

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ШЕВЧЕНКО ЮЛІЯ СЕРГІЇВНА



УДК 504.055:004.942(043.3)

**РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ШУМУ
ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ**

21.06.01 – Екологічна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті, Інститут екологічної безпеки, Кафедра безпеки життєдіяльності

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Токарев Вадим Іванович,
Національний авіаційний університет,
Інститут екологічної безпеки,
кафедра безпеки життєдіяльності

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Чумаченко Сергій Миколайович,
НДЦ інноваційних технологій,
начальник відділу моделювання надзвичайних ситуацій

кандидат технічних наук, доцент,
Цюман Микола Павлович,
Національний транспортний університет,
Автомеханічний факультет,
доцент кафедри двигунів і теплотехніки

Захист дисертації відбудеться « 17 » березня 2016 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету, просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ -58, корп.8

Автореферат розісланий « 16 » лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Матвєєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 багатопверхових 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 обгрунтоване 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-Х09 «Обгрунтувати 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. Контри рівнів шуму нанесені на план житлової забудови за

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

Наукова новизна дисертаційної роботи 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».

Практичне значення отриманих результатів досліджень:

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-технічній 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-технічній 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; міжнародний науковий семінар «Управление безопасностью сложных систем», Liptovský Mikuláš – Krakov – Киев 2013; 11-тій Міжнародній науково-технічній 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. Робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку літератури та додатків. Повний обсяг дисертації – 236 сторінок, із яких 71 сторінок займають ілюстрації, таблиці, додатки та список використаних джерел, що містить 193 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтована актуальність розв’язуваної задачі, сформульована мета, наукове завдання дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів роботи, зв’язок її з науковими програмами та планами НДР, наведені використані методи дослідження, технічні та програмні засоби, визначено особистий внесок здобувача у надрукованих роботах,

представлена інформація щодо апробації та публікації результатів дисертації, наведений короткий зміст дисертації.

У першому розділі розглянутий стан проблем моделювання шумового навантаження сучасних міст як фактора екологічної безпеки в результаті впливу автомобільного транспорту та критерії його оцінки. Проаналізовано основні етапи моделювання від генерування шуму транспортними потоками до оцінювання впливу фактичних рівнів шуму в приймачі, а також методи зниження шумового навантаження в умовах житлової забудови.

Виділено такі основні етапи оцінювання рівнів шуму в точці прийому, як:

- моделювання рівнів шуму окремого транспортного засобу як точкового некогерентного джерела шуму та інтегрування автомобілів в потоці, як лінійного некогерентного джерела шуму;

- моделювання руху автомобілів в потоці та залежності між характеристиками руху потоку та його акустичними характеристиками (виділено наукові ідеї Е. Саломонса, А. Кана, макроскопічні моделі Гріншілда, Грінберга, Андервуда та Едді для подальшого розвитку в дослідженнях дисертаційної роботи);

- аналіз моделювання ефектів зниження/підвищення шуму в результаті поширення на території житлової забудови дозволив виявити основні напрямки роботи по вдосконаленню існуючих підходів, а саме виявити ефекти поширення звукових хвиль характерні для території міста та такі, що потребують подальшого доопрацювання з метою підвищення точності оцінювання їх впливу на екологічну безпеку міста. Аналіз основних напрямків досліджень показав, що сьогодні найбільшу увагу приділяють дослідженню впливу імпедансних характеристик вертикальних та горизонтальних поверхонь відбивання на формування звукових полів, а також ефектам дифракції на перешкодах різного характеру.

При аналізі існуючих моделей впливу додаткових відбиттів досліджено наукові ідеї Ж Піко, Дж. Канга, М. Хорнікса, К. Ю, Д. Хаймана, Т. Ван Рентергема. Розглянуто дифузні та дзеркальні відбиття від фасадів будівель та визначено, що для напівнескінченних відбивачів значних розмірів з низькою нерегулярністю поверхонь, якими є фасади будівель, слід дотримуватися підходу геометричних відбиттів від поверхонь фасадів. Модель К. Хопкінса виділена для подальшого розвитку в дисертаційній роботі, як така, що дозволяє розглядати джерело шуму як непостійне широкосмугове джерело шуму, яким є транспортний потік.

Дослідження моделювання ефектів дифракції на кромках акустичних екранів різних розмірів проведено за роботами З. Маєкави, У. Куце-Андерсона, А. Пірса та В. Хаддена, К.-М. Лі та ін. Встановлено необхідність доопрацювання існуючих моделей оцінки для положень джерела шуму та приймача біля поверхні акустичних екранів, що є характерним для міського середовища. Для акустичного екрану кінцевих розмірів показано, що існуючий підхід заміни на відповідний тонкий еквівалентних розмірів акустичний екран може давати похибки до 7 дБ в низькому діапазоні частот.

Обґрунтовано необхідність розробки методу ранжування методів зниження шуму для досягнення їх раціонального використання з токи зору екологічної безпеки та економічної ефективності.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі шуму транспортних потоків (ММШТП), яка дозволяє оцінювати рівні шуму в

діапазоні експлуатаційних швидкостей та інтенсивностей руху транспортних потоків, що відповідає умовам формування заторів на автомобільних шляхах міста.

Для врахування розподілу окремих автомобілів на лінії джерела шуму при моделюванні рівнів шуму транспортних потоків використано принципи макроскопічного моделювання руху автомобілів в потоці.

Запропонована математична модель шуму транспортних потоків містить три функціональні блоки: моделювання акустичної потужності окремого автомобільного транспортного засобу (в якості базової взято Європейську модель Harmonoise); встановлення макроскопічних залежностей між щільністю, інтенсивністю та швидкістю руху автомобілів в потоці; моделювання еквівалентних рівнів шуму від транспортних потоків. Вперше було введено принципи макроскопічного моделювання в акустичне моделювання шуму транспортних потоків.

Еквівалентний рівень шуму в точці прийому L_{Aeq} визначено як суму чисельно проінтегрованої акустичної потужності лінійного джерела шуму (відрізку автомобільного шляху), що складається з точкових джерел шуму в токах z_j – окремих транспортних засобів (перший доданок в формулі (1)) та характеристики розподілу транспортних засобів на лінії джерела шуму, що визнається як залежність між щільністю, швидкістю та інтенсивністю руху

автомобілів в потоці $\rho(z) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{Q(z,t)}{v(z,t)} dt$ (другий доданок в (1)):

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

де індекс j змінюється від $z = z_1$ до $z = z_2$ через невеликий суміжний інтервал δz_j , $\rho(z)$ – залежність густини потоку від координати положення на лінії джерела шуму, L – рівень звукового тиску в точці приймача від j сегменту джерела шуму.

Для встановлення границь застосування ММШТП апробацію проведено в м. Бурштин (невелике місто з інтенсивністю руху автомобілів в потоці < 1000 авт./год.) та м. Київ (велике місто з інтенсивністю руху автомобілів в потоці > 4000 авт./год.).

Результати проведених досліджень встановили, що ММШТП при моделюванні рівнів шуму проїздів окремих автомобілів дає більшу достовірність при $v \geq 40$ км/год. для всіх типів автомобілів (абсолютна похибка моделювання $E_{abs} < 1,5$ дБА). Підтверджено, що ММШТП дозволяє проводити моделювання шуму транспортних потоків з інтенсивністю більше 1000 авт./год. з $E_{abs} = 2,5$ дБА та з інтенсивністю більше 4000 авт./год. з $E_{abs} < 1,5$ дБА. При моделюванні невеликих транспортних потоків менше 400 авт./год. в ММШТП можливо вводити поправки, що враховують склад автомобільного парку та інтенсивність потоку.

Для ілюстрації ефективності ММШТП в умовах формування заторів на автомобільних шляхах, проведено апробацію макроскопічних залежностей руху транспортних потоків для ділянки автомобільного шляху Чоколівського

бульвару м. Києва довжиною 500 м, як прикладу типового міського автомобільного шляху.

Встановлено, що крива залежності швидкості руху потоку від щільності руху потоку є монотонно спадаючою, а також, що при швидкостях зростання щільності руху потоку на досліджуваній ділянці 0,2 авт./од. довжини на сегмент (I смуга руху, рис. 1, а) залежність між щільністю та швидкістю потоку є лінійною, тоді як при зростанні швидкості накопичення автомобілів на ділянці (II смуга, рис. 1, б та III смуга, рис. 1, в) залежність переходить в експоненційну. Точність моделювання знижується при наближенні до сегменту, де розташований світлофор, що визначається як сегмент з високою густиною потоку 4–5 авт./од. довжини та швидкостями 20–30 км/год (відносна похибка зростає до 14 %).



Рис. 1. Макроскопічні залежності швидкості руху від густини потоку:
а – перша смуга, б – друга смуга, в – третя смуга руху

Параметричне дослідження впливу умов руху автомобілів в потоці за допомогою ММШТП продемонструвало чутливість результатів моделювання L_{Aeq} до макроскопічних та експлуатаційних характеристик руху потоку (швидкості руху, інтенсивності руху, прискорення, категорії транспортних засобів, градієнту дороги). Найбільший вплив на рівні шуму створюють швидкість, інтенсивність руху транспортних засобів та прискорення. Досліджено діапазон можливих значень швидкості 10...100 км/год, інтенсивності транспортного потоку 500...5000 авт./год., прискорення -2,0...2,0 м/с².

При підвищенні швидкості на 10 км/год. підвищення рівня шуму $\Delta L_{Aeq} = 2...3$ дБА для окремих легкових автомобілів, $\Delta L_{Aeq} = 1,5...2$ дБА для окремих важких транспортних засобів та $\Delta L_{Aeq} = 1...2$ дБА для швидкості руху автомобілів в вільному потоці. Встановлено, що швидкість зростання рівнів шуму спадає при збільшенні інтенсивності транспортного потоку від $\Delta L_{Aeq} = 5$ дБА при збільшенні потоку від 400 до 1000 авт./год. до $\Delta L_{Aeq} = 1,5$ дБА при збільшенні потоку від 1600 до 2200 авт./год.. Збільшення прискорення на 1 м/с² дає $\Delta L_{Aeq} = 5$ дБА. Використання пористих дорожніх покриттів дозволяє знизити рівень шуму на 1,5...2 дБА.

ММШТП впроваджена як складова програмного продукту Комп'ютерна програма «Розрахунок рівнів звукового тиску в приймачі для міського середовища» USScape1.0 для оцінювання акустичного навантаження від транспортних потоків.

Третій розділ присвячений ефектам поширення шуму від джерела до приймача. Досліджені 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. В даному розділі розроблена математична модель впливу додаткових відбиттів від вертикальних імпедансних поверхонь на формування звукового поля в міському середовищі та удосконалені моделі оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану (ТАЕ) та акустичного екрану кінцевих розмірів (АЕКР), розташованих на імпедансній поверхні землі.

Для оцінювання зміни шумового навантаження на населення міст в результаті додаткових відбиттів від одного та двох паралельних фасадів будівель розроблено математичну модель впливу додаткових відбиттів від фасаду будівлі на основі методу уявних джерел та моделі Хопкінса шляхом внесення коефіцієнту відбиття для сферичних звукових хвиль Q , що дозволило досліджувати різні за імпедансними характеристиками поверхні землі та фасаду будівлі. Для оцінювання впливу відбиттів від фасадів враховано звукові промені для відстаней d_1-d_4 при моделюванні одного фасаду будівлі та відстані d_1-d_6 при моделюванні паралельних фасадів (рис. 2).

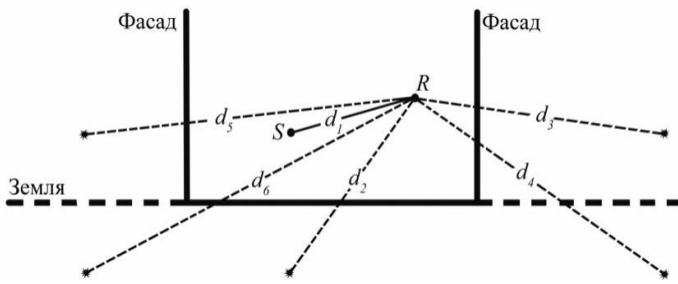


Рис. 2. Розрахункова схема моделювання звукового поля між фасадами будівель, S – джерело шуму, R – приймач шуму, $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ – відстані, що проходять звукові промені

Для оцінювання зміни РЗТ $\Delta L_{refl} = 20 \lg \left\langle \frac{p_\Sigma^2}{(p_1 + p_2)^2} \right\rangle$ перед фасадом/ами

будівлі відносно РТЗ 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 p між паралельними фасадами будівлі записано як:

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

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.

Для апробації математичної моделі впливу відбиттів від фасадів будівель проведені вимірювання рівнів звукового тиску для 1/3 октавної смуги частот перед 9 корпусом Національного авіаційного університету (шум генерувався зразковим джерелом шуму на чистому тоні) та виконано чисельне моделювання методом кінцевих елементів (МКЕ) за допомогою програмного пакету Comsol Multiphysics.

Підтверджено достовірність розробленої математичної моделі для абсолютно жорстких поверхонь з $E_{abs} = 1,5$ дБ в діапазоні частот 63...250 Гц та з $E_{abs} = 2...3$ дБ для діапазону частот 315...1000 Гц (рис. 3), на відміну від класичної променевої моделі (КМП), для якої $E_{abs} = 10$ дБ.

З метою виявлення меж застосування моделі для імпедансних поверхонь проведено чисельне моделювання за допомогою МКЕ. Аналіз результатів, отриманих для різних імпедансних поверхонь, встановив, що при зменшенні опору продуванню повітрям (рис. 4, а-в) математична модель впливу додаткових відбиттів дає відповідність експериментальним даним в діапазоні частот 50...160 Гц з $E_{abs} \approx 1,5$ дБ та для діапазону 200...1000 Гц з $E_{abs} = 3...4$ дБ.

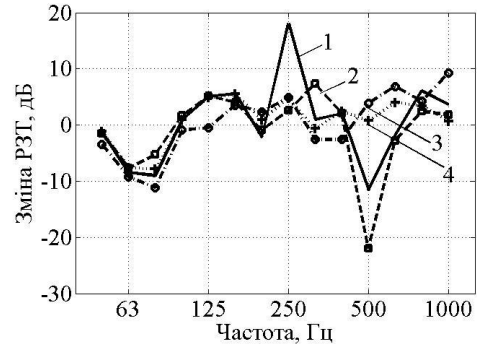


Рис. 3. Зіставлення розрахованих ΔL_{refl} для абсолютно жорстких поверхонь фасаду та поверхні землі: 1 – КМП методом уявних джерел; 2 – МКЕ; 3 – експериментальні вимірювання; 4 – розроблена математична модель впливу додаткових відбиттів

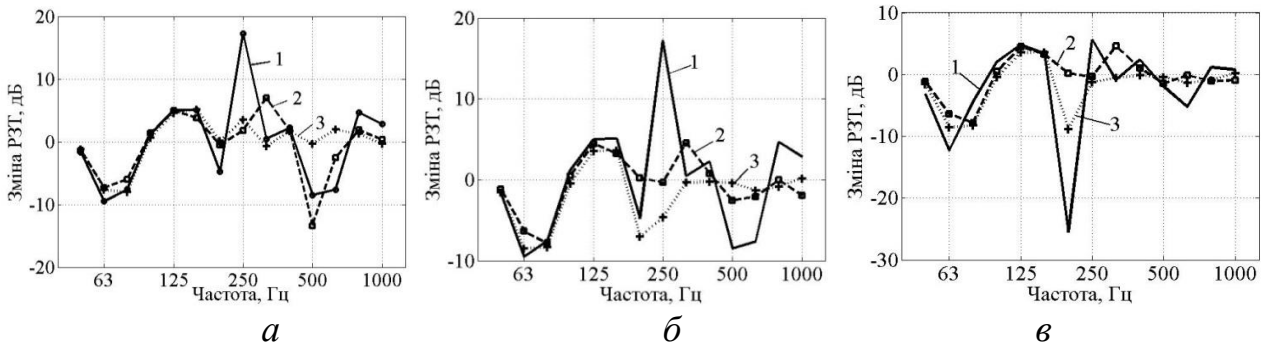


Рис. 4. Порівняння розрахованих значень зміни рівнів звукового тиску перед фасадом будівлі для різних імпедансних поверхонь: а – опір продуванню поверхні землі становить 20 000 кНс/м⁴ та 630 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; б – опір продуванню поверхні землі становить 20 000 кНс/м⁴ та 100 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; в – опір продуванню поверхні землі становить 630 кНс/м⁴ та 100 кНс/м⁴ для поверхні фасаду; 1 – КМП метод уявних джерел; 2 – МКЕ; 3 – розроблена математична модель впливу додаткових відбиттів

Для виявлення закономірностей шумового навантаження на вулицях міста проведено параметричне дослідження за допомогою розробленої моделі впливу додаткових відбиттів. Досліджувався діапазон можливих значень ширини вулиці $W_{str} = 20...120$ м та висоти вулиці $H_{str} = 1,2...50$ м. Встановлено, що для $W_{str} > 100$ м та $H_{str} < 30$ м вплив відбиттів від фасадів будівель зводиться до мінімуму та складає $\Delta L_{refl} < 1$ дБ у вузькому діапазоні частот 125...250 Гц.

Максимальний вплив спостерігається для $W_{str} < 50$ м та $H_{str} > 20$ м та може досягати $\Delta L_{refl} = 5 \dots 10$ дБ для верхніх поверхів (вище 5-го поверху). Основний вклад додаткових відбиттів спостерігається в діапазоні низьких частот 25...250 Гц для поверхів вище 5-го, для пішоходів та 1–2 поверхів – також характерним є підвищення рівнів шуму $\Delta L_{refl} = 1 \dots 2$ дБ в діапазоні 250...1000 Гц. Дослідження імпедансних характеристик поверхні землі та фасадів будівель для діапазону $\sigma_{землі} = 200 \dots 20000$ кНс/м⁴ та $\sigma_{фасаду} = 200 \dots 20000$ кНс/м⁴ встановило, що при абсолютно жорстких поверхнях землі (характерно для асфальтових дорожніх та вуличних покриттів) покриття фасадів будівель матеріалами зі звукопоглинаючими характеристиками дозволить знизити підвищення шуму на 2...5 дБ в діапазоні частот 250...8000 Гц.

Для оцінювання ефективності акустичних екранів за умови, коли джерело шуму або приймач знаходяться в безпосередній близькості від поверхні акустичного екрану (типове розташування у міському середовищі) удосконалено математичні моделі оцінювання ефективності ТАЕ та АЕКР.

В роботі вперше враховано додаткові шляхи поширення звукових хвиль через бокові кромки екранів, а також розташування екранів на поверхні землі, що має різні імпедансні характеристики. Достовірність моделей підтверджена для всього діапазону частот з $E_{abs} = 2 \dots 3$ дБ для ТАЕ та уточненням моделювання зниження шуму АЕКР в діапазоні частот 25...250 Гц з $E_{abs} = 1,5 \dots 2$ дБ.

Ефективність акустичних екранів $\Delta L_{\text{екр}} = -10 \lg \left| \frac{p_{\text{с}}}{p_{\text{а}}} \right|^2$ визначається як різниця сумарного зниження шуму без встановлення екрану $\Delta L_{\text{б/екр}}$ та з встановленим екраном $\Delta L_{\text{з/екр}}$:

$$\Delta L_{\text{б/екр}} = \Delta L_{\text{div}_\text{б/екр}} + \Delta L_{\text{abs}_\text{б/екр}} - \Delta L_{\text{ground}_\text{б/екр}} - \Delta L_{\text{refl}_\text{б/екр}} + \Delta L_{\text{green}_\text{б/екр}},$$

$$\Delta L_{\text{з/екр}} = \Delta L_{\text{scr}_\text{з/екр}} + \Delta L_{\text{div}_\text{з/екр}} + \Delta L_{\text{abs}_\text{з/екр}} - \Delta L_{\text{ground}_\text{з/екр}} - \Delta L_{\text{refl}_\text{з/екр}} + \Delta L_{\text{green}_\text{з/екр}}$$

В роботі запропоновано записувати РЗТ за ТАЕ з врахуванням додаткових шляхів поширення звукових променів (рис. 5) як:

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} = & p(SER) + Q_S p(S_i ER) + Q_R p(SER_i) + Q_S Q_R p(S_i ER_i) \\ & + p(SE_n R) + Q_S p(S_i E_n R) + Q_R p(SE_n R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_n R_i) \\ & + p(SE_l R) + Q_S p(S_i E_l R) + Q_R p(SE_l R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_l R_i) \end{aligned}$$

Таким чином, зниження шуму завдяки ефектам дифракції на кромках визначено як:

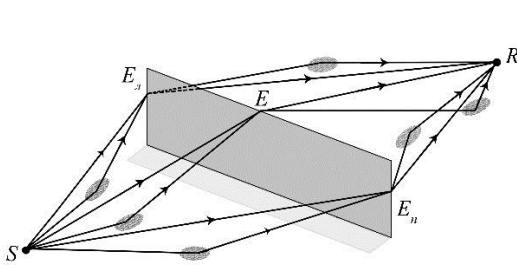


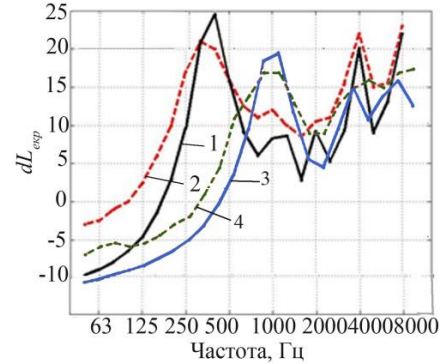
Рис. 5. Формування променевої картини для тонкого акустичного екрану кінцевої довжини на імпедансній поверхні

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{scr}_\text{очн}} &= 10 \lg \left[\begin{aligned} & 10^{-0.1\Delta L_1(SER)} + 10^{-0.1\Delta L_2(S_i ER)} \\ & + 10^{-0.1\Delta L_3(SER_i)} + 10^{-0.1\Delta L_4(S_i ER_i)} \end{aligned} \right] \\ \Delta L_{\text{scr}_\text{н}} &= 10 \lg \left[\begin{aligned} & 10^{-0.1\Delta L_5(SE_n R)} + 10^{-0.1\Delta L_6(S_i E_n R)} \\ & + 10^{-0.1\Delta L_7(SE_n R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_8(S_i E_n R_i)} \end{aligned} \right] \\ \Delta L_{\text{scr}_\text{л}} &= 10 \lg \left[\begin{aligned} & 10^{-0.1\Delta L_9(SE_l R)} + 10^{-0.1\Delta L_{10}(S_i E_l R)} \\ & + 10^{-0.1\Delta L_{11}(SE_l R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_{12}(S_i E_l R_i)} \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

Виявлено, що удосконалена математична модель ТАЕ дає якісну

відповідність в усьому діапазоні частот. При положенні приймача в зоні акустичної тіні та невеликих відстанях між джерелом шуму та приймачем (3,5 м) $E_{abs} = 2...4$ дБ, при значних відстанях між джерелом та приймачем (100 м) та при положенні приймача на границі зони акустичної тіні в області низьких частот може досягати $E_{abs} = 7$ дБ.

Рис. 6. 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



Для оцінювання ефективності АЕКР в роботі вперше рішення Pierse-Nadden інтегровано в удосконалену модель ТАЕ. Звідси, рівень звукового тиску за АЕКР запропоновано записувати як:

$$p_{\Sigma} = p(SE_S E_R R) + Q_S p(S_i E_S E_R R) + Q_R p(SE_S E_R R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_S E_R R_i) + p(SE_{Sn} E_{Rn} R) + Q_S p(S_i E_{Sn} E_{Rn} R) + Q_R p(SE_{Sn} E_{Rn} R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_{Sn} E_{Rn} R_i) + p(SE_{Sl} E_{Rl} R) + Q_S p(S_i E_{Sl} E_{Rl} R) + Q_R p(SE_{Sl} E_{Rl} R_i) + Q_S Q_R p(S_i E_{Sl} E_{Rl} R_i)$$

Зниження шуму завдяки ефектам дифракції на кромках АЕКР визначено для верхньої, лівої та правої крамок (рис. 7) як:

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

$$\Delta L_{scr_n} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_5(SE_{nS} E_{nR} R)} + 10^{-0.1\Delta L_6(S_i E_{nS} E_{nR} R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_3(SE_{nS} E_{nR} R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_4(S_i E_{nS} E_{nR} R_i)} \end{array} \right]$$

$$\Delta L_{scr_л} = 10 \lg \left[\begin{array}{l} 10^{-0.1\Delta L_1(SE_{nS} E_{nR} R)} + 10^{-0.1\Delta L_2(S_i E_{nS} E_{nR} R)} \\ + 10^{-0.1\Delta L_3(SE_{nS} E_{nR} R_i)} + 10^{-0.1\Delta L_4(S_i E_{nS} E_{nR} R_i)} \end{array} \right]$$

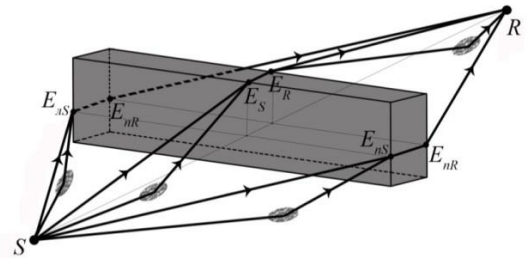


Рис. 7. Формування променевої картини для екрану кінцевих

розмірів на імpedансній поверхні. Для верифікації удосконаленої моделі АЕКР проведено порівняння результатів моделювання з стандартною моделлю для АЕКР та результатів чисельного моделювання в прикладному пакеті Comsol Multiphysics (рис. 8).

Підтверджено, що як для ТАЕ, так і для АЕКР спостерігається підвищення ефективності зниження шуму зі збільшенням частоти звукових хвиль, для частот вище 1000 Гц часткове зниження ефективності пояснюється впливом ефектів інтерференції при відбиванні від поверхні землі.

Удосконалена модель АЕКР 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.

Для вибору найефективніших характеристик та умов встановлення АЕ проведено параметричні дослідження за допомогою моделей ТАЕ та АЕКР.

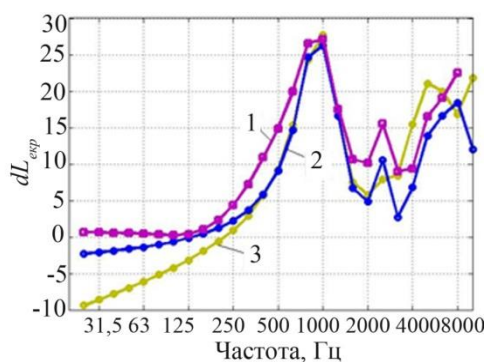


Рис. 8. Порівняння результатів моделювання зниження шуму АЕКР: 1 – чисельне моделювання, 2 – удосконалена модель на основі формули Пірса, 3 – стандартна модель для акустичного екрана кінцевої товщини (заміна АЕКР еквівалентним тонким екраном)

поверхні після екрану визначає зміни в ефективності екрану до $\Delta L_{екр} = 5$ дБ для діапазону частот 200...4000 Гц.

Розроблена удосконалена математична модель ефективності ТАЕ реалізована у рекомендаціях щодо проектування шумозахисних екранів.

Четвертий розділ 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.

Запропонована комплексна модель рівнів шуму, що реалізована у вигляді програмного продукту USScape1.0, складається з трьох функціональних блоків: ММШТП; моделювання поширення шуму від джерела до приймача з використанням авторських моделей оцінювання додаткових відбиттів та ефективності АЕ для кожного сегменту лінії джерела шуму та положення приймача та врахуванням характеристик профілю поширення шуму; чисельне інтегрування рівнів шуму в точці прийому. Завдяки використанню удосконалених в роботі моделей ТАЕ та АЕКР та удосконаленої математичної моделі впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель запропонована комплексна модель вперше дозволила оцінювати змінювані імпедансні характеристики поверхні землі, фасадів будівель та перешкод на шляху

Виявлено, що зміна висоти екрану дозволяє коригувати його ефективність $\Delta L_{екр}$ лише в діапазоні частот 63...2000 Гц. Найвищі значення $\Delta L_{екр}$ 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 $\Delta L_{екр} = 20$ дБ та до $\Delta L_{екр} = 30$ дБ відповідно для діапазону частот 4000...8000 Гц та $\Delta L_{екр} = 5..10$ дБ та $\Delta L_{екр} = 10..15$ дБ для діапазону частот 31.5...2000 Гц відповідно. Зміна імпедансних характеристик поверхонь до екрану викликає незначні зміни в ефективності екрану на $\Delta L_{екр} = 1..3$ дБ лише для діапазону високих частот 2500...10000 Гц, зміна характеристик

поширення звуку для кожного положення приймача як в горизонтальному, так і в вертикальному перерізах.

Для верифікації USScape1.0 використано результати чисельного моделювання формування звукових полів при поширенні через кромки паралельних АЕКР МКЕ за допомогою програмного продукту Comsol Multiphysics (рис. 9). Границя застосування розробленої моделі для трьох рядів забудови обмежує частоти, вищі 2000 Гц. Проте при моделюванні шуму транспортних потоків основний інтерес представляють саме низькі та середні частоти.

Метою вертикального картографування рівнів шуму є виявлення перевищень над допустимими рівнями шуму для всіх поверхів будівель та ефективність використання методів зниження шуму для різних поверхів.

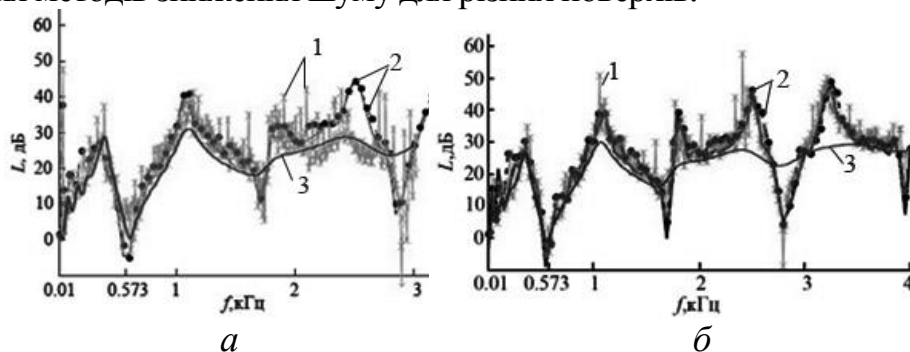


Рис. 9. Результати чисельного моделювання: 1 – МКЕ, 2 – результати Min, 2008, 3 – USScape1.0; а – для двох паралельних АЕКР; б – для трьох паралельних АЕКР

На основі комплексної моделі рівнів шуму в міському середовищі метод картографування шуму удосконалений шляхом використання принципів динамічного картографування, що дозволило в процесі створення контурів шуму проводити адаптацію USScape 1.0 через верифікацію шляхом проведення експериментальних досліджень та введення поправок на склад автомобільного парку регіону та характеристики дорожніх покриттів.

В дисертаційному дослідженні обґрунтовано застосування удосконаленого методу картографування шуму на прикладі горизонтальної карти шуму для зони низької поверхової забудови (рис. 10) та вертикальної карти шуму для високої поверхової забудови (рис. 11) як інструменту забезпечення вимог екологічної безпеки.

Для створення горизонтальної карти шуму м. Бурштин (рис. 10) як елемента екологічної концепції розвитку міста USScape1.0 була адаптована шляхом введення поправок на стан дорожніх покриттів та автомобільний парк місцевості. Застосування результатів моделювання

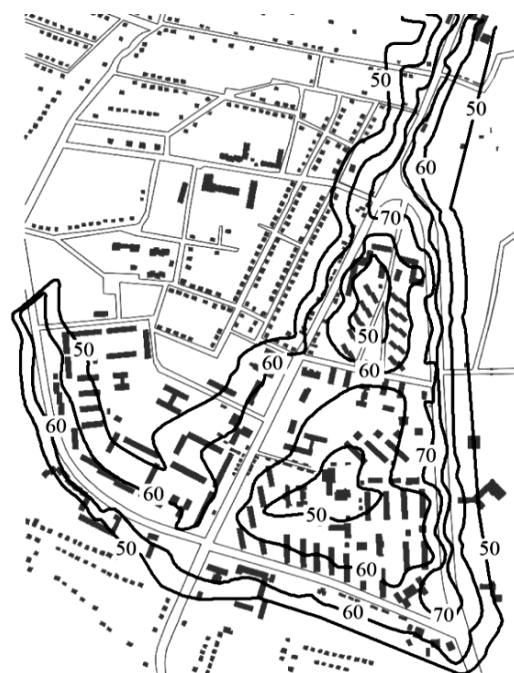


Рис. 10. Двовимірна горизонтальна карта шуму м. Бурштин: 50, 60 та 70 – контури рівного шуму в дБА

дозволило розраховувати РЗТ в точці прийому з точністю 2 дБ та в порівнянні з існуючими методами картографування підвищити точність моделювання зниження шуму на 1,5 дБ за рахунок врахування додаткових відбиттів від фасадів будівель.

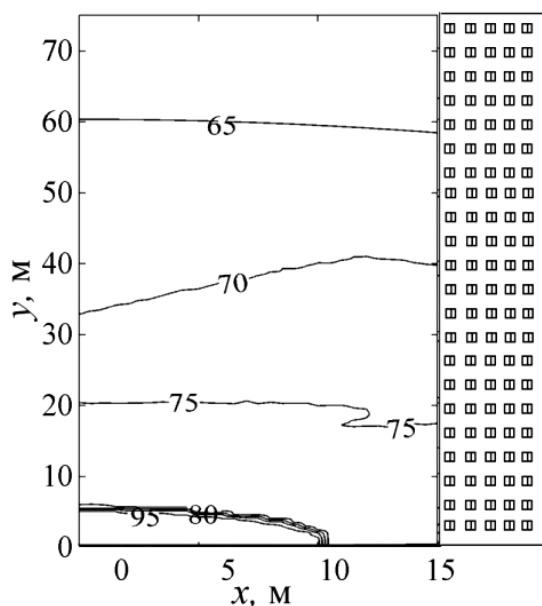


Рис. 11. Контури шуму L_{Aeq} для корпусу 8 НАУ

рис. 11 приведена вертикальна карта шуму для будівлі 8 корпусу Національного авіаційного університету.

На основі вертикальної карти шуму встановлено, що для досліджуваного розташування автомобільної дороги та фасаду будівлі підвищення шуму за рахунок впливу додаткових відбиттів від фасадів становить 4...5 дБ та характерне для поверхів з 1-го по 9-ий. Для 10-го та вище поверхів переважає ефект дивергенції звукових хвиль. Аналіз спектральних залежностей РЗТ для кожного дозволив виявити перевищення над допустимим значеннями для діапазону частот 500...4000 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 виявлено перевищення над допустимим значенням для всіх поверхів з максимальним перевищенням до 20 дБА для 3–5-го поверхів.

На відміну від існуючих моделей комплексна модель дозволяє оцінювати рівні шуму не лише перед фасадами будівлі, але і всередині приміщень за рахунок моделювання РЗТ для кожного поверху. Результати оцінювання рівнів шуму всередині навчальних приміщень дозволили виявити перевищення над допустимим значенням (40 дБА) з 3-го (до 15 дБА) по 14-ий (4 дБ) поверхи при звукоізоляції, що відповідає нормативним вимогам. Встановлено, що використання додаткової звукоізоляції дозволить знизити рівні шуму до нормативних, особливо в діапазоні низьких частот, так як саме вони вносять

За допомогою створеної карти шуму (рис. 10) проаналізовано стан акустичного навантаження на населення міста та встановлено, що приблизно для 30% міста спостерігається перевищення санітарно-гігієнічних норм допустимих рівнів шуму 55 дБА для денного періоду доби на територіях, які безпосередньо прилягають до будівель з житловими приміщеннями та навчальними закладами. Застосування зелених насаджень та малошумних дорожніх покриттів як методів зниження шуму дозволить досягти допустимих рівнів шуму для ділянок з $L_{Aeq} > 55$ дБА.

Для аналізу шумового навантаження зони високоповерхової забудови розроблено вертикальні карти шуму для обраних ділянок м. Києва. Як приклад на

основний вклад в перевищення шуму та є характерними для шуму транспортних потоків.

За результатами моделювання за допомогою USScape1.0 встановлено, що для 1–5 поверхів не спостерігається зниження шуму з висотою, а підвищення шуму за рахунок додаткових відбиттів досягає до 5 дБА для верхніх поверхів будівлі для паралельної забудови вулиць.

П'ятий розділ присвячений розробці нового методу ранжування засобів зниження транспортного шуму в житловому приміщенні та на території житлової забудови. Розроблений метод дозволив вперше виділяти найефективніші з точки зору екологічної безпеки та економічної ефективності методи зниження шуму за рахунок використання апріорної оцінки ефективності кожного методу.

Метод ранжування засобів зниження транспортного шуму розроблено на основі ентропійного методу моделювання (табл. 1). Задачу вибору оптимальних засобів зниження шуму розглянуто з позицій аналізу складної системи.

Таблиця 1

Метод ранжування засобів зниження транспортного шуму

Параметри методу	На селітебній території	Всередині приміщень
Критерії оцінки рівнів шуму	$L_{Aeq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T_0} \sum_j \tau_{efi} 10^{0,1L_{A \max i}} \right)$	$L_{Aeq-прим}$
Обмеження щодо зниження рівнів шуму з використанням j -го методу для i -го положення приймача	$\begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^1} = 0 \\ 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^2} = 0 \\ \vdots \\ 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{efm} T_0^{-1} P_j 10^{-0,1\Delta L_j^2} = 0 \end{cases} \quad (2)$	$\begin{cases} \delta L_1 - \sum_j P_j \delta L_j^1 = 0 \\ \delta L_2 - \sum_j P_j \delta L_j^2 = 0 \\ \vdots \\ \delta L_i - \sum_j P_j \delta L_j^i = 0 \end{cases} \quad (3)$
Параметр апріорної оцінки	$\sum_j v_j = 1 \quad (4)$	
Відносний внесок j -го методу зменшення шуму P_j для досліджуваних i точок	$P_j = v_j \exp \left(-\tau_{eff} T_0^{-1} \sum_i \lambda_i 10^{-0,1\Delta L_j^i} - \sum_i \beta_i \delta L_j^i \right) \quad (5)$	

Оптимальні методи зниження шуму визначаються на основі відносного внеску j -го методу зменшення шуму P_j (5) для досліджуваних i точок. В роботі враховано обмеження для зниження шуму на селітебній території (2) та всередині приміщень (3). Параметр апріорної оцінки v_j (4) враховує економічну вартість використання кожного із j методів зниження шуму. Задача зводиться до відшукування множників Лагранжа λ_i та β_i за допомогою систем рівнянь (2) та (3), де $\Delta L_j^1, \Delta L_j^2 \dots \Delta L_j^i$ – значення зниження шуму на селітебній території з використанням j -го методу для i -го положення приймача,

$\delta L_1, \delta L_2, \dots, \delta L_i$ – 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.

Емпіричні рішення залежності ефективного часу звучання τ_{ef} від відстані l від джерела до приймача звукових коливань та швидкості v для автомобілів I категорії $\tau_{ef,1} = 2,19l/v_1$ та для автомобілів II та II категорії $\tau_{ef,2,3} = 2,27l/v_{2,3}$ було отримано за допомогою генетичного алгоритму оптимізації програмного забезпечення MatLab.

Для реалізації розробленого методу запропоновано визначити найефективніші методи зниження шуму для двох сценаріїв зниження шуму всередині приміщення $\delta L = 8$ дБ та $\delta L = 17$ дБ для зони багатоповерхової забудови. δL та ΔL встановлено на основі результатів досліджень перевищення рівнів шуму над гранично допустимими на території житлової забудови за допомогою USScape1.0. Для відшукування P_j використаний оптимізаційний додаток Optimization Toolbox програмного забезпечення MatLab. Для цього проаналізовано два типові випадки: всі приймачі розташовані на рівні одного поверху (кількість положень приймача змінювалась від одного до п'яти з однаковими значеннями δL та ΔL для кожного положення приймача); приймачі розташовані на різних поверхах багатоповерхового будинку (дослідження трьох, чотирьох та п'яти положень приймача з різними значеннями δL та ΔL для кожного положення).

Аналіз розподілу P_j показав, що для зони багатоповерхової забудови найбільший P_j належить встановленню акустичних екранів (рис. 12). 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 встановленню акустичних екранів.

Результати ентропійного моделювання встановили, що при оцінюванні P_j з фактичними вартостями використання методів зниження шуму, найефективнішими з екологічної та економічної точки зору є зменшення інтенсивності транспортного потоку, зниження швидкості транспортного потоку та використання активних вікон.

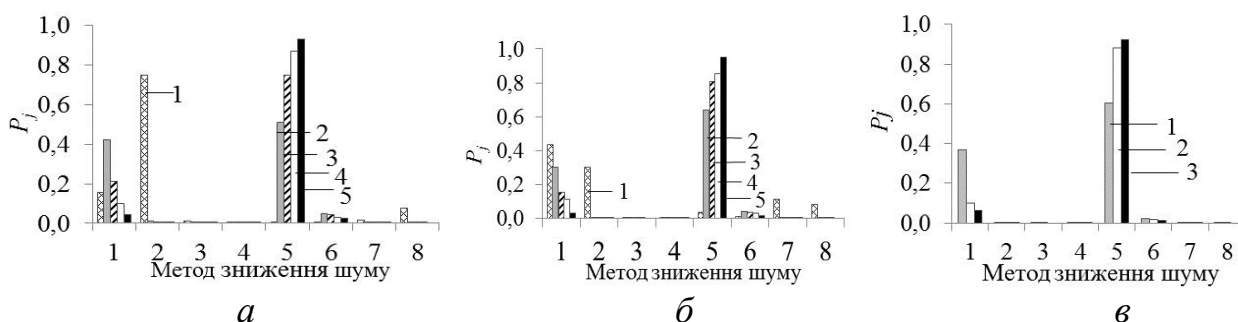


Рис. 12. P_j для досліджуваної кількості положень приймачів: а, б – п'ять положень приймача, де 1 – одне положення, 2 – два положення, 3 – три положення, 4 – чотири положення, 5 – п'ять положень; а – для $\delta L = 17$ дБ, б – для $\delta L = 8$ дБ; в – для $\delta L = 8$ дБ, де 1 – три положення, 2 – чотири положення, 3 – п'ять положень; методи зниження шуму по стовпчикам: 1 – зменшення інтенсивності транспортного потоку (від 4000 авт./год до 1000 авт./год.); 2 – зниження швидкості транспортного потоку (на 10 км/год); 3 – пористі дорожні покриття; 4 – зелені насадження; 5 – тонкий АЕ; 6 – АЕ кінцевої товщини; 7 – звукоізоляція вікон; 8 – використання активних вікон

Для оцінювання підвищення рівня екологічної безпеки при використанні методів зниження шуму проведено оцінювання ризиків здоров'ю населення від впливу шуму автомобільного транспорту на основі методики МР 2.1.10.0059–12 (рис. 13).

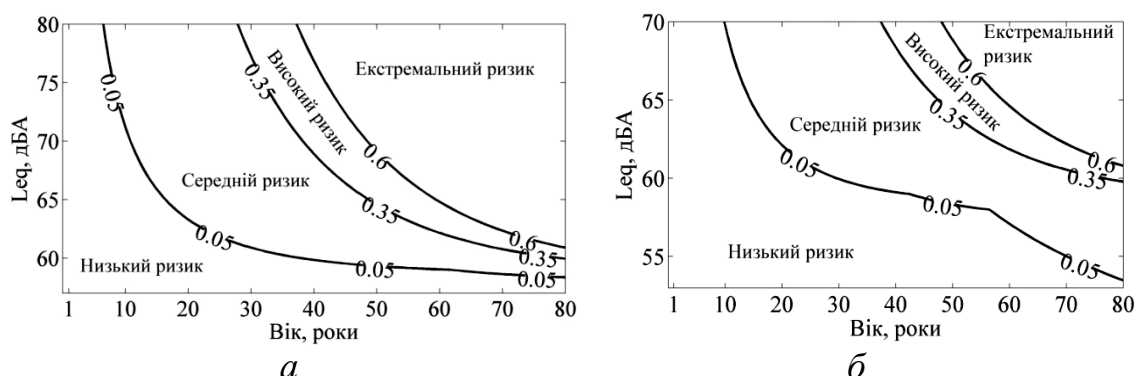


Рис. 13. Залежність коефіцієнту приведенного ризику від рівнів шуму автомобільного транспорту для фонового рівня шуму та віку населення: *а* – 55 дБА (на селітебній території) ; *б* – 40 дБА (всередні приміщень)

Встановлено, що основним є ризик розвитку захворювань серцево-судинної системи, що вносить основний вклад в показник сукупного агрегованого ризику. Виявлено, що при досягненні еквівалентних рівнів шуму 80 дБА популяційний додатковий ризик захворювань (розрахований на 1000 чоловік) зростає майже до 90 %.

Зниження шуму на 5 дБА дозволяє змістити границю екстремального ризику до віку старше 50 років, високого – 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 буде досягнуто при зниженні шуму на 17 дБ.

ВИСНОВКИ

У дисертації, що є завершеною науково-дослідною роботою, вирішено наукове завдання розробки моделей оцінювання та методів зниження шуму автомобільного транспорту, які спрямовані на підвищення екологічної безпеки міського середовища в умовах постійно зростаючого шумового навантаження на населення від транспортних потоків.

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. 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. 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 ТАЕ та АЕКР. Достовірність моделей підтверджена для всього діапазону частот з $E_{abs} = 2...3$ дБ для ТАЕ та уточнено моделювання ефективності АЕКР 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. 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.

6. Результати дисертаційних досліджень були впроваджені в документі РВ.2.3–218–03450778–769:2010 «Рекомендації щодо проектування шумозахисних екранів», при створенні комп'ютерної програми «Розрахунок рівнів звукового тиску в приймачі для міського середовища» USScape1.0 та розробці екологічної концепції розвитку м. Бурштин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *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.

2. *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.

3. *Шевченко Ю. С.* Аналіз формул розрахунку ефективності акустичних екранів на вулицях / Ю. С. Шевченко // Вісник НАУ. – 2010. – № 4(45). – С. 136–142.

4. *Шевченко, Ю. С.* Моделювання впливу фасаду будівлі на формування звукового поля / Ю. С. Шевченко, О. М. Береговий, В. Г. Паращанов // Вісник НАУ. – 2012. – № 1 (50). – С. 242–247.

5. *Шевченко, Ю. С.* Метод картографування шуму від транспортних потоків у сучасному місті / Ю. С. Шевченко // Вісник НАУ. – 2012. – № 4 (53). – С. 242–247.

6. *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.

7. *Shevchenko Yu.* New Ranking Method of Traffic Noise Reduction Measures / Yu. Shevchenko // Proceedings of National Aviation University. – 2013. – № 3. – P. 105–111.

8. *Шевченко, Ю. С.* Математична модель шуму транспортних потоків / Ю. С. Шевченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/4 (70). – С. 47–51.

9. *Шевченко Ю. С.* Методи гармонізації навколишнього акустичного середовища / Ю. С. Шевченко // IX Міжнародна наук.-техн. конф. «Авіа–2009», 21–23 вересня 2009 р.: мат. конф. – К. : НАУ, 2009. – Т. 3 – С. 21.19–21.22.

10. *Шевченко Ю. С.* Покращена модель тонкого акустичного екрану / Ю. С. Шевченко // Матеріали X міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Політ–2010. Сучасні проблеми науки», 7–9 квітня 2010 р.: тези доповідей. – К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ–друк», 2010. – С. 436.

11. *Шевченко Ю. С.* Моделювання зниження шуму тонким акустичним екраном / Ю. С. Шевченко // Матеріали дев'ятого міжнародна науково-методична конференція: Безпека життя і життєдіяльності людини – освіта, наука, практика, 20–22 травня 2010 р: тези доповіді. – Л. : «Бібльос», 2010. – С. 291–292.

12. *Шевченко Ю. С.* Розрахунок звукового поля поблизу фасаду будівлі / Ю. С. Шевченко // Екологічна безпека держави: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених та студентів, 27–29 квітня 2010 р.: тези доповіді. – К. : НАУ, 2010. – С. 212–214.

13. *Shevchenko Y. S.* Modeling of sound fields in the shadow zone between noise barriers and building facades / Y. S. Shevchenko // The 4th world congress «Aviation in the XXI-st century» – «Safety in Aviation and Space Technologies», 21–23 Sept. 2010: proceedings – K., 2010 – V.2 – P. 101.16–101.19.

14. *Шевченко Ю. С.* Моделювання шуму автомобільного транспорту в місті / Ю. С. Шевченко // Матеріали X міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА–2011», 19–21 квіт. 2011 р.: тези доповіді. – К. : НАУ, 2011. – Т. 4. – С. 27.4–27.7.

15. *Шевченко Ю. С.* Моделювання шуму транспорту за допомогою генетичного алгоритму / Ю. С. Шевченко // Екологічна безпека держави: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених та студентів, 19 – 21 квітня 2011 р.: тези доповіді. – К. : НАУ, 2011. – С. 124–125.

16. *Shevchenko Y. S.* Mathematical modelling of sound fields in urban environment / Y. S. Shevchenko // 15th Conference for Lithuania Junior Researchers Science – Future of Lithuania «Transport Engineering and Management», 4 May 2012: proceedings – Vilnius: Technika, 2012. – P. 95–100.

17. *Shevchenko Y. S.* Improved algorithm of traffic flows noise modeling / Y. S. Shevchenko // The Fifth World Congress «Aviation in the XXI-st Century» «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27.09.2012: abstract. – Kyiv: NAU, 2012. – P. 4.4.15–4.4.19.

18. *Shevchenko Yu.* Complex mathematical model of population impact assessment of traffic flows noise in urban environment / Yu. Shevchenko // Medzinárodný vedecko-odborný seminár «Riadenie bezpečnosti zlozitych systémov 2013», 18–22.02.2013: abstract. – Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika, 2013. – P. 416–423.

19. *Shevchenko Y. S.* Vertical Noise Maps Creation For Urban Environment / Y. S. Shevchenko // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «АВІА–2013», 21–23 травня 2013 р.: тези доповіді. – К. : НАУ, 2013. – Т.5. – P. 32.77– 32.80.

20. А.с. 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 р. / Ю. С. Шевченко.

21. Патент, Україна, МПК (2009) G 01N 15/08. Пристрій для визначення опору продуванню потоком повітря пористих звукопоглинаючих матеріалів / Шевченко Ю. С., Токарев В. І., Береговий О. М.; власник Національний авіаційний університет – № 47858; заяв. 11.09.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. №4/2010.

АНОТАЦІЯ

Шевченко Ю.С. Розробка моделей оцінки та підвищення ефективності зниження шуму транспортних потоків. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека (технічні науки). Національний авіаційний університет, Київ, 2016.

Проведено аналіз формування шумового навантаження на населення міст від впливу шуму автомобільного транспорту. Розроблено модель шуму транспортних потоків, що дозволила врахувати макроскопічні характеристики руху автомобільного транспорту в потоці.

Удосконалено математичну модель оцінювання впливу додаткових відбиттів від фасадів будівель та математичні моделі оцінювання ефективності тонкого акустичного екрану та акустичних екранів кінцевих розмірів. Обґрунтовано комплексну модель оцінювання рівнів шуму в міському середовищі для створення горизонтальних та вертикальних карт шуму, як інструменту забезпечення екологічної безпеки. Удосконалено метод картографування шуму.

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.

Ключові слова: шум автомобільного транспорту, шумове навантаження на населення міст, математичне моделювання рівнів шуму, акустичні екрани, картографування шуму, методи зниження шуму

АНОТАЦИЯ

Шевченко Ю.С. Разработка моделей оценивания и повышения эффективности снижения шума транспортных потоков. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность (технические науки). Национальный авиационный университет, Киев, 2016.

Проведен анализ формирования шумовой нагрузки на население городов под влиянием шума автомобильного транспорта. Разработано модель шума транспортных потоков, то позволила учитывать макроскопические характеристики движения автомобильного транспорта в потоке.

Усовершенствованы математическая модель оценивания влияния дополнительных отражений от фасадов зданий и математические модели оценивания эффективности тонкого акустического экрана и акустических экранов конечных размеров. Обосновано комплексную модель оценивания уровней шума в городской среде для создания горизонтальных и вертикальных карт шума, как инструмента обеспечения экологической безопасности. Усовершенствован метод картографирования шума.

Предложен метод ранжирования для выбора оптимальных методов снижения транспортного шума на территории жилой застройки и внутри помещений с учетом обеспечения экологической безопасности та требований экономической эффективности выбранных методов снижения шума.

Ключевые слова: шум автомобильного транспорта, шумовая нагрузка на население городов, математическое моделирование уровней шума, акустические экраны, картографирование шума, методы снижения шума

ABSTRACT

Shevchenko I. S. Developing models of assessment and improving the efficiency of traffic noise reduction – Manuscript.

The dissertation was prepared to obtain a candidate's degree of technical science on a speciality 21.06.01 – Ecological Safety (technical sciences). – National Aviation University, Kyiv, 2016.

Analysis of noise load on urban population under the influence of traffic noise has been performed. Traffic noise model has been developed, which allows take into consideration macroscopic characteristics of automobile transport movement in traffic flow.

Mathematical model of impact assessment of additional reflections from building facades as well as mathematical models of thin noise barriers and finite size noise barriers efficiency assessment have been improved. Complex model of noise levels assessment in urban environment as an instrument of ecological safety maintenance has been justified. The complex model allows creation of vertical and horizontal noise maps. Noise mapping method has been improved.

Ranking method for selection of optimal methods of noise reduction on the residential territory and inside buildings was suggested, which takes into account maintenance of ecological safety and economic requirements.

Key words: traffic noise, noise load on urban population, mathematical modeling of noise levels, noise barriers, noise mapping, methods of noise reduction

Підп. до друку 15.02.2016. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 16-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002