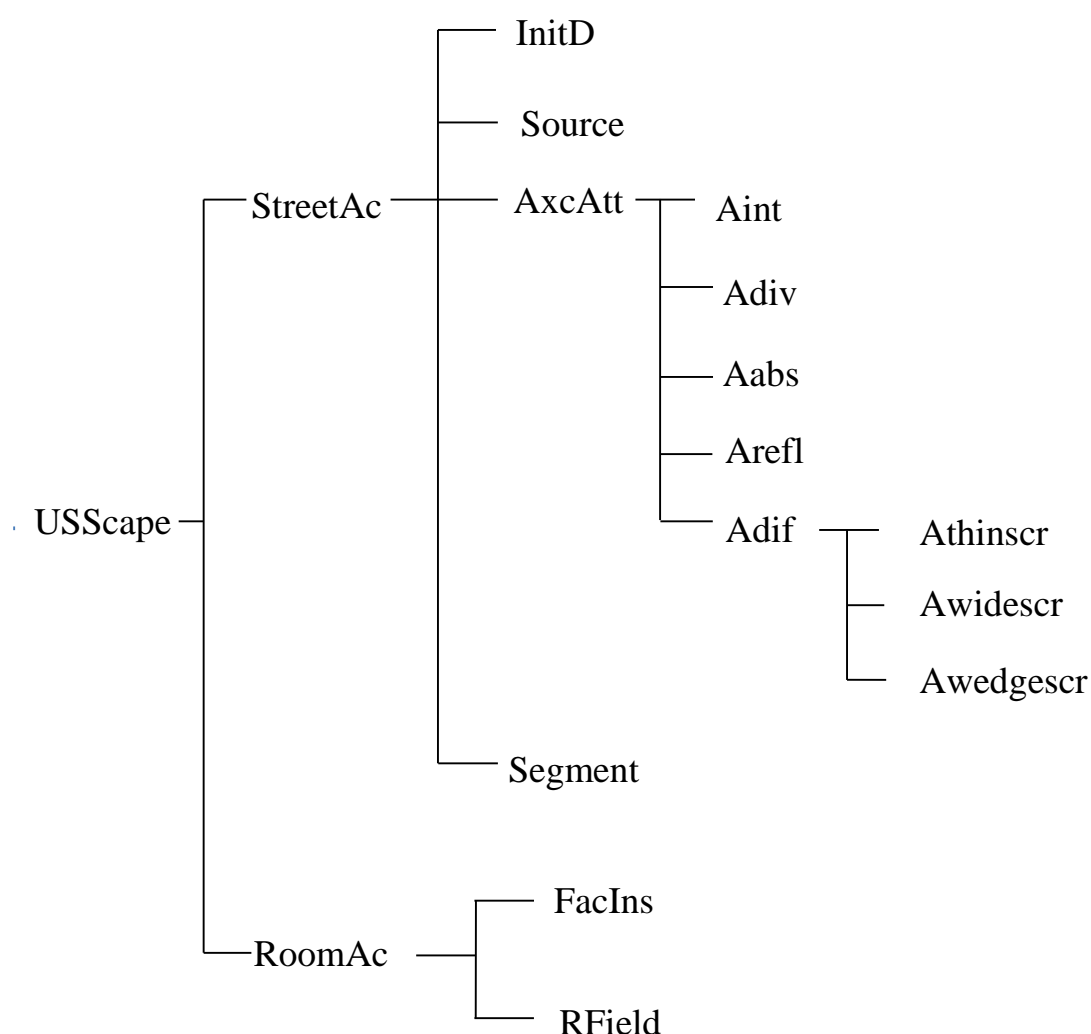


Рис. Ж.1. Структура програми, USScape для розрахунку рівнів шуму в міському середовищі

Основна програма USScape включає два блоки: StreetAc – блок, що дозволяє розраховувати рівні шуму на території міської забудови та вздовж

основних автомобільних шляхів, та RoomAc – блок призначений для моделювання проходження шуму всередину приміщень та формування звукових полів у приміщеннях.

Кожен із блоків містить підпрограми, математичні моделі яких описані в розділах дисертаційної роботи: InitD – програма введення початкових даних, необхідних для моделювання; Source – програма розрахунку звукової потужності транспортних засобів різних категорій, а також моделювання рівнів шуму, створюваних транспортними потоками; AxcAtt – розрахунок додаткового зниження шуму при поширенні звукових хвиль від джерела до приймача. Програма AxcAtt включає такі програми, як Aint – моделювання ефектів інтерференції звукових хвиль при відбиванні від поверхні землі, Adiv – зниження шуму в результаті ефекту дивергенції звукових хвиль, Aabs – зниження шуму при поглинанні в повітрі, Arefl – вплив відбивання від вертикальних поверхонь, таких як фасади будівель чи поверхні акустичних екранів, Adif – зниження шуму в результаті дифракції звуку на кромках акустичних екранів.

Програма моделювання ефектів дифракції Adif включає три підпрограми, що дозволяє обирати тип кромки екрану та використовувати відповідну математичну модель: Athinscr – для тонкого акустичного екрану, Awidescr – для акустичного екрану кінцевої товщини, Awedgescr – для клиноподібної кромки акустичного екрану.

Segment – програма, призначення для використання розробленого алгоритму сегментування при інтегруванні лінійного джерела шуму.

Блок моделювання проходження шуму всередину приміщень та формування звукових полів у приміщеннях RoomAc включає програму FacIns для розрахунку звукоізоляції приміщень та RField – для розрахунку рівнів звукового тиску в кожній точці приміщення.

Метою розділу є розробка алгоритмів створення горизонтальних двовимірних карт шуму для сучасного міста. Дослідження шумового забруднення міста та аналіз отриманої інформації закладає базу для

подальшого розроблення пропозицій щодо зниження шуму від транспортних потоків на території житлової забудови.

USScape1.0

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

Початкові дані Вдбівання Поглинання в Дифракції/Сумарне РТЗ в приймачі

Метеорологічні дані		Геометрія			
p, гПа	1013.25	xs, м	0		
p0, гПа	1013.25	ys, м	0.01, 0.3, 0.75		
t, 0C	15	zs0, м	20		
t0, 0C	15	zs_end, м	120		
H, %	60	xr, м	20		
Акустичні параметри		yr, м	1.2		
f, Гц	25,31.5,40,50,63,80,100,125,160,200,250	zr, м	70		
sgm, кНс/м4	20000	Акустичні екрани			
sgm_afsc, кНс/м4	20000	NoB	1 scr	2	
sgm_fac, кНс/м4	20000	zE_left, м	65	scr_len, м	100
Транспортний потік		xEs, м	10	xEs0, м	10
Тип дорожнього покриття	0	yEs, м	1	yEs0, м	0
dz, м	10	zEs, м	70	zEs0, м	70
Q, авт./год.	4000, 200, 80	xEr, м	11	xEr0, м	11
v, м/с	70, 60, 50	yEr, м	1	yEr0, м	0
		zEr, м	70	zEr0, м	70
		Фоновий рівень шуму, дБА		55	

Розрахувати

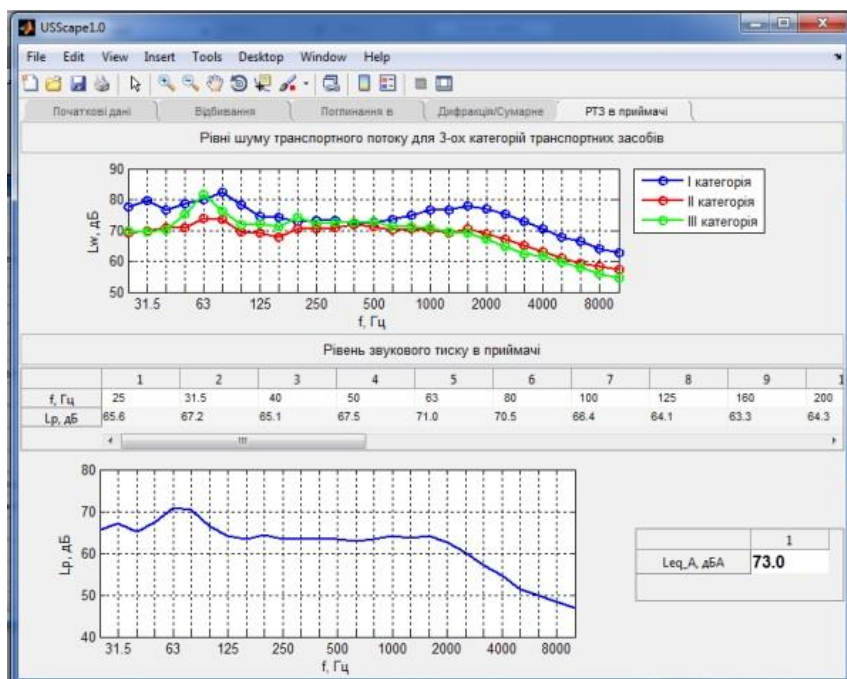


Рис. Ж.2. Зображення інтерфейсу користувача програмного забезпечення USScape1.0 на мові програмування Matlab

Додаток 3

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

„ЗАТВЕРДЖУЮ”
Головний конструктор
ДП «АНТОНОВ»
Семенець С.І.
„26” 2012 р.




АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ


Ми, що нижче підписались, представники ДП «АНТОНОВ» та представники акустичної лабораторії при науково-дослідній частині Національного авіаційного університету (НАУ) в особі наукового керівника лабораторії проф. Запорожця О.І., проф. Токарева В.І., проф. Барабаша О.В., мол. наук. співроб. Макаренко В.М., ст. наукового співробітника Берегового О.М., аспіранта Пекуровського Г.В., аспіранта Ю.С.Шевченко склали цей акт про те, що результати НДР №728-ДБ11 „Оптимізація акустичних характеристик авіаційних панелей з використанням інтелектуальних технологій” впроваджені у вигляді методики розрахунку структурно-акустичних характеристик панелей фюзеляжу на базі результатів експериментальних досліджень проходження звуку крізь панелі після проведеної оптимізації їх акустичних характеристик.


Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний та ін.	Економічний(грн.. за рік)
Методика розрахунку структурно-акустичних характеристик панелей фюзеляжу на базі результатів експериментальних досліджень проходження звуку крізь панелі після проведеної оптимізації їх акустичних характеристик	Розроблені алгоритми розрахунку звукоізоляції авіаційних панелей з силовим набором дозволяють виконати оптимізацію звукоізоляції панелей за допомогою точкових мас. Застосування програмного продукту для розрахунків оптимальної звукоізоляції панелі дозволяє підвищити її ефективність при полігармонічному зовнішньому акустичному збудженні від гвинтів турбогвинтового повітряного судна. Підвищення звукоізоляції складає 6,8 дБ при загальній додатковій масі рівній 20% від маси конкретної панелі; 6 дБ – при додатковій масі 10%; 4,6 дБ – при додатковій масі 5%. Розроблені алгоритми активних методів автоматичного управління вібраційного навантаження механічних конструкцій. Ефективність даного методу зниження вібраційного прискорення на об'єкті управління досягає 2,9 дБ.	Не розраховувався


Від ДП «АНТОНОВ»

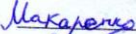

В.С. Прасолов

Від НАУ

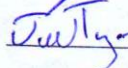

О.І. Запорожець

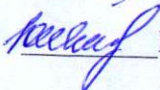

В.І. Токарев


О.В. Барабаш


В.М. Макаренко


О.М. Береговий


Г.В. Пекуровський


Ю.С. Шевченко

„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Головний інженер
ДП «Вінницький авіаційний завод»
О.В. Вірусов
« 24 » 09 2012 р.


АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, головний інженер Державного підприємства «Вінницький авіаційний завод» Вірусов О.В., головний технолог Терентюк Б.О., начальник дільниці Александров К.В. та представники акустичної лабораторії при науково-дослідній частині Національного авіаційного університету (НАУ) в особі наукового керівника лабораторії проф. Запорожця О.І., проф.Токарева В.І., проф. Барабаша О.В., мол. наук. співроб. Макаренко В.М., ст.наукового співробітника О.М.Берегового, мол.наукового співробітника Ю.С.Шевченко склали цей акт про те, що результати НДР №498-ДБ08 „Зниження шуму механічних систем із застосуванням пасивних і активних інтелектуальних методів та технологій” упроваджені у вигляді методики оптимізації акустичних характеристик, яка застосовувалась для розрахунку шумозахисних панелей встановлених на дільницях та у цехах заводу з високими рівнями виробничого шуму.

Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний та ін.	Економічний (грн.. за рік)
Методика оптимізації акустичних характеристик панелей на дільницях та у виробничих приміщеннях з високими рівнями виробничого шуму	Розроблена методика оптимізації акустичних характеристик дозволила значно покращити шумозахисні характеристики панелей без їх істотної переробки за допомогою встановлення додаткових мас в розрахованих точках. та отримати рішення задач оптимального розподілу мас на панелях. Розрахункові і експериментальні результати впровадження показали зменшення рівня звукового тиску в середньому на 5-6 дБ. у широкій смузі частот та на 4,5 дБ у діапазоні частот 50 – 180 Гц, що поліпшило умови	Не розраховувався

	праці та знизило рівень акустичного забруднення навколишнього виробничого середовища.	
--	---	--


Від ДП «Вінницький авіаційний завод»


О.В. Вірусов


Б.О. Терентюк


К.В. Александров

Від НАУ


О.І. Запорожець


В.І. Токарев


О.В. Барабаш


В.М. Макаренко


О.М. Береговий


Ю.С. Шевченко

„ЗАТВЕРДЖУЮ”



Генеральний директор

Аерокосмічної агенції „МАГЕЛЛАН”

В.І. Присяжний

11 2010 р.

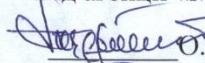
АКТ УПРОВАДЖЕННЯ


Ми, що нижче підписались, виконавчий директор Аерокосмічної агенції „МАГЕЛЛАН” Щербаков О.П., технічний директор Сушко В.Г та представники акустичної лабораторії при науково-дослідній частині Національного авіаційного університету (НАУ) в особі наукового керівника лабораторії проф. Запорожця О.І., проф. Токарева В.І., проф. Барабаша О.В., мол. наук. співроб. Макаренко В.М., ст.наукового співробітника О.М.Берегового, мол.наукового співробітника Ю.С.Шевченко склали цей акт про те, що результати НДР №498-ДБ08 „Зниження шуму механічних систем із застосуванням пасивних і активних інтелектуальних методів та технологій” упроваджені у вигляді методики оптимізації акустичних характеристик в герметичних кабінах повітряних суден шляхом застосування пасивних засобів зниження шуму.

Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний та ін.	Економічний (грн.. за рік)
Методика оптимізації акустичних характеристик в герметичних кабінах повітряних суден шляхом застосування пасивних засобів зниження шуму	Розроблена адаптована програма на ПЕВМ генетичного алгоритму дозволяє отримати рішення задач оптимального розподілу мас на пластинах. Розрахункові і експериментальні результати досліджень показали зменшення рівня звукового тиску на 4.5 дБ у діапазоні частот 50 – 180 Гц для оптимального розподілення концентрованої маси. Співвідношення між розрахованими і експериментальними даними вказують на задовільну адекватність результатів. Розроблена методика дозволяє використовувати пасивні методи зниження шуму в критичних щодо шуму зонах акустичного	Не розраховувався


	навантаження в кабінах повітряних суден.	
--	--	--


Від агенції «Магеллан»


 О.І.Щербаков

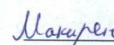
 В.Г.Сушко


Від НАУ


 О.І. Запорожець

 В.І. Токарев

 О.В. Барабаш

 В.М. Макаренко

 О.М.Береговий

 Ю.С.Шевченко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ДП "ДерждорНДІ"

В.М.Нагайчук

« 06 » 11 2012 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, перший заступник директора з наукової роботи Державного підприємства "Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна" (ДП "ДерждорНДІ") Вирожемський В.К., завідувач відділу екологічних досліджень Коротченко М.В. та представники акустичної лабораторії при науково-дослідній частині Національного авіаційного університету (НАУ) в особі наукового керівника проф. Токарева В.І., мол. наукового співробітника Шевченко Ю.С., ст. наукового співробітника Берегового О.М., мол. наукового співробітника Макаренко В.М., асистента Кажан К.І. склали цей акт про те, що результат НДР № 622-Х09 «Обґрунтувати аналітичні матеріали для рекомендацій щодо проектування екранів для захисту від впливу дорожнього шуму» упродовжені у вигляді Рекомендацій щодо проектування шумозахисних екранів Р В. 2.3-218-03450778 – 769:2010.

Назва упродовженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний та ін.	Економічний (грн. за рік)
Р В. 2.3-218-03450778 – 769:2010 Рекомендації щодо проектування шумозахисних екранів	Розроблені рекомендації щодо проектування шумозахисних екранів на автомобільних дорогах України спрямовані на зменшення негативного впливу шуму на навколишнє середовище, забезпечення виконання нормативних вимог до матеріалів і конструкцій шумозахисних екранів, забезпечення архітектурного вигляду шумозахисних екранів, забезпечення необхідної надійності й довговічності шумозахисних	Не розраховувався


	<p>екранів, зменшення витрат на експлуатацію шумозахисних екранів.</p> <p>Експериментальні дослідження та розрахункові моделі показали можливість зменшення шумового навантаження у широкій смузі частот, що дозволить досягти нормативних показників рівнів шуму на території житлової забудови відповідно до національного законодавства.</p>	
--	---	--

Від ДП «ДерждорНД»

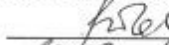


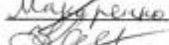

Перший заступник директора з наукової роботи

 В. К. Вирожемський

Завідувач відділу екологічних досліджень

 М. В. Коротченко

Від Національного авіаційного університету

 В.І. Токарев
 Ю.С. Шевченко
 О.М. Береговий
 В.М. Макаренко
 К.І. Кажан

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Міський голова



П. І. Курляк

« 06 » / 06

2013 р.

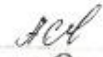


АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, представники міськради Бурштина

та представники науково-дослідної частини Національного авіаційного університету (проф. Запорожець О.І., проф. Мовчан Я.І., мол. науковий співробітник Шевченко Ю.С.) склали цей акт про те, що результат НДР № 661-ДБ11 «Наукові засади, методологія та рекомендації щодо оптимізації міської інфраструктури в контексті впливу на довкілля» використані при плануванні заходів для розвитку м. Бурштин до 2015 року.

Назва упровадженого результату	Досягнутий фактичний результат	
	Соціальний, технічний, організаційний та ін.	Економічний (грн. за рік)
Карта шумового забруднення міста	На основі проведених експериментальних досліджень, а також подальшого використання математичної моделі розрахунку рівнів шуму в міському середовищі була розроблена карта шумового забруднення м. Бурштин з метою ідентифікації зон житлової забудови, де є перевищення фактичних рівнів шуму над нормативними показниками рівнів шуму на території житлової забудови відповідно до національного законодавства. Аналіз стану акустичного середовища міста дозволив рекомендувати ряд заходів по зниженню шумового навантаження на населення. Результати проведених досліджень були використані при розробці проекту Концепції комплексного розвитку міста Бурштин на період до 2015 р.	Не розраховувався

Від Бурштинської міської ради

 В. М. Кощинич
 М. С. Назар
 П. І. Остафійчук

Від Національного авіаційного університету

 О. І. Запорожець
 Я. І. Мовчан
 Ю. С. Шевченко



