

Визначення закономірностей розповсюдження шумового навантаження від автомобільних доріг і автодорожніх мостів у залежності від відстаней до житлових будівель

С. В. Ласлов, О. П. Токін, А. М. Онищенко

Удосконалено модель оцінки транспортного шуму від автомобільних доріг у придорожній смузі при дії шумового навантаження від транспортного потоку, що рухається на відкритій ділянці автомобільної дороги та по мосту.

Встановлено, що із збільшенням відстані від джерела звуку до координат вимірювання шумового навантаження шум зменшується, як при наявності шумозахисного екрану так і у випадку відкритої ділянки автомобільної дороги. На відстані 100 м від джерела звуку рівень шумового навантаження зменшується на 13,4 % у випадку руху автомобіля по мосту і на 13,3 % при русі автомобіля на відкритій ділянці автомобільної дороги.

Встановлено, що рівень шуму на мостах перевищує рівень шумового забруднення від автомобільної дороги до 10 дБ, що пояснюється розповсюдженням різних частот шумового навантаження від мосту.

Встановлено, що через особливу природу звукових хвиль дифракція через шумові екрани не змінює всі частоти рівномірно. Високі частоти дифрагують у меншій степені; тоді як більш низькі частоти – глибше в «тіньову» зону позаду екрану. Тому екран більш ефективний для зменшення хвиль звуку з високою частотою у порівнянні з хвилями звуку з більш низькими частотами.

Проведено експериментальні дослідження ефективності шумозахисних екранів із металевих перфорованих конструкцій на ділянках автомобільних доріг загального користування із врахуванням відстаней від джерел шуму до місць проведення вимірювань шумового навантаження.

Встановлено, що шумозахисні екрани із сталюого листа (перфорованого) зменшують рівень шумового навантаження від транспортних засобів на навколишнє середовище до 14 %.

Встановлено, що при русі автомобілів по автомобільній дорозі еквівалентний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 88,6 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 103,9 дБА.

Встановлено, що при наявності стічного отвору у шумозахисному екрані його акустична ефективність зменшується до 3 дБА

Ключові слова: автомобільні дороги, транспортні споруди, шумові навантаження, захисні екрани, акустичні характеристики, транспортний потік

1. Вступ

Поряд із забрудненням токсичними речовинами вихлопних газів навколишнього середовища стрімко зростає рівень акустичного забруднення від автомобі-

льного транспорту. Це пояснюється значним ростом інтенсивності автомобільного руху, загальним зростанням потужності двигунів автомобілів та збільшенням швидкостей руху.

Шум став одним з основних забруднювачів оточуючого середовища. Медики вважають шум загальним біологічним подразником, тому що всі органи людського організму негативно реагують на збільшення рівня шуму. Шумове навантаження викликає у людині відчуття страху, дискомфорту, надмірну збудженість, що в свою чергу, негативно впливає на взаємовідносини між людьми.

У країнах Європейського Союзу шумове забруднення населених пунктів і приміських територій вважається одним із найбільш серйозних екологічних проблем.

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) запропонувала стандартні директивні значення рівнів шуму для усередненої зовнішньої ситуації величиною 55 дБА, які прийнятні на протязі нормального денного часу, щоб запобігти суттєвому втручанню у життєдіяльність населення. Нормативні критерії емісії шуму на транспорті ще далекі від значень, рекомендованих ВООЗ, через відсутність можливостей їх технічного і фінансового забезпечення.

Шумове навантаження, що отримує людина, викликає втому, роздратування. Крім того, при достатньо великих амплітудах звуку у вушній раковині людини виникають нелінійні перекручування: вищі гармоніки в разі синусоїдального тону, комбінаційні тони при несинусоїдальному тоні.

Дослідження свідчать про несприятливий вплив шуму на центральну нервову, серцево-судинну систему і органи травлення. Порушення стану функціонування центральної нервової системи під впливом шуму призводить до ослаблення уваги і працездатності, особливо розумової [1].

Гранично допустимий рівень транспортного шуму в США на території безпосередньо прилеглої до житлової забудови становить 70 дБА.

Міжнародні норми, що прийняті в країнах європейського співтовариства, визначають рівень 82 дБА, як максимально допустимий для автомобіля будь-якого типу.

У роботі [2] зазначено, що Резолюція 1776 (2010) від 12 листопада 2010 року «Шумове та світлове забруднення» [3] Парламентської асамблеї привертає увагу до проблеми екологічного, зокрема шумового та світлового, забруднення європейського континенту.

В Японії, наприклад, основною характеристикою шуму автотранспортних засобів є рівень шуму при їх прискоренні. Для вантажних автомобілів нормами встановлені допустимі рівні шуму від 89 дБА до 83 дБА в залежності від вантажопідйомності та потужності двигуна. У перспективі передбачається знизити цей рівень на 6–9 дБА. Для легкових автомобілів допустимий рівень шуму 82 дБА, перспективний – 78 дБА [4].

У Франції при оцінці транспортного шуму виходять із рівня повторення 50 %. В зоні існуючих автомобільних доріг допустимим є рівень шуму 68 дБА, для нових доріг – 65 дБА [4].

Задача зниження впливу шуму автомобільного транспорту на оточуючу територію сьогодні обов'язково повинна розглядається у проєктах будівництва і реконструкції автомобільних доріг.

Шум від руху транспортних засобів по дорозі має три джерела: шум вихлопних газів, шум двигунів та шин, що взаємодіють з дорожнім покриттям. Цей шум частково глушиться конструкцією покриття та ґрунтовою основою дороги.

У випадку транспортного потоку, що рухається по мосту, інтенсивність шумового навантаження стає ще більшою в силу двох причин: резонансних явищ конструкції моста та значної висоти джерела шуму. У роботах [5, 6] зазначено, що шум від транспорту на мостах є більш інтенсивним, ніж шум наземної дороги і покриває більшу територію. Крім цього, шум на мостах настільки не глушиться покриттям проїзної частини, а навіть може посилюватися у залежності від конструкції і розмірів прогонової будови. Захисні екрани на мостах мають розміщуватися на прогоновій будові, тобто бути елементом конструкції моста.

Очевидно, що проблема шумового забруднення у випадку мостів має розглядатись як специфічна задача в загальній проблемі охорони навколишнього середовища. Для цього мають бути розроблені моделі шумового навантаження, які дадуть змогу сформулювати вимоги до конструкцій шумових екранів, які проєктуються на мостах та автомобільних дорогах.

Тому дослідження, присвячені розробці методики оцінки шумового навантаження від транспортних засобів, що рухаються по автомобільній дорозі та мосту, є актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [6] зазначено, що шумове навантаження від автомобільного транспорту є значним. У зоні руху автотранспорту воно дорівнює реактивному літаку на висоті 300 м і далі затухає дуже повільно. Оскільки атмосфера не може суттєво вплинути на скорочення розповсюдження звукової хвилі. На відстані 90 м може загасити його потужність тільки на 6–10 дБ, у залежності від атмосферних умов.

Встановлено, що у сухому повітрі, при температурі 0 °С, швидкість звуку дорівнює 331,5 м/с, а із зростанням температури – збільшується. Також встановлено, що на затухання звукової хвилі має суттєвий вплив вологість середовища. Чим більша вологість, тим швидше розповсюджується звукова хвиля.

У роботі [7] наведені параметри залежності відносної зміни швидкості звуку від вологості, при постійній температурі. Встановлено, що чим більша вологість, тим швидше розповсюджується звукова хвиля.

Однак у працях [6, 7] відсутні дослідження шумового навантаження, яке виникає від транспортних засобів, що рухаються по мосту. Крім цього у роботі не проведено досліджень розповсюдження шумового навантаження у залежності від відстані до шумозахисного екрану.

Дослідженнями, що наведені у роботі [8] встановлено, що на високошвидкісних дорогах скорочення середньої швидкості автомобіля у 2 рази може привести до зниження еквівалентного рівня шуму на 5–6 дБ. Що є одним із методів зниження шумового навантаження. Проте досліджень шумового навантаження на прилеглі території від руху транспортних засобів по мосту не проведено.

Завдяки проведеним дослідженням [9] встановлено, що зниження шуму можна добитися за допомогою відповідної конфігурації рисунка протектора і конструкції шини автомобіля. Проте конструювання шин з істотно зниженим рівнем шуму вступає у суперечність із необхідністю забезпечення безпеки руху, попередження нагріву протектора і забезпечення економічності автомобіля.

Слід зазначити, що у роботах [8, 9] проведені дослідження шумового навантаження при русі транспортних засобів по автомобільній дорозі. Проте не проведено досліджень при русі автомобілів по мосту та не враховано закономірностей поширення звукової хвилі у залежності від відстані до джерела звуку.

Отже, великі можливості по зниженню шуму на автомобільних дорогах у зоні транспортних споруд відкриває створення перспективних альтернативних конструкцій дорожнього покриття.

Важливим, з погляду обмеження шуму, є будова самого дорожнього покриття. А саме, чи утворено воно бітумінізованим матеріалом з випадковим малюнком будови, або покриття бетонне, з домінуючою поперечною структурою.

У Великобританії були проведені дослідження [10], які дозволили встановити співвідношення між опором автомобіля зчеплення, що реалізується на дорожньому покритті, і сумарним рівнем шуму, який генерується автомобілями, що їдуть на великих швидкостях по дорожньому покриттю. Дослідженнями у роботі [11] встановлено, що це співвідношення статистично не залежить від будови матеріалу дорожнього покриття. Проте, виникає протиріччя між визначенням дорожніх покриттів, що володіють низьким рівнем шуму, і задовільними нормами безпеки при високих швидкостях руху. Це пов'язане з тим, що гладке дорожнє покриття може бути малошумним, але одночасно абсолютно небезпечним для руху у вологу погоду.

У роботах [10, 11] не наведено методики для визначення шуму у випадку руху автомобільного транспорту по мосту.

Укладання експериментального дорожнього покриття на рифлену поверхню бетонних ділянок кільцевої автомобільної дороги, прокладеної на схід від Брюсселя [11], привело до зниження рівнів шуму. Рівень шуму знизився до 4 дБА для автомобілів, що рухалися зі швидкістю 70 км/год і на 5,5 дБА при швидкості руху автомобілів 120 км/год. Також у роботі встановлено, що зниження рівня шуму можна добитися і при інших видах пористих дорожніх покриттів. Однак досліджень шумових навантажень при русі автомобілів по мосту не проведено.

У Швеції отримані дані шумового навантаження при застосуванні пористого дорожнього покриття [11], а у роботі [12] – скомпонованого із підібраного по гранулометричному складу кам'яного остову з емульсивним асфальтом у якості в'язучого. У Канаді розподіл шумового навантаження отримано для дорожнього покриття, складеного з суміші «відкритого типу», з тонким захисним шаром бітуму [11]. Встановлено, що рівень шуму знизився на 4–5 дБА у порівнянні з рівнем шуму на дорогах із звичайним асфальтовим покриттям. І знизився на 3 дБА у порівнянні із зношеним бетонним покриттям, яке володіє набагато меншим опором бічному зносу, ніж дорожнє покриття, складене з суміші «відкритого типу», що покрите тонким захисним шаром бітуму.

Проте в Норвегії і Швеції виникли проблеми [4, 11, 12], пов'язані з зносо- стійкістю цих дорожніх покриттів, що викликане застосуванням шин з шипами у зимові місяці. Ці шини дроблять поверхневий шар у дрібний порошок, який потім забиває пори дорожніх покриттів «відкритого типу», поступово знижую- чи їх звукопоглинання.

Робота [10] присвячена розробці науково-методологічних основ акустично- го розрахунку та архітектурно-конструктивного проєктування шумозахисних екранів з урахуванням їх планувальних та конструктивних рішень та об'ємно- просторових характеристик забудови, що має захищати від транспортного шуму.

У роботах [11, 12] розглядаються базові рішення проблеми шумозахисту: базова оцінка загальних шумозахисних заходів та світовий досвід шумозахисних заходів. Наведено досвід різних країн у використанні шумозахисних засобів як на існуючих дорогах, так і на дорогах, що проєктуються, будуються та проведено аналіз ефективності різних шумозахисних засобів.

У праці [13] наведено світовий досвід проєктування та виробництва шумо- захисних екранів. Також виконаний аналіз видів і конструкцій шумозахисних екранів, їх використання у світовій практиці та приведено особливості проєкту- ванні та монтажу різних типів шумозахисних екранів, їх шумозахисні та експлу- атаційні характеристики.

У роботі [14] висвітлені засади ефективності використання шумозахисних екранів та методи розрахунку ефективності шумозахисних екранів. Обговорю- ються місцеві та особливі умови, що не вказані в нормативних документах та їх вплив на розрахунок ефективності шумозахисних екранів.

У праці [15] наведені основні відомості про конструкції і матеріали шумоза- хисних екранів, деякі особливості їх влаштування та експлуатації у США та Росії.

У статті [16] наведені та описані різні типи шумозахисних екранів з ураху- ванням їх впливу на навколишнє середовище. Наводиться зв'язок між екологіч- ною та естетичною складовою при проєктуванні шумозахисних екранів. Висвіт- люються проблеми візуального сприйняття екрану, інтеграції споруди з нехарак- терною, для навколишнього середовища, формою, погіршення природного руху повітряних течій, порушення існуючого ландшафту при будівництві, тощо.

У роботі [17] встановлено, що важливим параметром при оцінюванні ефек- тивності шумозахисних властивостей екранів є їх висота. Висота шумозахисних екранів має бути не менше ніж 1 м. Шум від дорожніх машин є низькочастот- ними коливаннями з частотою 50–200 Гц, що відповідає довжинам хвиль 7,2– 1,8 м. Для захисту від шуму з такими частотами необхідний екран висотою 7 м.

У праці [18] наведені особливості влаштування та експлуатації шумозахис- них екранів, а також розглянуті додаткові вимоги, висунуті при проєктуванні ек- ранів у США.

У роботі [19] проведено дослідження шумового навантаження від міського дорожнього руху і оцінку його впливу на людину, з використанням геопросторо- вих технологій. Однак, не проведено оцінки шумового навантаження від транс- портних засобів при русі по мосту.

У роботі [20] розроблені базові принципи визначення звукової хвилі при поширенні її у в'язкому ґрунтовому середовищі. Однак не отримано характеристик шумового навантаження.

Базові принципи впливу динамічного навантаження на швидкість поширення звукової хвилі показано у роботі [21].

У роботі [22] за допомогою звукових хвиль виконується оцінка ступеню ущільнення щебеневого баласту дороги, а у роботі [23] встановлено, що при дії динамічного навантаження підвищується величина звукової хвилі при проходженні через однорідне середовище.

Проте у роботах [19–23] не проводиться оцінка впливу звукової хвилі на оточуюче середовище.

У роботі [24] наведено системи моніторингу шуму, який забруднює великі міста. Встановлено, що для захисту населення від шуму потрібно виконати моніторинг місць найбільшого шумового навантаження і підібрати системи захисту від шуму.

Однак у роботі не проведено оцінку впливу шуму від руху автомобілів по транспортних спорудах.

У роботі [25] проведено оцінку параметрів транспортних потоків на основі обробки даних локалізації про рух транспортних засобів у місті. Однак досліджень шумових навантажень на навколишнє середовище не проведено.

У роботах [26–28] наведено дані розповсюдження шумового навантаження на забруднення міст дорожніми та рейковими транспортними засобами. У роботах [29–30] наведено моделі прогнозування шумового навантаження у містах на основі інтенсивності транспортних потоків.

У роботі [31] американським агентством із охорони навколишнього середовища (EPA) та Всесвітньою організацією охорони здоров'я (WHO) зазначено, що для побудови карт шуму, необхідно використовувати методи прогнозування на основі кількості рейкових транспортних засобів, які проїхали, та їх типу.

Забезпечення необхідного рівня акустичного комфорту є однією з основних задач охорони навколишнього середовища для густо населених регіонів держав, що мають розвинену транспортну інфраструктуру з високою інтенсивністю.

Проте, незважаючи на високий рівень акустичного забруднення прилеглих територій, захисні пристрої на мостах, які б захищали навколишнє середовище від шумового навантаження, проектується рідко. Також слід зазначити, що не виявлено досліджень шумового транспортного навантаження на навколишнє середовище при русі транспорту по мостах. Слід також зазначити, що авторами не проведено досліджень затухання звукової хвилі у залежності від відстані до джерела шуму та відстані до прилеглих житлових будівель. Що потребує подальших досліджень і є актуальною задачею.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є визначення закономірностей розповсюдження шумового навантаження, що виникає від автомобільних доріг та мостів при дії транспортних потоків із врахування відстані до джерела шуму та координатами вимірю-

вань шуму, що дасть можливість проводити оцінку вплив шумового навантаження на прилеглі території.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

– дослідити шумове навантаження від транспортних засобів при русі транспорту на відкритих ділянках автомобільних доріг та по мосту із врахуванням та без врахування шумозахисних екранів та координат вимірювання шумового навантаження;

– шляхом експериментальних вимірювань шумового навантаження від транспортних засобів на автомобільних дорогах загального користування визначити шумове навантаження на прилеглі території у залежності від відстаней до шумозахисних екранів і житлових будівель та технічного стану екранів.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Методика проведення експериментальних вимірювань шумового навантаження

Місця проведення вимірювань ефективності шумозахисних екранів були визначені на основі попередніх натурних обстежень, а саме, наближенням сільбищної території до автомобільної дороги.

Вимірювання шуму проводились у суху погоду (без атмосферних опадів) та при сухій поверхні автомобільної дороги.

Вимірювання шумових характеристик транспортного потоку були проведені на 238 км автомобільної дороги Київ-Чоп з метою визначення ефективності шумозахисних екранів.

Обладнання для проведення вимірювань шуму від транспортних потоків, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Перелік обладнання для вимірювання шуму від транспортних потоків

Найменування, тип, заводський	Параметри, що вимірюються	Діапазон вимірювань	Похибки вимірювань
1. Шумомір Октава 110А	Шум	30–130 дБ (А)	±1 дБ (А)
2. Електронна погодна станція типу WM-918	Температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск	(–40–0) °C (0–40) °C (25–40) % RH (40–80) % RH (80–90) % RH (795–1050) мбар	±2 °C ±1 °C ±7 % RH ±5 % RH ±7 % RH ±7 мбар
3. Анемометр крильчатий, АСО-3	Швидкість вітру	0,2–5,0 м/с	0,35 м/с
4. Рулетка, ЗПКЗ-20АУТ/1	Лінійні розміри	0÷20 м	±0,5 мм

Місце проведення вимірювань вибиралося на ділянках вулиць і доріг зі сталою швидкістю руху транспортних засобів та на відстані не менше 50 м від

перехресть, транспортних площ та зупиночних пунктів пасажирського громадського транспорту.

Вимірювання проведені при умові, що поверхня проїжджої частини вулиць і автомобільних доріг була чистою та сухою та проводились під час відсутності атмосферних опадів і при швидкості вітру менше 5 м/с. При швидкості вітру більше 1 м/с до 5 м/с застосовувався ковпак для захисту вимірювального мікрофону від вітру з метою відсіювання шумового навантаження від вітру.

Час проведення вимірювання був встановлений у періоди максимальної інтенсивності руху транспортних потоків. Яка складала 432 автомобілів за годину.

При проведенні вимірювання шумової характеристики транспортного потоку, до складу якого входили легкові і вантажні автомобілі, автопоїзди, автобуси (далі – автомобілі) вимірювальний мікрофон розташовувався на тротуарі або обочині. Відстань розміщення складала $7,5 \pm 0,2$ м від осі найближчої до точки вимірювання смуги або шляху руху транспортного засобу на висоті $1,5 \pm 0,1$ м від рівня покриття проїжджої частини. В умовах щільної забудови вимірювальний мікрофон розташовувався на відстані меншій за 7,5 м від осі найближчої до точки вимірювання смуги або шляху руху транспортного засобу. Але не ближче 1 м від стін споруд, безперервних парканів та інших споруд або елементів рельєфу, які відбивають звук.

Крім цього додатково були проведені вимірювання шумового навантаження у випадку розташування вулиці або дороги у виїмці. При цьому вимірювальний мікрофон встановлювався на бровці виїмки на висоті $1,5 \pm 0,1$ м від рівня землі.

Вимірювальний мікрофон був направлений у сторону транспортного потоку. Оператор, який проводив вимірювання, знаходився на відстані не менше ніж 0,5 м від вимірювального мікрофону.

Період вимірювання шумової характеристики транспортного потоку, до складу якого входили автомобілі, мотоцикли охоплював проїзд не менше 200 транспортних одиниць в обох напрямках.

Процес вимірювань рівня шуму наведено на рис. 1.

Далі за результатами проведених вимірювань було здійснено статистичну обробку результатів вимірювань параметрів доріг і рівня шуму на них за програмою множинного кореляційно-регресійного аналізу.





б

Рис. 1. Визначення рівня шуму: а – перед шумозахисним екраном на 238 км автомобільної дороги Київ-Чоп; б – біля житлового будинку в місці встановлення шумозахисного екрану

4. 2. Моделі оцінки транспортного шуму в придорожній смузі руху

Використовуючи математичні залежності (рівняння регресії), отриманні при статистичному моделюванні рівня шуму, інтенсивності і швидкості руху, можна побудувати лінійну модель для оцінювання транспортного шуму від дії транспортних потоків.

Для побудови математичної моделі визначається розрахунковий еквівалентний рівень шуму від транспортного потоку на відстані 7,5 метра від осі найближчої смуги руху з покриттям із дрібнозернистого асфальтобетону на відрізьку з нульовим нахилом за формулою:

$$L=50+8,8\lg N, \quad (1)$$

де L – еквівалентний рівень шуму дБА; N – перспективна інтенсивність руху, авт./год.

В отриманий результат враховано поправку на склад транспортного потоку, так як вантажні автомобілі та автобуси з карбюраторним і дизельним двигуном створюють різний рівень шуму. У залежності від стану поверхні, над якою розповсюджується шум, і віддалення точки відліку від осі смуги руху величину поправки знайдено за формулою:

$$L=10K_p \lg \frac{L+L_m-7,5}{L_m} + \frac{\alpha \cdot 1}{100}, \quad (2)$$

де 10 – поправка на розрахунок до осі смуги руху, дБА; K_p – коефіцієнт, що враховує поглинання звуку поверхневим покривом; L – відстань від точки розрахунку до найближчої смуги руху; α – коефіцієнт поглинання звуку в повітрі; L_m – відстань від точки 7,5 м до осі еквівалентної смуги руху, м.

До обмежень, які враховуються при вирішенні задачі по підвищенню акустичного комфорту, необхідно віднести ефективну висоту укосу виїмки, яка визначається за формулою:

$$h_{\text{эф}} = \frac{l(H - h_1) - (k + m)(H - h_1 + h_2)}{\sqrt{l_2 + (H - h_1 + h_2)^2}}, \quad (3)$$

де H – глибина виїмки; h_1 – висота геометричного центру джерела шуму над поверхнею дороги, м; k – відстань від розрахункової осі смуги руху до кордону укошу чи бар'єра, м; m – проекція укошу на горизонтальну площину, м; $h_{\text{эф}}$ – повинна бути не меншою 0,1 м.

Точка визначення рівня шуму повинна бути віддалена від краю виїмки на відстані не менше глибини цієї виїмки:

$$(k + m + H) \leq l. \quad (4)$$

Слід зазначити, що в практичних цілях оцінки шуму доцільно використовувати логарифмічну шкалу виміру тиску в одиницях децибел (дБ). Співвідношення між цими одиницями задається формулою:

$$ЗТ = 10 \lg \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right)^2, \quad (5)$$

де ЗТ – звуковий тиск; P – значення звукового тиску в мкПа; P_{ref} – нижнє значення звукового тиску, $P_{\text{ref}} = 20$ мкПа.

Зворотній перехід задається формулою:

$$(P/P_{\text{ref}})^2 = 10^{(ЗТ/10)}. \quad (6)$$

Згідно із роботою [2] розрахунок затухання звукової хвилі здійснюється за формулою:

$$P_t = P_i \exp(-0.1151 \alpha S), \quad (7)$$

де P_t – звуковий тиск, Па; P_i – початковий звуковий тиск, Па; S – довжина траєкторії розповсюдження звуку, м, або км; α – коефіцієнт затухання звуку, внаслідок звукопоглинання атмосферою, дБ/м, або дБ/км, який розраховується за формулою:

$$\alpha = 8,686 f^2 \left\{ \left[1,84 \times 10^{-11} \frac{p_r}{p_a} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{0,01275 \exp\left(\frac{-2239,1}{T}\right)}{f_{r0} + \left(\frac{f^2}{f_{r0}}\right)} + \frac{0,1068 \exp\left(\frac{-3352}{T}\right)}{f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}}\right)} \right] \right\}. \quad (8)$$

Коефіцієнти, які входять у рівняння (16), розраховуються за наступними формулами:

$$f_{r0} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \cdot 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right), \quad (9)$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left(9 + 280 h \exp \left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\} \right), \quad (10)$$

$$h = h_r \frac{p_r}{p_a} 10^C, \quad (11)$$

$$C = -6,8346 \left(\frac{273,16}{T} \right)^{1,261} + 4,6151. \quad (12)$$

У даних формулах f – частота звуку (Гц); T – температура атмосфери (°C); T_0 – відносна температура, яка приймається рівною 20 °C; h_r – відносна вологість (%); p_a – атмосферний тиск (кПа); p_r – відносний атмосферний тиск в одну атмосферу, що приймається рівним 101,325 кПа.

У випадку наявності шумозахисних екранів потрібно враховувати факт, що шумозахисні екрани знижують транспортний шум за рахунок поглинання, зміни довжини хвилі, віддзеркалення, або дифракції. Дифракція, або обгинання звуковими хвилями перешкоди, може відбуватися і по верху екрану, і навколо нього.

Різниця довжин траєкторій використовується для визначення числа Френеля (N_0), яке є безрозмірним значенням, що використовується для прогнозування ослаблення звуку, шумозахисним екраном, розташованим між джерелом і приймачем. Число Френеля визначається за формулою:

$$N_0 = \pm 2 \frac{\delta_0}{\lambda} = \pm \frac{f \delta_0}{c}, \quad (13)$$

де N_0 – число Френеля; $\pm$ – «плюс» у випадку, якщо лінія розповсюдження звуку між джерелом і приймачем більш низька, аніж точка дифракції і «мінус», коли лінія розповсюдження вище, аніж точка дифракції; δ_0 – різниця довжин траєкторій, м; λ – довжина звукової хвилі, що випромінює джерело, м; f – частота звуку, що випромінюється джерелом, Гц; c – швидкість звуку, м/с.

Якщо збільшуються різниця довжин траєкторій і число Френеля, то посилюється потенціал екрану.

Кількість звуку, яку передає екран, може бути описана показником «втрати звукопередачі» (TL). Втрати звукопередачі екрану визначаються за формулою:

$$TL = 10 \log_{10} \left[10^{(SPL_s/10)} / 10^{(SPL_r/10)} \right], \quad (14)$$

де SPL_s – рівень звукового тиску на стороні джерела, дБ; SPL_r – рівень звукового тиску на стороні приймача, дБ.

Далі було проведено розрахунок затухання звукової хвилі за формулою (7) із визначенням коефіцієнтів за формулами (8)–(12). При цьому було враховано температуру атмосфери та відносну температуру, яка приймається рівною $T_0=20^\circ\text{C}$; відносну вологість та атмосферний тиск. Відносний атмосферний тиск в одну атмосферу, було прийнято рівним 101,325 кПа.

При наявності шумозахисного екрану враховувалися втрати звукопередачі екрану за формулою (14).

5. Результати досліджень шумового навантаження при дії транспортних засобів

5.1. Результати оцінки розповсюдження шумового навантаження від руху транспортних засобів по автомобільних дорогах

Результати оцінювання розповсюдження шумового навантаження від руху легкового автомобіля по відкритій дорозі та по мосту проведено від найближчої смуги руху до будинку. При розрахунках прийнято наступні вихідні дані: тип та стан дорожнього покриття асфальтобетонне покриття, рівне, поверхня дорожнього покриття – суха. Параметри навколишнього середовища: температура повітря $30,2^\circ\text{C}$, вологість повітря 70,5 %, атмосферний тиск 745 мм рт. ст та швидкість вітру 1,2 м/с.

На рис. 2, 3 величини шумового навантаження, що наведені у дужках, є значеннями шумового навантаження, при наявності шумозахисних екранів. При їх розрахунку враховано втрати звукопередачі екрану за формулою (14).

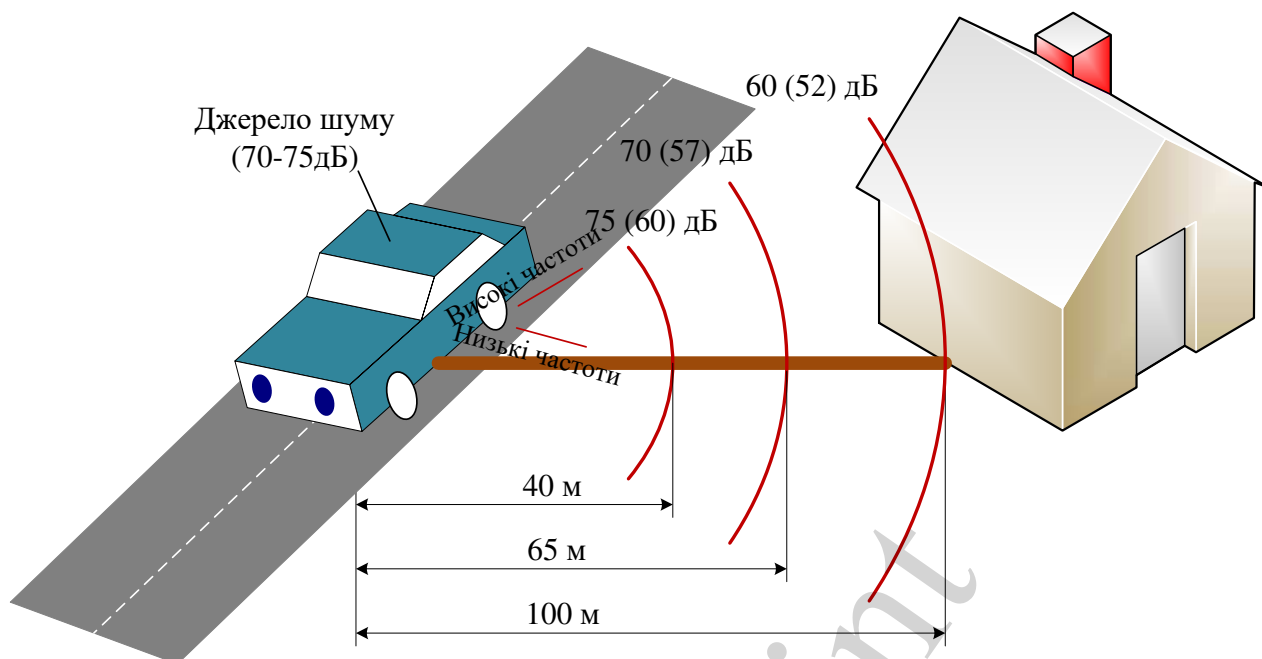


Рис. 2. Шумове навантаження при русі легкового автомобіля по відкритій ділянці автомобільної дороги

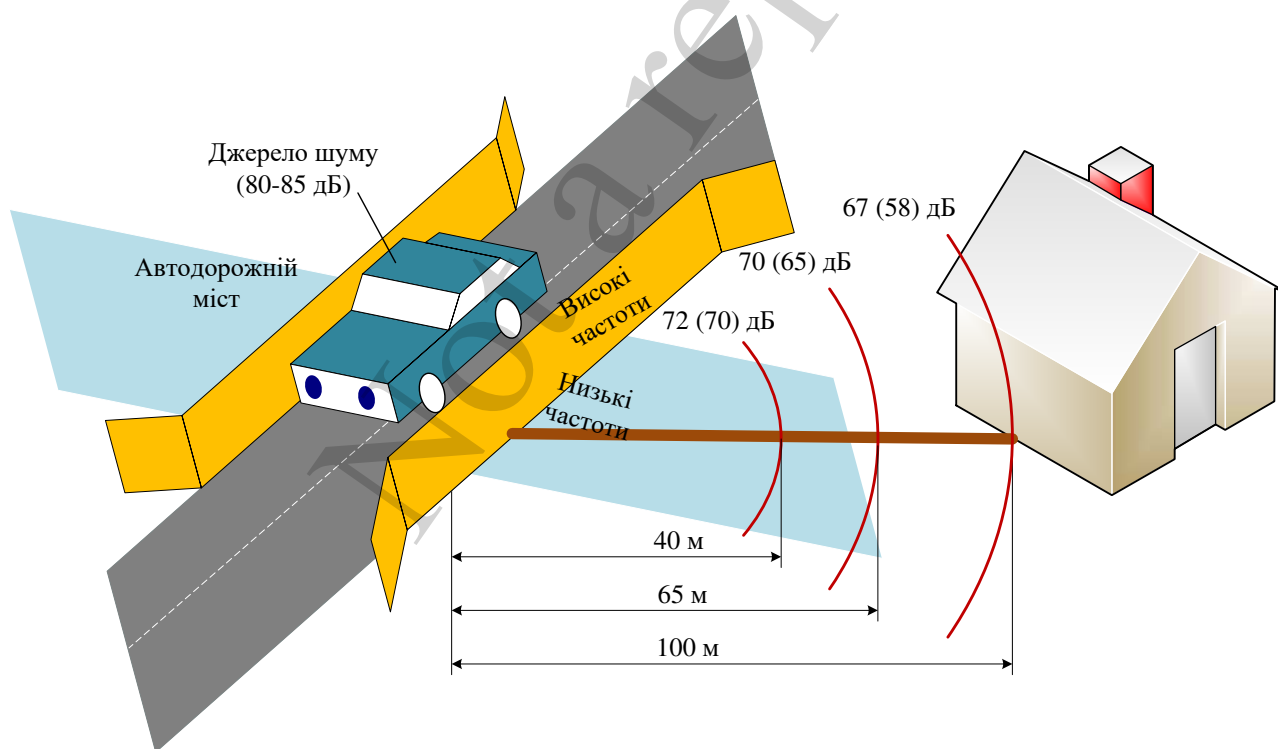


Рис. 3. Шумове навантаження при русі легкового автомобіля по автодорожньому мосту

Результати розповсюдження шумового навантаження у залежності від відстані від джерела звуку до координат вимірювання шуму показали, що із збі-

льшенням відстані шумове навантаження зменшується, як при наявності шумозахисного екрану, так і у випадку відкритої ділянки автомобільної дороги. У випадку руху автомобіля по відкритій ділянці дороги на відстані 40 м від джерела звуку шумове навантаження становить 75 дБ, а при наявності шумозахисного екрану – 60 дБ, на відстані 65 м відповідно 70 дБ та 57 дБ і на відстані 100 м – 60 дБ та 52 дБ.

У випадку руху автомобіля по мосту із джерелом звуку 80–85 дБ шумове навантаження на відстані 40 м без наявності на мосту шумозахисного екрану становить 72 дБ, а при наявності шумозахисного екрану становить 70 дБ, на відстані 65 м шумове навантаження відповідно становить 70 дБ та 65 дБ і на відстані 100 – 67 дБ та 58 дБ.

У результаті проведених теоретичних розрахунків затухання звукової хвилі за формулою (7) із визначенням коефіцієнтів за формулами (8)–(12) встановлено, що рівень шуму в придорожній полосі є значним. І на відстані у 100 м від транспортного засобу становить 60 дБ у випадку руху транспорту по відкритій ділянці автомобільної дороги. У випадку наявності шумозахисного екрану шумове навантаження зменшується і становить 52 дБ.

Результати розповсюдження шумового навантаження від руху автомобіля, що наведені на рис. 2, 3, показали, що рівень шуму на мостах перевищує рівень шумового забруднення від автомобільної дороги до 10 дБ. Встановлено, що на відстані 100 м від легкового автомобіля, що рухається рівень шумового навантаження становить 67 дБ, а при наявності шумозахисного екрану на мосту рівень шуму зменшується до 58 дБ.

5. 2. Експериментальні вимірювання шумових характеристик транспортного потоку та шуму на автомобільній дорозі

Результати експериментальних вимірювань акустичної ефективності шумозахисних параметрів екранів, що розташовані на автомобільних дорогах Рівненської області, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментальних вимірювань акустичної ефективності шумозахисних параметрів екранів (ШЗЕ)

Ділянка автомобільної дороги з ШЗЕ, км	Протяжність ШЗЕ, м	Еквівалентний рівень шуму перед ШЗЕ, дБА	Еквівалентний рівень шуму на відстані 2 м за ШЗЕ, дБА	Ефективність, дБА
261+527,1–261+598	70,9	85	71	14
274+540–274+610	70	84	70	14
285+215–285+275	60	86	73	13
285+485–285+550	65	85	73	12
288+320–288+400	80	86	73	13
288+655–288+980	325	86	71	15
289+110–289+210	100	86	70	15
289+350–289+430	80	85	71	14
289+110–289+210	100	84	69	15

Продовження таблиці 2

289+500–289+675	175	85	69	16
296+950–297+130	180	86	71	15
297+180–297+230	50	86	74	12
297+320–297+695	375	88,6	71	15
297+730–297+910	180	85	69	16
297+995–298+460	465	86	70	16
300+500–300+560	60	86	74	12
301+738–301+815	77	84	71	13
306+850–306+905	55	85	73	12
306+925–306+960	35	85	74	11
307+000–307+070	70	85	73	12
315+200–315+260	60	86	74	12
315+300–315+480	180	86	71	15
315+580–315+840	260	86	70	16
315+940–316+010	70	87	74	13
316+760–316+860	100	85	70	15
317+260–317+530	270	85	69	16
318+700–318+820	120	86	71	15
319+230–319+360	130	86	71	15
320+100–320+195	95	86	72	14
320+620–320+763	143	87	72	15
322+500 (напрямок Рівне-Київ 0+154–0+224)	70	86	73	13
322+500 (напрямок Рівне-Київ 1+050–1+136)	86	86	72	14
398+248–398+286	48	86	74	12
261+750–261+830	80	85	72	13
296+780–296+980	200	86	71	15
297+595–297+790	195	85	69	16
297+850–297+910	60	86	75	11
298+030–298+090	60	86	75	11
314+700–314+930	230	86	71	15
315+600–316+155	555	86	70	16
315+240–315+470	230	87	72	15
315+470–315+530	60	85	74	11
320+290–320+460	170	85	70	15
363+440–363+473	35	85	74,4	11
363+488–363+542	54	86	75	11
363+551–363+612	61	86	75	11
363+620–363+659	39	86	78	11

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що еквівалентний рівень звуку на території безпосередньо прилеглої до житлової забудови на відстані 2 м становить 74,4 дБА. При цьому максимальний рівень звуку на території безпосередньо прилеглої до житлової забудови на відстані 2 м становить 78,0 дБА.

Також експериментальними вимірюваннями встановлено, що еквівалентний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить

88,6 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 103,9 дБА.

Слід зазначити, що мінімальний та максимальний рівень шуму залежать, в значній мірі, від виду транспорту та інтенсивності руху в різні періоди доби.

Також було встановлено, що еквівалентний рівень звуку на відстані 2,4 м за шумозахисним екраном становить 70,7 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 2,4 м за шумозахисним екраном становить 89,8 дБА. З усього вищесказаного можна зробити висновок, що акустична ефективність даного екрану становить 16–18 дБА.

На відстані 19,5 м від існуючої автомобільної дороги та на відстані 2 м до житлової забудови: виміряний еквівалентний рівень шуму перевищував встановлене нормативне значення на 19,4 дБА. При цьому виміряний максимальний рівень шуму перевищував встановлене нормативне значення на 8,0 дБА.

Експериментальні вимірювання, що проводилися для визначення шумового навантаження при русі автомобілів по мосту, показали, що на відстані 40 м від джерела звуку еквівалентний рівень звуку становив 85 дБ, на відстані 65 м – 79 дБ та на відстані 100 м 72 дБ. Слід зазначити, що додаткове шумове навантаження від мосту виникає за рахунок вдарів коліс транспорту у деформаційні шви.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що пошкодження екрану призводять до зниження їх шумозахисних властивостей. При наявності зазору між шумозахисними екранами та виконання стічного отвору «класичним» способом (рис. 4) призводить до зниження акустичної ефективності екрану до 3 дБА.



Рис. 4. Водостічний отвір у шумозахисному екрані

6. Обговорення результатів шумового навантаження

На рівень шумового навантаження від транспортних потоків впливає інтенсивності руху автотранспорту, поздовжній та поперечний профілі дороги. Також відстань між автомобільними дорогами, наявність шумозахисних об'єктів та експлуатаційний стан проїзної частини.

Розрахунок затухання звукової хвилі за формулою (7) із визначенням коефіцієнтів за формулами (8)–(12) показав, що із збільшенням відстані шумове навантаження зменшується, як при наявності шумозахисного екрану так і у випадку відкритої ділянки автомобільної дороги (рис. 2, 3). У випадку руху автомобіля по відкритій ділянці дороги на відстані 40 м від джерела звуку шумове навантаження становить 75 дБ, а при наявності шумозахисного екрану – 60 дБ, на відстані 65 м відповідно 70 дБ та 57 дБ і на відстані 100 м – 60 дБ та 52 дБ.

У випадку руху автомобіля по мосту із джерелом звуку 80–85 дБ шумове навантаження на відстані 40 м без наявності на мосту шумозахисного екрану становить 72 дБ, а при наявності шумозахисного екрану становить 70 дБ, на відстані 65 м шумове навантаження відповідно становить 70 дБ та 65 дБ і на відстані 100 – 67 дБ та 58 дБ.

Слід зазначити, що на відстані у 100 м від джерела шуму (легкового автомобіля) величиною 70–75 дБ рівень шуму становить 60 дБ у випадку руху транспорту по відкритій ділянці автомобільної дороги (рис. 2). У випадку наявності шумозахисного екрану шумове навантаження зменшується і становить 52 дБ. У випадку руху автомобіля по мосту на відстані 100 м від джерела шуму величиною 80–85 дБ на мосту рівень шуму становить 67 дБ, а при наявності шумозахисного екрану на мосту рівень шуму зменшується до 58 дБ.

Отже, шумозахисний екран із металевих листів (перфорованих) знижує рівень шумового навантаження до 10 дБ.

Встановлено, що рівень шуму на мостах перевищує рівень шумового забруднення від автомобільної дороги до 10 дБ. Це пояснюється тим, що прогонова будова моста випромінює шумові коливання, від дій рухомого складу. Значними шумовими випромінювачами є також деформаційні шви, опорні частини, прогонові будови, плита проїзної частини.

Встановлено, що при наявності водостічного отвору у шумозахисному екрані його акустична ефективність зменшується до 3 дБА.

Розповсюдження шумового навантаження у випадку руху автомобілів по відкритій дорозі і по мосту є різною. У випадку дороги, коли джерело шуму знаходиться на рівні земляного полотна, більш дієві високі частоти, а низькі частоти, в більшості поглинаються землею. У випадку моста – де джерело шуму знаходиться на значній відстані від землі – разом з високими частотами, на людину діє також низькі частоти. Довжина звукової хвилі з низькими частотами більша, аніж з високими, отже охоплює більший радіус дії.

Результати проведених експериментальних досліджень шумових характеристик (табл. 2) шумозахисних екранів на автомобільній дорозі у Рівненській області показали, що еквівалентний рівень звуку на території безпосередньо прилеглої до житлової забудови на відстані 2 м становить 74,4 дБА. При цьому максимальний рівень звуку на території безпосередньо прилеглої до житлової забудови на відстані 2 м становить 78,0 дБА.

Також експериментальними вимірюваннями встановлено, що еквівалентний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 88,6 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 103,9 дБА.

Мінімальний та максимальний рівень шуму залежать в значній мірі від виду транспорту та інтенсивності руху в різні періоди доби.

Із проведених досліджень встановлено, що актуальним є захист прилеглих територій від шуму, який виникає при русі автомобілів по мосту, оскільки величина шумового навантаження на мостах перевищує рівень шумового навантаження від автомобільної дороги до 10 дБ.

Слід також зазначити, що отримані результати теоретичних досліджень розповсюдження шумового навантаження будуть справедливими лише для легкового автомобіля і при сонячній погоді. У випадку зміни погодних умов потрібно проводити додаткові дослідження.

Розвиток методів із дослідження рівня шуму в придорожній смузі від величини поздовжнього ухилу і середньої швидкості потоку може бути подальшим напрямком розвитку даного дослідження.

7. Висновки

1. Встановлено, що рівень шуму на мостах перевищує рівень шумового забруднення від автомобільної дороги до 10 дБ. На відстані 100 м від легкового автомобіля рівень шумового навантаження зменшується на 13,4 % у випадку руху автомобіля по мосту і на 13,3 % при русі автомобіля на відкритій ділянці автомобільної дороги.

Результати досліджень показали, що із збільшенням відстані від джерела звуку до координат вимірювання шумового навантаження шумове навантаження зменшується, як при наявності шумозахисного екрану так і у випадку відкритої ділянки автомобільної дороги. У випадку руху автомобіля по відкритій ділянці дороги на відстані 40 м від джерела звуку шумове навантаження становить 75 дБ, а при наявності шумозахисного екрану – 60 дБ, на відстані 65 м відповідно 70 дБ та 57 дБ і на відстані 100 м – 60 дБ та 52 дБ.

У випадку руху автомобіля по мосту із джерелом звуку 80–85 дБ шумове навантаження на відстані 40 м без наявності на мосту шумозахисного екрану становить 72 дБ, а при наявності шумозахисного екрану становить 70 дБ, на відстані 65 м шумове навантаження відповідно становить 70 дБ та 65 дБ і на відстані 100 – 67 дБ та 58 дБ.

2. У результаті проведених експериментальних вимірювань встановлено, що еквівалентний рівень звуку на відстані 1 м перед металевим (перфорованим) шумозахисним екраном становить 88,6 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 1 м перед шумозахисним екраном становить 103,9 дБА, що є більшим за нормативне значення 70 дБА. Також було встановлено, що еквівалентний рівень звуку на відстані 2,4 м за шумозахисним екраном становить 70,7 дБА, а максимальний рівень звуку на відстані 2,4 м за шумозахисним екраном становить 89,8 дБА. Отже, акустична ефективність шумозахисного екрану із матеріалу – сталевий лист (перфорований), який експлуатується на автомобільній дорозі у Рівненській області становить 16–18 дБА.

При наявності водостічного отвору у шумозахисному екрані його акустична ефективність зменшується до 3 дБА.

Література

1. Шумове забруднення. Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%83%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F
2. Краснова, Ю. А. (2020). Правове забезпечення екологічної безпеки від шумових впливів у ЄС. Науковий вісник публічного та приватного права, 4, 66–71. doi: <http://doi.org/10.32844/2618-1258.2020.4.11>
3. Noise and light pollution (2010). Council of Europe, Parliamentary Assembly. Resolution No. 1776. Available at: <http://www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=17923&>
4. Иванов, Н. И., Семенов, Н. Г., Тюрина, Н. В. (2012). Акустические экраны для снижения шума в жилой застройке. Безопасность жизнедеятельности, 4, 1–24.
5. Menounou, P., Papaefthymiou, E. S. (2010). Shadowing of directional noise sources by finite noise barriers. Applied Acoustics, 71 (4), 351–367. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.10.002>
6. Ahmed, A., Fahim, M. A., Seddeq, H. S. (2010). Noise prediction for outdoor cooling systems; case study. Journal of American Science, 6 (11), 899–905. Available at: http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am0611/124_4021am0611_899_905.pdf
7. Hasebe, M. (2012). Barrier with a wedge-shaped device composed of wells on the top plane. Inter Noise. New York, 1555–1564.
8. Maffei, L., Masullo, M., Aletta, F. (2012). Influence of the design of railway noise barriers on soundscape perception. Inter Noise. New York, 21–24.
9. Guidorzi, P., Klepáček, J., Garai, M. (2012). On the of reflection Index measurements on noise barriers. Euronoise. Prague, 1314–1319.
10. Шубин, И. Л. (2011). Акустический расчет и проектирование конструкций шумозащитных экранов. Москва, 332. Available at: <https://www.dissercat.com/content/akusticheskii-raschet-i-proektirovanie-konstruktsii-shumozashchitnykh-ekranov>
11. Plotkin, K. J., Gurovich, Y. A., Laboratories, W. (2009). Truck noise source heights for barrier analysis as determined from beamforming. Inter Noise. Ottawa, 1–9.
12. Поспелов, П. И., Щит, Б. А., Строков, Д. М. (2010). Повышение качества проектирования шумозащитных мероприятий на улицах и дорогах. Второй Всероссийский Дорожный Конгресс. Москва: МОО «Дорож. Конгресс», 439.
13. Грибов, С. А. (2011). Особенности проектирования и производства шумозащитных экранов. Защита населения от повышенного шумового воздействия. Санкт-Петербург.
14. Марков С. Б. (2011). Влияние местных условия на определение эффективности шумозащитных экранов на месте их установки. Защита населения от повышенного шумового воздействия. Санкт-Петербург.
15. Евгеньев, Г. И. (2005). Применение шумозащитных экранов на автомобильных дорогах США. Обзорная информация. ФДА «Росавтодор» Министерства транспорта РФ. Available at: <https://snip.ruscable.ru/Data1/56/56231/index.htm>

16. Шубин, И. Л., Щурова, Н. Е. (2010). Влияние шумозащитных барьеров на окружающую среду. Вестник МГСУ, 1, 255–261. Available at: <https://noosphere.ru/pubs/530803>
17. Summary of Noise Barriers Constructed (2010). Washington: Department of Transportation. Available at: https://www.fhwa.dot.gov/ENVIRONMENT/noise/noise_barriers/inventory/summary/sstates7.cfm
18. Castineira-Ibanez, S. (2012). Characterization of an Acoustic Barrier Made up of arrangements of Multi-Phenomena Cylindrical scatterers based on Fractal Geometries Euronoise. Prague, 1289–1293.
19. Partheeban, P., Karthik, K., Navin Elamparithi, P., Somasundaram, K., Anuradha, B. (2021). Urban road traffic noise on human exposure assessment using geospatial technology. Environmental Engineering Research, 27 (5). doi: <http://doi.org/10.4491/eer.2021.249>
20. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Nabochenko, O., Kovalchuk, Y., Voznyak, O. (2019). Experimental Study of Railway Trackbed Pressure Distribution Under Dynamic Loading. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 14 (4), 504–520. doi: <http://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.455>
21. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., Pentsak, A. (2020). Experimental study of railway ballast consolidation inhomogeneity under vibration loading. Pollack Periodica, 15 (1), 27–36. doi: <http://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.3>
22. Kovalchuk, V., Kravets, I., Nabochenko, O., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Pentsak, A. et. al. (2021). Devising a procedure for assessing the subgrade compaction degree based on the propagation rate of elastic waves. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5 (109)), 6–15. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225520>
23. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., Parneta, B. (2019). Laboratory Evaluation of Railway Ballast Consolidation by the Non-Destructive Testing. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 21 (2), 81–88. doi: <http://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.81-88>
24. Beca, I. M., Iliescu, M. (2017). The Sunet System for Monitoring Noise Pollution in Cluj-Napoca. Romanian Journal of Transport Infrastructure, 6 (2), 33–44. doi: <http://doi.org/10.1515/rjti-2017-0058>
25. Kapski Kapski, D., Kasyanik, V., Lobashov, O., Volynets, A., Kaptsevich, O., Galkin, A. (2019). Estimating the Parameters of Traffic Flows on the Basis of Processing of Localization Data on the Movement of Vehicles. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 21 (2), 89–99. doi: <http://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.89-99>
26. Mishra, R. K., Parida, M., Rangnekar, S. (2010). Evaluation and analysis of traffic noise along bus rapid transit system corridor. International Journal of Environmental Science & Technology, 7 (4), 737–750. doi: <http://doi.org/10.1007/bf03326183>
27. Gallo, M. (2020). A Piecewise-Defined Function for Modelling Traffic Noise on Urban Roads. Infrastructures, 5 (8). doi: <http://doi.org/10.3390/infrastructures5080063>

28. Maghrour Zefreh, M., Torok, A. (2018). Theoretical Comparison of the Effects of Different Traffic Conditions on Urban Road Traffic Noise. Journal of Advanced Transportation. doi: <http://doi.org/10.1155/2018/7949574>
29. Sharma, L. K., Bu, H., Franzen, D. W., Denton, A. (2016). Use of corn height measured with an acoustic sensor improves yield estimation with ground based active optical sensors. Computers and Electronics in Agriculture, 124, 254–262. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.016>
30. Melnyk, M., Lobur, M., Vasyliuk, I., Mazur, V., Hemich, N. (2011). The mathematical model of length defining position of dominated noise source in traffic flow. Proc. of the XI Intern. Conf. on the experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM'2011). Lviv – Polyana: Publishing House Vezha & Co.
31. Jonasson, H. G., Storeheier, S. (2001). Nord 2000. New Nordic prediction method for rail traffic noise. Digitala Vetenskapliga Arkivet, 51.