

Міністерство освіти і науки України
Харківська національна академія
міського господарства

В. Е. Абракітов

**БАГАТОРАЗОВІ ВІДБИТТЯ ЗВУКУ В
АКУСТИЧНИХ РОЗРАХУНКАХ**

(Монографія)

Харків 2007

УДК 691:699.84.001.63

Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках. Монографія. Харків: ХНАМГ, 2007. - 416 с. - 3 передмовою д.т.н., проф. Мартовицького В.Д.

Монографія присвячена проблематиці врахування внеску багаторазових відбиттів звуку в загальне акустичне оточення при дії джерел звуку в складних умовах (всередині приміщень із розташованими та елементами інтер'єру, на зовнішній території міської забудови із природним та техногенним ландшафтом, та ін.) Обґрунтовано їхню негативну роль в шумовому забрудненні середовища мешкання Людини та запропоновано цілий ряд заходів щодо зниження шуму.

Рецензенти:

Президент Донбаського регіонального відділення Міжнародної академії наук безпеки й екології, д.т.н., професор В.Д. Мартовицький (передмова до видання);

Професор кафедри «Безпека життєдіяльності» Придніпровської державної академії будівництва і архітектури, д.т.н. А.С. Беліков.

Рекомендовано до видання засіданням Вченої Ради Харківської національної академії міського господарства від 25.05.2007 року, протокол № 9

ISBN 966-695-085-5

@Абракітов В.Е., ХНАМГ, 2007.

Передмова

Монографія В.Э. Абракітова "Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках" присвячена актуальній проблемі зниження шуму на робочих місцях і селитьбі населених місць із метою забезпечення акустичної безпеки населення. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74* підвищені рівні шуму визнані небезпечним і шкідливим виробничим фактором, і вимагають здійснення заходів щодо їхнього зниження до нормативних значень.

Звук, випромінюваний у техногенному середовищі безліччю джерел, умовно підрозділяється на прямий і відбитий. Заходи щодо боротьби із шумом істотно ускладнюються саме наявністю відбитої складової, що представляє собою багаторазові відбиття звукової хвилі від усіляких поверхонь на її шляху. При цьому відбитий компонент хвилі при поширенні її в просторі складається із прямими звуковими хвилями, що спричиняє посилення загального хвильового поля внаслідок явища інтерференції. Тут варто вказати також на відоме явище реверберації звуку, що представляє собою загасання відбитих хвиль, яке триває через деякий час через випромінювання їх із джерела. Навіть при вимиканні джерела звуку тривалість реверберації в приміщеннях становить кілька секунд, протягом яких випромнені раніше звукові хвилі продовжують існувати й бути чутними, хоча випробовують поглинання й загасання в процесі багаторазових відбиттів. Це свідчить про те, що різного роду шумозахисні заходи повинні бути спрямовані не тільки на зниження шуму у вигляді прямих звукових променів, але в обов'язковому порядку враховувати й наявність відбитих компонентів. Наприклад, хвилі обгинають захисний акустичний екран, установлений між джерелом шуму й об'єктом, що захищається (наприклад, робочим місцем, яке слід захистити від шкідливого впливу шуму), за рахунок відбиття від поверхонь, що обгороджують (стеля, підлоги, стіни) попадають у зону його захисту, і поширюються навіть із його зворотної сторони. Наявність багаторазових відбиттів звуку істотно ускладнює проведення заходів щодо шумозниження, знижує їхню ефективність, ускладнює конструкцію шумозахисних засобів.

Монографія В.Е. Абракітова саме й охоплює питання, пов'язані з наявністю таких відбитих звукових хвиль у загальному звуковому полі. Монографія має наступну структуру: частина 1, у якій наводяться дані про поширення шуму в техногенному середовищі, про його шкоду здоров'ю людини, обґрунтовується необхідність проведення шумозахисних заходів; частина 2, у якій висвітлюються хвильові характеристики, що описують звукову хвилю й хвильові явища, що спостерігаються при її поширенні; частина 3, присвячена опису шумозахисних заходів і засобів. Частина 4 присвячена моделюванню процесів поширення шуму (причому розглядаються всі відомі види такого моделювання). Частина 5, 6 й 7 вирішують питання, безпосередньо винесені в назву книги: тобто врахування багаторазових відбиттів звуку в акустичних розрахунках - причому в частині 5 розглядаються види розрахункових формул для обліку часу реверберації звуку в приміщеннях, частина 6 описує комп'ютерну програму, створену автором для розрахунків, пов'язаних з поширенням шуму в приміщеннях, а в частині 7 надано види розрахунків, пов'язані з поширенням шуму на території міст (поза будинками). Закінчується книга частиною 8, присвяченою створенню так званих ревербераційних камер - спеціалізованих приміщень, створюваних для імітації умов відбиття звуку від різних поверхонь у процесі проведення акустичних досліджень.

Матеріал, що становить основу будь-якої наукової праці, умовно можна розділити на дві частини. Перша з них являє собою виклад відомих раніше відомостей, отриманих попередніми дослідженнями інших учених, і складовий загальний науково-технічний рівень пізнання в даній області. Друга з них - власні, особисті дослідження автора, що становлять безпосередню наукову новизну роботи. Позитивною рисою монографії В.Е. Абракітова є те, що цілий ряд глав у ній має фразу, винесену в заголовок кожної такої глави "...за матеріалами власних досліджень автора". Таким чином, різні структурні частини роботи, що містять як загальновідомі відомості, так і власні наукові досягнення автора, аж ніяк не перемішані між собою; читачеві легко розрізнити між собою фрагменти, що викладають відомі відомості, і інші фрагменти з

результатами власних досліджень автора. Внаслідок такого композиційного прийому, використаного при побудові книги, порівняно нескладним шляхом може бути визначена наукова новизна монографії: вона винесена автором у глави зі словами в заголовку "...за матеріалами власних досліджень автора". Як правило, такі глави розміщуються за главами з викладом загальновідомих відомостей, і показують особистий внесок автора в рішення тієї або іншої освітлюваної проблеми. Сумарний обсяг таких глав становить приблизно 40% загального обсягу книги. Наукова новизна також підтверджується посиланнями в даних главах на відповідні літературні джерела, тобто на статті під авторством В.Е. Абракітова, інші написані їм книги, і його винаходи, захищені патентами України й Росії. Внаслідок такого підходу претензій до наукової новизни роботи не виникає.

Матеріал становить інтерес для читача, і повинен бути опублікований.

Президент Донбаського регіонального відділення Міжнародної академії наук безпеки й екології, д.т.н., професор В.Д. Мартовицький

ЗМІСТ

Передмова.....	3
ЗМІСТ.....	6
Перелік застосовуваних скорочень	10
Частина 1. Шум - проблема всесвітня.....	11
1.1. Історія розвитку акустики як цілого комплексу наук, що вивчають звукові процеси та явища	11
1.2. Актуальність проблеми боротьби з шумом та її відображення в законодавчих актах України	19
1.3. Шум в різних сферах сьогоденного життя людства	24
1.4. Біологічна дія шуму (з застосуванням матеріалів власних досліджень)	29
1.5. Ультразвук, інфразвук та заходи боротьби із ними	33
1.6. Шум як причина акустичної корозії	38
1.7. Необхідність заходів боротьби із шумом (на прикладі галузі будівництва)	46
1.8. Індивідуальний ризик негативного впливу шуму. Соціально-економічні аспекти шумозахисних заходів	50
Частина 2. Загальні поняття про звук, притаманні йому хвильові явища та властивості.....	63
2.1. Звукові хвилі як один з видів хвиль	63
2.2. Характеристики звуку.....	64
2.3. Вимірювання рівнів шуму	79
2.4. Нормовані характеристики звуку.....	81
2.5. Хвильові явища, що супроводжують розповсюдження звуку	85

2.6. Врахування особливостей розповсюдження звуку трьома принципово різними теоріями акустики.....106

Частина 3. Заходи для зменшення рівнів шуму..... 119

3.1. Колективні засоби боротьби з шумом120

3.2. Власні авторські розробки в галузі розробки тимчасових колективних акустичних засобів боротьби із шумом на шляху його розповсюдження133

3.3. Власні авторські розробки в галузі розробки стаціонарних акустичних засобів боротьби із шумом, а саме – засобів звукоізоляції137

3.4. Індивідуальні засоби боротьби із шумом157

3.5. Власні авторські розробки в галузі розробки індивідуальних засобів захисту від шуму160

Частина 4. Моделювання в акустиці 167

4.1. Загальна уява про різновиди моделей та роль моделювання167

4.2. Чи існує потреба в моделюванні звукових явищ в акустиці?177

4.3. Фізичне моделювання акустичних процесів179

4.4. Власні авторські розробки в галузі фізичного моделювання акустичних процесів – введення додаткового критерію подібності.....187

4.5. Аналогове моделювання акустичних процесів193

4.6. Власні авторські розробки в галузі аналогового моделювання акустичних процесів: Пристрій для візуалізації зашумованості міської забудови (електронно-оптичний недискретний спосіб реєстрації [245])201

4.7. Власні авторські розробки в галузі аналогового моделювання акустичних процесів: «Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу

енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта»....	216
4.8. Математичне моделювання акустичних процесів	229
4.9. Точність і вірогідність результатів моделювання [279]	236
<i>Частина 5. Розрахунок часу реверберації звуку в приміщеннях</i>	244
5.1. Загальні відомості.....	244
5.2. Методики Себіна, Ейрінга для розрахунку часу реверберації (стислі відомості, що є в будь-якому довіднику).....	258
5.3. Методики Себіна, Ейрінга, Міллінгтона для розрахунку часу реверберації (пояснення до формул; інші більш докладні відомості)	260
5.4. Розрахунок часу реверберації звуку в приміщеннях за методикою Абракітова [283, 284, 285].....	271
5.5. Оперативне регулювання часу реверберації в приміщеннях (власна авторська розробка згідно [287])	280
<i>Частина 6. Шум в приміщеннях</i>	293
6.1. Методика розрахунку згідно СНиП (стислий, скорочений виклад).....	293
6.2. Власні авторські розробки в галузі розрахунків звукопоглинання	296
(Програма для розрахунку рівнів звукового тиску в октавних смугах частот, створюваних технологічним устаткуванням, у РТ виробничих приміщень)	296
6.3. Шумозахисні та шумозахищені будинки	313
6.4. Нові конструкції шумозахисних вікон [304].....	316
<i>Частина 7. Багаторазові відбиття звуку на зовнішніх територіях</i>	320

7.1. Багаторазові відбиття звуку на вузьких вулицях міста та актуальність проблеми захисту житлових будівель від транспортного шуму.....320

7.2. Методика розрахунку багаторазових відбиттів від акустичного екрану із змінним нахилом327

7.3. Хіба звук відбивають тільки вертикальні поверхні?334

***Частина 8. Конструювання ревербераційних камер* 350**

8.1. Уява про ревербераційні камери350

8.2. Звукоізолюючий тамбур згідно [40, 310] (власна розробка).....356

8.3. Застосування звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю згідно [290] в якості огорожувальних конструкцій ревербераційних камер (власна розробка автора)357

8.4. Багаторазові відбиття та самоузгодження хвильового поля в проміжку між двома шарами матеріалу [324]366

***Закінчення*..... 377**

***Список використаних джерел*..... 378**

***Додатки* 413**

Додаток 1.....413

Перелік застосовуваних скорочень

α	-	коефіцієнт поглинання;
f	-	частота випромінювання, Гц;
λ	-	довжина хвилі, м;
ρ	-	коефіцієнт відбиття;
τ	-	коефіцієнт пропусення;
АЧХ	-	амплітудно-частотні характеристики;
ГДК	-	граничнодопустима концентрація;
ГДР	-	граничнодопустимий рівень;
ДШ	-	джерело шуму (джерело звуку);
ЗБВ	-	залізобетонні вироби;
ІЧ	-	інфрачервоне (випромінювання);
РТ	-	розрахункова точка.

ЧАСТИНА 1. ШУМ - ПРОБЛЕМА ВСЕСВІТНЯ

1.1. Історія розвитку акустики як цілого комплексу наук, що вивчають звукові процеси та явища

Акустика (від грецького *akustikos* – слуховий; те, що слухається), у вузькому змісті слова - навчання про звук, тобто про пружні коливання й хвилі в газах, рідинах і твердих тілах, що може слухати людське вухо (частоти таких коливань знаходяться у діапазоні 16 Гц-20 кГц); у широкому змісті - область фізики, яка досліджує пружні коливання й хвилі від найнижчих частот (умовно від 0 Гц) до гранично високих частот 10^{12} - 10^{13} Гц, їхню взаємодію з речовиною й застосування цих коливань (хвиль).

Акустика — одна із самих найдавніших областей знання, що зародилася з потреби дати пояснення явищам слуху й мови (а особливо – музичним звукам й інструментам). Ще давньогрецький математик і філософ Піфагор (6 ст. до н.е.) виявив зв'язок між висотою тону й довжиною струни або труби; Аристотель (4 ст. до н.е.) розумів, що звучне тіло викликає стиск та розрідження повітря, і пояснював луну відбиттям звуку від перешкод.

В період середньовіччя розвиток акустики загальмувався. Але, починаючи з епохи Відродження, її прогрес стає помітним. Італійський учений Леонардо да Вінчі (15-16 ст.) досліджував відбиття звуку, сформулював принцип незалежності поширення звукових хвиль від різних джерел.

Історію розвитку акустики, як фізичної науки, можна умовно розділити на 3 періоди. Перший період від початку 17 ст. до початку 18 ст. — характеризується дослідженнями системи музичних тонів, їхніх джерел (струни, труби), швидкості поширення звуку. Г. Галілей виявив, що звучне тіло випробовує коливання й що висота

звуку залежить від частоти цих коливань, а інтенсивність звуку — від їхньої амплітуди. Французький учений М. Мерсенн, згідно за Галілеєм, уже міг визначити число коливань звучної струни; він вперше виміряв швидкість звуку в повітрі. Р. Гук (Англія) установлює експериментальним чином пропорційність між деформацією тіла й пов'язаним з нею напруженням — основний закон теорії пружності й акустики, а Х. Гюйгенс (Голландія) — важливий принцип хвильового руху, названий його ім'ям (див. далі).

Другий період охоплює два століття — від створення основ механіки І. Ньютоном (кінець 17 ст.) і до початку 20 ст. У цей період акустика розвивається як розділ механіки. Створюється загальна теорія механічних коливань, випромінювання й поширення звукових (пружних) хвиль у середовищі, розробляються методи виміру характеристик звуку (звукового тиску в середовищі, імпульсу, енергії й потоку енергії звукових хвиль, швидкості поширення звуку). Діапазон звукових хвиль розширюється й охоплює як область інфразвуку (до 16 Гц), так й ультразвуку (понад 20 кГц). З'ясовується фізична сутність тембру звуку (його «фарбування»).

З робіт Ньютона починається розквіт класичної фізики. Механіка, гідродинаміка й теорія пружності, теорія хвиль, акустика й оптика розвиваються в тісному зв'язку одне з одним. Члени Петербурзької Академії наук Л. Ейлер і Д. Бернуллі й французькі вчені Ж. Д'Аламбер і Ж. Лагранж розробляють теорію коливань струн, стрижнів і пластинок, пояснюють походження обертонів. Німецький учений Е. Хладні (кінець 18 — початок 19 ст.) експериментально досліджує форми звукових коливань, відтворюваних різними звучними тілами — мембранами, пластинами, дзвонами. Т. Юнг (Англія) і О. Френель (Франція) розвивають подання Гюйгенса про поширення хвиль,

створюють теорію інтерференції й дифракції хвиль. Х. Доплер (Австрія) установлює закон зміни частоти хвилі при русі джерела звуку щодо спостерігача. Величезне значення не тільки для акустики, але й для фізики в цілому мало створення методів розкладання складного коливального процесу на прості складові — а саме створення аналізу коливань, — і можливість синтезу складних коливань із простих. Математичний метод розкладання періодично повторюваних процесів на прості гармонійні складові був знайдений французьким ученим Ж. Фур'є. Експериментально аналіз звуку — розкладання його в спектр гармонійних коливань за допомогою набору резонаторів — і синтез складного звуку із простих складових здійснив німецький учений Г. Гельмгольц. Підбором камертонів з резонаторами Гельмгольцу вдалося штучно відтворити різні голосні. Він досліджував состав музичних звуків, пояснив тембр звуку характерним для нього набором додаткових тонів (гармонік). На основі своєї теорії резонаторів Гельмгольц дав першу фізичну теорію вуха як слухового апарата. Його дослідження заклали основу фізіологічної акустики й музичної акустики. Весь цей етап розвитку акустики підсумований англійським фізиком Релеєм (Дж. Стрет) у його класичній праці «Теорія звуку».

На рубежі 19 й 20 ст. важливі роботи з акустики були виконані російським фізиком Н. А. Умовим, що ввів поняття щільності потоку енергії для пружних хвиль. Американський учений У. Себін заклав основи архітектурної акустики. Російський фізик П. Н. Лебедев (разом з Н. П. Неклепаєвим) виділив з різкого звуку електричної іскри ультразвукові хвилі із частотами до кількох сотень кГц і досліджував їхнє поглинання в повітрі.

До початку 20 ст. інтерес до акустики слабшає;

акустику вважають теоретично й експериментально завершеною галуззю науки, у якій залишилися невіршеними лише завдання локального характеру.

Третій, сучасний період в історії акустики починається в 20-х рр. 20 ст. Він зв'язаний, насамперед, з розвитком електроакустики й створенням радіотехніки й радіомовлення. Перед акустикою встало нове коло проблем — перетворення звукових сигналів в електромагнітні й назад, їхнє посилення й якісне відтворення. У той же час радіотехніка й електроакустика відкрили небачені раніше можливості розвитку акустики. Електроакустика з'явилася ще в останній чверті 19 ст. В 1876 був винайдений телефон (Белл, США), в 1877 - фонограф (Едісон, США). В 1901 був розроблений магнітний запис звуку, застосований потім у магнітофоні й звуковому кіно. На початку 20 ст. електромеханічні перетворювачі звуку були застосовані в гучномовцях, а в 20-х рр. стали основою всіх сучасних акустичних апаратур.

Електронна лампа дала можливість посилення надзвичайно слабких акустичних сигналів, перетворених в електричні. Були розроблені методи радіоакустичних вимірів, аналізу й відтворення звуку. Ці нові можливості революціонізували акустику, перетворивши її із «завершеної області механіки» в самостійний розділ сучасної фізики й техніки.

Розвиток акустики в 1-й половині 20 ст. одержав потужний імпульс у зв'язку із запитамі військової техніки. Завдання визначення положення й швидкості літака (звукова локація в повітрі), підводного човна (гідролокація), визначення місця, часу й характеру вибуху, глушіння шумів літака - всі ці проблеми вимагали більш глибокого вивчення механізму утворення й поглинання звуку, поширення звукових (зокрема, ультразвукових) хвиль у складних умовах. Проблеми генерації звуку стали

предметом великих досліджень й у зв'язку з розвитком загальної теорії коливань, що охоплює воедино механічні, електричні й електромеханічні коливальні процеси. В 20-х й 30-х рр. багато робіт було присвячено теорії автоколивань - коливань системи, пов'язаної з постійним джерелом енергії, що самопідтримуються; великий внесок у розробку цієї теорії внесла радянська школа фізиків, що очолювалася Л. И. Мандельштамом і Н. Д. Папалексі. Особливий інтерес викликало питання про поширення звукових хвиль великої інтенсивності (наприклад, вибухових хвиль); роботи російських фізиків А. А. Ейхенвальда й Н. Н. Андреева в цій області внесли значний вклад у нелінійну акустику, предметом дослідження якої є потужні звукові поля. М. Лайтхілл (Англія, 1952) дав загальну теорію аеродинамічної генерації звуку, яка вивчає виникнення звуку в середовищі, яке рухається, за рахунок нестійкості потоку газу. Н. Н. Андреев й И. Г. Русаков (1934), Д. И. Блохінцев (1947) розробили основи акустики середовищ, що рухаються.

Перші успіхи в гідроакустиці були досягнуті французьким фізиком П. Ланжевенном (1916), який застосував ультразвукові хвилі для виміру глибини моря й виявлення підводних човнів. Явище наддалекого поширення звуку вибуху в море в підводних звукових каналах було відкрито незалежно американськими вченими (М. Івінгом і Д. Ворцелем, 1944) і радянськими вченими (Л. М. Бреховских, Л. Д. Розенбергом, 1946). Проблемаам звукопоглинання й звукорозсіяння, які придбали особливу актуальність у зв'язку з розвитком архітектурної й будівельної акустики, були присвячені дослідження С. Н. Ржевкіна, Г. Д. Малюжинца й В. В. Фурдуєва. Велика увага була приділена вивченню акустичних шумів і методам їхнього усунення.

Вивчення впливу структури середовища на поширення

звуку у свою чергу створило можливість застосування звукових хвиль для зондування середовища, зокрема атмосфери; це привело до розвитку атмосферної акустики.

В останні роки надзвичайно велике значення придбали дослідження ультразвуку, (особливо високої частоти і великих інтенсивності), який став засобом вивчення структури й властивостей речовини. Ще в 20-х рр. радянський учений С. Я. Соколов застосував ультразвук для дефектоскопії металів. У Німеччині Х. О. Кнезер (1933) виявив явище сильного поглинання й дисперсії ультразвуку в багатоатомних газах. Пізніше дисперсія й аномальне поглинання ультразвуку були виявлені також й у рідинах. Загальна теорія цих явищ, т.зв. релаксаційна теорія, була дана Л. И. Мандельштамом і М. А. Леонтовичем (1937). Ультразвукові коливання високої частоти викликають також перебудову структури рідин, дисоціацію молекул і багато інших ефектів. На стику акустики й оптики Мандельштам (1918, 1926) і Л. Бриллюен (Франція, 1922) створили теорію розсіювання світла на ультразвукових хвилях у рідинах і твердих тілах (див. далі). Це явище виявилось важливим для вивчення молекулярної структури речовини.

Коло питань, пов'язаних із впливом молекулярної структури речовини на поширення ультразвуку, називають молекулярною акустикою, яка вивчає поглинання й дисперсію ультразвуку, у багатоатомних газах, рідинах і твердих тілах. Ультразвук виявився не тільки засобом дослідження, але й потужним знаряддям впливу на речовину.

Важливе значення придбали дослідження гіперзвуку (частоти 1 ГГц і вище). Інтенсивно досліджуються взаємодії гіперзвукових хвиль із електронами в металах і напівпровідниках.

Глибокі перетворення відбулися й у старих розділах

акустики. У середині 20 ст. починається швидкий розвиток психофізіологічної акустики, викликаний необхідністю розробки методів неспотвореної передачі й відтворення безлічі звукових сигналів — мови й музики — по обмеженому числу каналів зв'язку. Ці питання акустики входять у коло проблем загальної теорії інформації й зв'язку. Досліджувалися механізми утворення різних звуків мови, характер їхнього звукового спектра, основні показники якості мови, сприйманої на слух. Створено прилади видимої мови, що дають видимі зображення різних звуків. Розробляються методи кодування мови (стислої передачі її основних елементів) і її розшифровки (синтезу), розгорнулися дослідження механізмів слухового сприйняття, відчуття гучності, визначення напрямку приходу звуку (угорський учений Д. Бекеші). У цій області акустика зімкнулася з фізіологією органів почуттів і біофізикою.

Таким чином, сучасна акустика за своїм змістом й значенням далеко переступила ті межі, у яких вона розвивалася до 20 ст.

Класифікація окремих наук, що входять в загальний комплекс під назвою «акустика», див. на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Класифікація окремих наукових напрямків, що входять в акустику.

1.2. Актуальність проблеми боротьби з шумом та її відображення в законодавчих актах України

Шумом називається звук, який порушує тишу, постійно заважає слуховому сприйняттю і може призводити до порушення здоров'я. Шум навколишнього середовища - це рівень звуку, який звичайний для певного місця - цеху, заводу, вулиці тощо. Він виникає від цілого впливу багатьох джерел шуму (ДШ), що можуть знаходитися на різних відстанях.

В даний час усе частіше й частіше на найперше місце виступають питання забезпечення акустичного комфорту та акустичної безпеки середовища мешкання Людини. Відмінною рисою сучасних міст у нашій країні і за рубежом є інтенсивний їхній ріст при обмежених просторових рамках. Це приводить до зближення, а найчастіше до тісного переплетення різних функціональних зон міста. У таких умовах неминучий негативний вплив одних зон на інші. Особливе значення при цьому здобувають питання охорони навколишнього середовища і, зокрема, захист міських забудов від шумового забруднення. Шум, створюваний безліччю різноманітних джерел, неймовірним образом забруднює урбанізований простір сучасних міст, негативно позначається на здоров'ї і психологічному стані їхніх жителів, найчастіше є причиною психічних розладів і соціально-побутових конфліктів.

Впровадження у виробництво нових технологічних процесів, підвищення потужностей і швидкості технологічного устаткування, механізація виробничих процесів призвели до того, що робітники на виробництві протягом зміни також більшою чи меншою мірою зазнають негативного впливу шуму.

Конституція України гарантує громадянам право на життя та здоров'я, на створення безпечних та належних

умов праці [1]. Закон про охорону праці, що нині діє в Україні, ставить на пріоритетне місце життя і здоров'я людини [2]. Особливого значення при цьому набувають питання охорони навколишнього середовища і, зокрема, захист міських забудов від шумового забруднення. Одним з небезпечних і шкідливих факторів техногенного середовища, поряд з іншими, що перелічені в підзаконних актах, є шум, здатний впливати на стан здоров'я людини й комфортність умов її існування. Стаття 24 Закону України [3] прямим чином твердить про необхідність захисту населення нашої держави від шкідливого впливу акустичних випромінювань. Значні рівні звукового тиску згідно з ГОСТ 12.0.003-74* [4] класифікуються як шкідливий (і навіть небезпечний) виробничий фактор [5]. Це затверджується цілою низкою інших нормативних документів [6-9, 10, 11, 12-18]. Порушення цих норм зовсім неприпустиме та призводить до порушень нормального життєвого циклу Людини [19], а також до багатьох різноманітних хвороб [20-24].

Таким чином, варто визнати, що в даний час усе частіше й частіше на найперше місце виступають питання забезпечення акустичного комфорту середовища мешкання Людини.

Така проблема повинна вирішуватися системою екологічного менеджменту - частиною загальної системи адміністративного управління, що включає організаційну структуру планування, розподіл відповідальності, методи і процедури, процеси та ресурси для розробки, упровадження, реалізації, аналізу і підтримки екологічної стратегії. Питання боротьби з шумом органічно вплітаються в таку систему, що затверджено на законодавчому рівні [3].

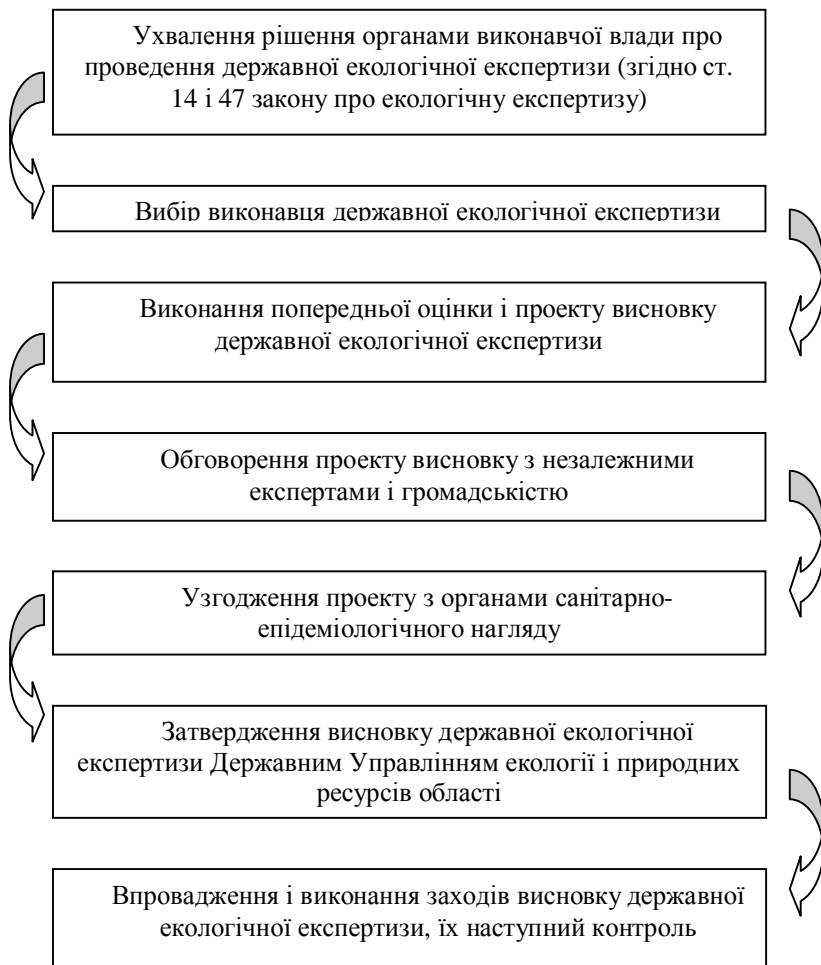


Рис. 1.2. Алгоритм рішення складної екологічної ситуації в житлових масивах міст.

Дуже важливою рисою сучасності є наближення до всесвітніх стандартів, що являє собою найважливішу вимогу щодо входу нашої держави в Європейську Співдружність. Слід відзначити, що система сучасного екологічного менеджменту заснована на стандартах серії ISO 14000, і є інструментом управління, що дозволяє

організації будь-якого розміру чи типу керувати впливами її діяльності, продукції чи послуг на навколишнє середовище.

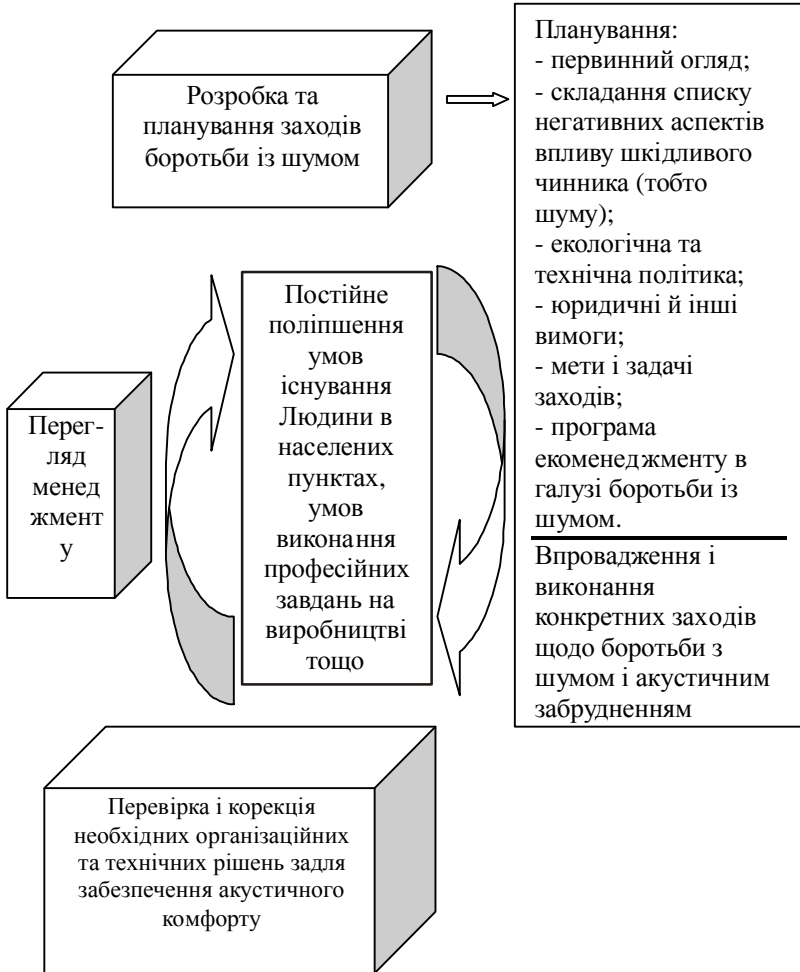


Рис. 1.3. Принципові стадії робіт в галузі боротьби із акустичним забрудненням довкілля та забезпечення акустичного комфорту населених місць (та впровадження відповідності міжнародного стандарту ISO 14001 в цій галузі).

Система екологічного менеджменту уможливорює структурований підхід до постановки екологічних цілей і задач, їхнього досягнення і декларування того, що вони були досягнуті. ISO 14001- центральний стандарт серії, який визначає вимоги для такої системи, підлягаючої сертифікації згідно європейським нормам. Необхідно помітити, що вищевказаний стандарт не є технічним. Він не встановлює допустимі рівні шуму і не визначає технологічні міри зниження негативного впливу шуму на людей та довкілля. Стандарт ISO 14001, скоріше, визначає деякі процедури і призначає визначених осіб для контролю за їх виконанням.

Первинний Екологічний Огляд (IER) згідно такому стандарту, це - систематична ідентифікація і документація істотних негативних впливів (чи потенційних впливів), зв'язаних безпосередньо чи побічно з діяльністю організації, її продукцією і послугами. Він пропонує такі послідовні стадії огляду:

- 1) огляд практики екоменеджменту;
- 2) огляд діяльності об'єктів, що забруднюють довкілля акустичним випромінюванням та іншими різновидами забруднень, їхньої продукції чи послуг;
- 3) огляд релевантного законодавства;
- 4) огляд пов'язаних з цим нещасних випадків, фактів захворювань, і інших інцидентів, що мали місце у зв'язку з тим.

У відповідності із концепцією зразкового будівництва Німеччини, наприклад, говориться: «будівничі споруди необхідно розташовувати, будувати, змінювати та підтримувати в схоронності таким чином, щоб це не носило загрози громадській безпеці та ладу, особливо для життя та здоров'я» [25].

Це свідчить, що проблема боротьби із шумом в наші часи характерна для багатьох країн, багатьох народів.

Отже, проблема акустичного дискомфорту населення та робітників промислових підприємств – проблема всевітня; вона неминуче постає перед людством на певному етапі техногенного розвитку суспільства.

Далі показано, яким саме чином згідно з діючим законодавством України та нормативними актами нашої держави вирішується проблема боротьби із шумом.

Огляд практики системи сучасного екологічного менеджменту, яка заснована на стандартах серії ISO 14000 [26], та принципів стадії робіт в галузі боротьби із акустичним забрудненням довкілля та забезпечення акустичного комфорту населених місць, поглиблено наведені в нашій роботі [27].

1.3. Шум в різних сферах сьогоденного життя людства

Про шкідливий вплив шуму на людину говорять медики, фізіологи, психологи. Шум негативно впливає на самопочуття і працездатність, стає причиною підвищеної дратівливості. Надмірні шумові впливи можуть привести до серйозного порушення здоров'я, у той час як при зростаючих психічних навантаженнях ми, як ніколи, маємо потребу в тиші і спокої [28].

Шум — одна з найпоширеніших виробничих шкідливостей, яку дуже складно усунути. При тривалому впливі шуму не тільки знижується гострота слуху, але й погіршується робота центральної нервової і серцево-судинної систем, шлунково-кишкового тракту, органів дихання, виникають запаморочення і функціональні зміни нервової системи, втома, ослаблення пам'яті та уваги. Шум може стати причиною виробничого травматизму та зниження продуктивності праці: так, підвищення рівня шуму на 10 дБ зменшує продуктивність праці на 10%. Увесь комплекс змін, який відбувається в організмі

людини при тривалому впливі шуму, розглядається як так звана "шумова хвороба" [20].

Шум стає сьогодні усе більш серйозною проблемою великих міст. Історія боротьби із ним налічує вже багато років, десятиріч, сторіч... Міський шум має тенденцію до зростання. Точну кількісну оцінку того процесу збільшення рівнів надати дуже важко; але, наприклад, за даними [29] середнє щорічне зростання рівнів шуму описується значенням 0,5 дБА в рік.

Стаття 49 Конституції України гарантує право громадян нашої держави на охорону здоров'я. Однак це право не завжди реалізується на практиці. Таке положення обумовлене тим, що виконання багатьох видів робіт в різних сферах промисловості має свою специфіку, що знижує ефективність боротьби з виробничими шкідливостями за рахунок традиційних методів й засобів.

В 1994-1995 роках автором був проведений аналіз стану безпеки праці в промисловості нашої держави, що надав тодішню картину незадовільного положення в цій галузі. Матеріали таких досліджень були опубліковані в 1995 р. в журналі "Праця" [30] та викликали великий громадський резонанс. З ретроспективою нашої роботи можна ознайомитись в [30].

Аналогічні дослідження проводилися автором і в подальші роки. Методологією нашої діяльності в цьому напрямку є системний підхід та застосування системного аналізу складної проблеми шумового забруднення довкілля та його негативного впливу на мешканців цього середовища (насамперед, на людину): [31 - 39].

В 2004-2005 роках автором був проведений повторний аналіз стану безпеки праці в промисловості, який показав, що в Україні рівень смертельного травматизму в порівнянні з попереднім, 2003 роком знизився на 5%. В 72% випадків причини цього негативного явища мають

організаційний характер, в 17% - технічний й в 11% - психофізіологічний.

Аналіз праць вітчизняних і закордонних учених, а також проведені нами дослідження санітарно-гігієнічних умов праці на об'єктах промисловості, що відносяться до різних галузей виробництва Придніпровського регіону й автономної республіки Крим, показали, що роботи в цехах та виробничих приміщеннях цих підприємств супроводжуються шкідливими виробничими факторами, ступінь впливу яких у багато разів перевищує вимоги санітарних норм [8, 9]. До таких шкідливостей можна віднести: запиленість; загазованість; недопустимі параметри мікроклімату; підвищені рівні шуму; вібрації; значні теплові випромінювання, та ін.

Чисельність робітників Дніпропетровської області, зайнятих у технологічних процесах з перевищенням ГДК та ГДР шкідливих впливів, склала більше 210 тис. чіл., у тому числі: при підвищеному рівні пилу - більше 120 тис. чол.; загазованості - більше 77,8 тис. чол.; вібрації - більше 30 тис. чол.; шуму, інфразвуку, ультразвуку - більше 137 тис. чіл.; несприятливому мікрокліматі - більше 87 тис. чол.; осіб, що незахищені від дії несприятливих факторів природного походження при роботі на відкритому повітрі - більше 35 тис. чол.; підвищеної ваги праці - близько 80 тис. чіл.; трудових операціях у незручній робочій позі - більше 73 тис. чол.

Дослідження на вплив шкідливих виробничих факторів проводилися комплексно, - а саме, аналізувалися наявність шкідливих хімічних речовин; несприятливі метеорологічні умови; промениста теплота; недостатнє освітлення; рівні шуму; вібрація; випромінювання, що іонізує; електромагнітні поля; підвищена напруженість і вага праці й ін. Аналіз [40, 42] показав (рис.1.4 і табл. 1.1), що найпоширенішим із всіх шкідливих факторів обстежених

серцево-судинної систем.

У сучасному місті шум супроводжує людину практично постійно й повсюдно.

Таблиця 1.1.

Результати дослідження умов праці робітників на деяких робочих місцях.

Ділянка цеху, що підлягає реконструкції	Запиленість, мг/м ³		Загазованість повітря CO, мг/м ³		Шум, дБА		Теплові випромінювання, Вт/м ²		Температура повітря, К		Швидкість руху повітря, м/с	
	факт	ГДК	факт	ГДК	факт	ГДР	факт	ГДР	факт	ГДР	факт	ГДР
Піч випалу вапняку	23	4	2,8	20	89	75	3500	140	301	301	1,2	0,2 - 0,5
Ділянка кам'яного лиття	25	4	2,8	20	89	75	5582	140	311	301	1,3	0,2 - 0,5
Пропарювальна камера ЗБВ	24	4	2,8	20	87	75	700	140	301	301	0,8	0,2 - 0,5
Ковальсько-термічне відділення ЗБВ	55	4	2,8	20	87	75	1500	140	302	301	0,8	0,2 - 0,5
Плавліні печі базальту	15	4	11,2	20	86	75	3500	140	299	301	1,2	0,2 - 0,5
Плавліні печі металу	10	4	2,8	20	89	75	1260 - 1400	140	313	301	0,9	0,2 - 0,5

Шум впливає на людину не тільки в умовах виробництва, поблизу автотраси, аеродрому, залізниці, або в побуті, - але й на будівельних майданчиках при зведенні будинків й споруд, або ремонті, реконструкції їх у сучасних стиснутих умовах міський забудови, де має надто високі рівні й часто формує шумовий режим цілих районів [43 -54].

1.4. Біологічна дія шуму (з застосуванням матеріалів власних досліджень)

Згідно з гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 528 від 27.12.01 [5], надається визначення класу умов праці в залежності від рівнів шуму та перевищення граничнодопустимих рівнів (ГДР) ультразвуку та інфразвуку. При тому рівні, що менше та дорівнюють ГДР, визначають допустимий клас умов праці; рівні звуку 85-115 дБА - шкідливий клас умов праці; рівні звуку > 115 дБА - небезпечний.

Нейросенсорна приглухуватість (код Н903 згідно з Міжнародною статистичною класифікацією хвороб та споріднених проблем МКХ-10) під систематичним впливом виробничого шуму входить в Перелік професійних захворювань, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 1662 від 8.11.2000 р. [5].

Шум діє не тільки на органи слуху. Подразнення шумом крізь волокна слухових нервів передається на центральну нервову та вегетативну нервові системи. Через ці системи шум негативно впливає на внутрішні органи людини, що призводить до значних змін у функціональному стані організму, впливає на психічний стан людини, викликаючи турботу та подразнення [55, 56].

Вплив шуму на вегетативну нервову систему

виявляється навіть при рівнях шуму, що не перевищують нормативні, тобто при 40-70 дБА. При цьому цей вплив не залежить від суб'єктивного сприйняття (тобто від індивідуальної емоційної оцінки: яка може бути навіть позитивною, (наприклад, при прослуховуванні гучної музики та ін.)) і викликає вегетативні реакції - порушення периферичного кровообігу, а також підвищення артеріального тиску (що особливо виражене при рівнях > 85 дБА).

Поряд з цим, починаючи вже з рівнів в 30 дБА, паралельно із вегетативними реакціями (для яких характерна чітка відповідність між шумом та реакцією), мають прояв психічні реакції. Для психічних реакцій такої чіткої відповідності немає, визначальне значення в суб'єктивній оцінці неприємності шуму має особисте ставлення людини до таких звуків в даній конкретній ситуації. Виявлено, що вплив шуму на психіку збільшується із збільшенням рівнів шуму (це очевидно); із збільшенням частоти шуму (тобто високочастотний шум більш неприємний, ніж низькочастотний (що стверджується також санітарним нормуванням [6, 7, 9, 8])), а також із звуженням ширини смуги частот, на якій знаходиться максимум енергії, що випромінюється: (типовий приклад - сирена та ін.)

Вплив шуму на центральну нервову систему викликає збільшення латентного (тобто прихованого) періоду зорово-моторної діяльності, призводить до порушення рухомості нервових процесів, зміні енцефалографічних показників, порушує біоелектричну активність головного мозку із проявом загальних функціональних змін, суттєво змінює біопотенціали мозку, їхню динаміку, викликає біохімічні зміни у структурах головного мозку.

Такі зміни відчуваються при шумі 50-60 дБА; із підвищенням рівнів негативний ефект збільшується. При

тому зміни в функціональному стані центральної та вегетативної нервових систем починаються раніше, ніж патологічні зміни в органах слуху (зниження слухової чутливості). Люди, що знаходяться під впливом шуму, скаржаться на роздратованість, головний біль, запаморочення, підвищену утомливість, зменшення апетиту, та ін. Це є симптоми так званої "шумової хвороби", до симптомів якої віднесені: підвищення кислотності, серцево-судинна недостатність, нейроендокринні розлади.

Базовий рівень 80 дБА (занесений у нормативні документи як безпечний) відповідає лише нульовому ризику втрати слуху. Але, як було показано вище, й значно менші рівні шуму мають негативний вплив (хоча й не викликають втрати слуху). Таким чином, 80 дБА не є дійсно безпечним рівнем негативної дії шуму. Сподіваємося, що гранично допустимі рівні шуму будуть все ж такі переглянуті із врахуванням більш об'ємних та серйозних досліджень, аніж формальний критерій - (ризик втрати слуху).

Концепцію біологічної еквівалентності ефектів впливу шуму та нервового навантаження розглянуто в роботі [57].

* * *

Як вказується в відомих літературних джерелах, шум є причиною часткової або повної втрати слуху та розладу щонайменш, двох систем організму Людини:

- 1) центральної нервової системи
- 2) серцево-судинної системи.

Що стосується слухового апарату Людини, то причина негативної дії шуму на нього ясна, і якихось додаткових коментарів не потребує. Причина розладу центральної нервової системи також лежить на поверхні. Зрозуміло, що подразнення слухових аналізаторів не проходить для організму безвісті. Під дією шуму у Людини розвиваються

стійкі порушення емоційного та психологічного стану, із всіма багатьма негативними наслідками, що впливають звідки. Малоозрозумілою (але констатованою в чисельних літературних джерелах) була саме негативна дія шуму на серцево-судинну систему. Цей вплив був зафіксований у надзвичайно значній кількості випадків, але пояснити, чому це відбувається, автори тих літературних джерел не могли, (і відходили від надання докладних пояснень), концентруючи власну увагу не на самій причині, а на описі негативних наслідків впливу шуму на серце, обмін крові, судинну систему, на лікуванні тих хвороб (якщо мова йде саме про медичні дослідження) та ін.

Вперше справжня причина негативної дії шуму на серцево-судинну систему пояснена в главі 1.2 нашої монографії "На шляху до наукових відкриттів" [58]. Базуючись на описі матеріалів досліджень, що були проведені на початку 1960-х років в СРСР академіком Є.Г. Коноваловим, (та навіть призвели до здійснення ним наукового відкриття, що було зареєстроване за № 109 Державного реєстру відкриттів СРСР із пріоритетом від 31.05.1961), ми змогли навести такий безспірний факт - під впливом звукових хвиль в капілярах – (серцево-судинна система Людини має загальну довжину 100000 км), виникають стоячі хвилі, що діють як поршень насосу, внаслідок чого значно підвищується артеріальний та венозний тиск [59. - с. 480-482]. Підвищення тиску крові при опроміненні організму шумом фіксувалося безліччю дослідників; але, незнайомі із матеріалами даного наукового відкриття, вони раніше були не в змозі пояснити його дійсну причину, та пояснювали це складними біологічними процесами - як реакцію організму на проходження через його тканини пружних коливань звукової хвилі. Це, природно, також має місце; але в світлі вищенаведеного слід вказати, що значне місце має і

безпосередній прямий вплив звуку (шуму) на обмін крові в капілярах Людини [60]. Цьому питанню присвячена глава 1.2 нашої монографії "На шляху до наукових відкриттів" [58].

1.5. Ультразвук, інфразвук та заходи боротьби із ними

Останнім часом усе більш широке поширення у виробництві знаходять технологічні процеси, засновані на використанні енергії ультразвуку. Ультразвук знайшов також застосування в медицині. У зв'язку з ростом одиничних потужностей і швидкостей різних агрегатів і машин зростають рівні шуму, у тому числі й в ультразвуковій області частот.

Ультразвуком називають механічні коливання пружного середовища з частотою, що перевищує верхню межу чутності $f > 20$ кГц. Одиницею виміру рівня звукового тиску ультразвуку є дБ. Одиницею виміру інтенсивності ультразвуку є ват на квадратний сантиметр ($\text{Вт}/\text{см}^2$).

Ультразвук характеризується локальною дією на організм, оскільки передається при безпосередньому контакті з ультразвуковим інструментом, оброблюваними деталями чи середовищами, де збуджуються ультразвукові коливання. Ультразвукові коливання, які генеруються промисловим устаткуванням, впливають на організм людини. Тривалий систематичний вплив ультразвуку, котрий поширюється повітряним шляхом, викликає зміни нервової, серцево-судинної й ендокринної систем, слухового і вестибулярного аналізаторів. Найбільш характерним є наявність вегето-судинної дистонії й астеничного синдрому.

Ступінь виразності змін залежить від інтенсивності і тривалості впливу ультразвуку і підсилюється при наявності в спектрі високочастотного шуму, при цьому приєднується виражене зниження слуху. У випадку

продовження контакту з ультразвуком зазначені розлади здобувають більш стійкий характер.

При дії локального ультразвуку виникають явища вегетативного поліневриту рук (рідше ніг) різного ступеня виразності, аж до розвитку парезу кистей і передпліч, вегетативно-судинної дисфункції.

Характер змін, що виникають в організмі під впливом ультразвуку, залежить від дози впливу.

Малі дози - рівень звуку 80-90 дБ - дають стимулюючий ефект - мікромасаж, прискорення обмінних процесів. Великі дози - рівень звуку 120 і більш дБ – дають вражаючий ефект.

Заходи попередження несприятливої дії ультразвуку на організм операторів технологічних установок, персоналу лікувально-діагностичних кабінетів складаються в першу чергу в проведенні заходів технічного характеру. До них відносяться створення автоматизованого ультразвукового устаткування з дистанційним управлінням; використання по можливості малопотужного устаткування, що сприяє зниженню інтенсивності шуму й ультразвуку на робочих місцях на 20-40 дБ; розміщення устаткування в звукоізованих приміщеннях кабінетів з дистанційним керуванням; встановлення звукоізолюючих пристроїв, кожухів, екранів з листової сталі чи дюралюмінію, покритих гумою, протишумовою мастикою й іншими матеріалами.

При проектуванні ультразвукових установок доцільно використовувати робочі частоти, найбільш вилучені від чутного діапазону - не нижче 22 кГц [61].

Щоб виключити вплив ультразвуку при контакті з рідкими і твердими середовищами, необхідно встановлювати систему автоматичного відключення ультразвукових перетворювачів при операціях, під час яких можливий контакт (наприклад, завантаження і

вивантаження матеріалів). Для захисту рук від контактної дії ультразвуку рекомендується застосування спеціального робочого інструмента з віброізолюючою рукояткою.

Якщо по виробничих причинах неможливо знизити рівень інтенсивності шуму й ультразвуку до допустимих значень, потребується використання засобів індивідуального захисту - протишумів, гумових рукавичок з бавовняною прокладкою й ін.

При контакті з ультразвуком більш 50% робочого часу рекомендуються перерви тривалістю 15 хв. через кожні 1,5 години роботи. Значний ефект дає комплекс фізіотерапевтичних процедур - масаж, водянні процедури, вітамінізація й ін.

Розвиток техніки і транспортних засобів, удосконалювання технологічних процесів і устаткування супроводжуються збільшенням потужності і габаритів машин, що обумовлює тенденцію підвищення низькочастотних складових у спектрах, і появу інфразвуку, який є порівняно новим, не цілком вивченим фактором виробничого середовища.

Інфразвуком називають акустичні коливання з частотою нижче 20 Гц. Цей частотний діапазон лежить нижче порога чутності, де людське вухо, як і в випадку ультразвуку, не здатне сприймати коливання зазначених частот.

Джерелами інфразвуку є виробниче устаткування, в якому генеруються інфразвукові коливання для виконання технологічного процесу, а також обладнання, при використанні якого інфразвук виникає як супровідний фактор. Виробничий інфразвук виникає за рахунок тих же процесів, що і шум чутних частот. Найбільшу інтенсивність інфразвукових коливань створюють машини і механізми, що мають поверхні великих розмірів, які здійснюють низькочастотні механічні коливання (інфразвук механічного походження), чи турбулентні

потоки газів і рідин (інфразвук аеродинамічного чи гідродинамічного походження).

Максимальні рівні низькочастотних акустичних коливань від промислових і транспортних джерел досягають 100-110 дБ.

Дослідження біологічної дії інфразвуку на організм показали, що при рівні від 110 до 150 дБ і більш він може викликати в людей неприємні суб'єктивні відчуття і численні реактивні зміни, до числа яких слід віднести зміни в центральній нервовій, серцево-судинній і дихальній системах, вестибулярному аналізаторі. Є дані про те, що інфразвук викликає зниження слуху переважно на низьких і середніх частотах. Виразність цих змін залежить від рівня інтенсивності інфразвуку і тривалості дії фактора.

Особливості інфразвуку спричинені великою довжиною звукової хвилі. Інфразвук при однакових звукових потужностях відрізняється від акустичних та ультразвукових коливань значно більшими амплітудами коливальних зміщень.

Поглинання інфразвуквої енергії в атмосфері є дуже малим і становить від 10^{-5} до 10^{-8} дБ/км залежно від частоти коливань. Цим пояснюється поширення інфразвуку на великі відстані. Крім того, чим більше довжина хвилі, тим сильніше виявляється явище дифракції (обгинання перешкоди). Завдяки цьому інфразвуки легко проникають у приміщення та обминають перешкоди, що затримують чутні звуки.

Найбільші рівні інфразвукового тиску були зареєстровані на моторовипробувальних станціях (132 дБ), при роботі компресорів (90–115 дБ), вібростолів та віброплощадок (110–120 дБ), бетономішалок (95 дБ). Джерелом інфразвуку є легкові та вантажні автомобілі (110–115 дБ та 95–105 дБ, відповідно). При роботі

вентиляційних систем та систем кондиціонування рівні тиску на окремих інфразвукових частотах становили 80–90 дБ.

Інфразвукові коливання несприятливо впливають на функціональний стан організму людини. У виробничих умовах при дії інфразвуку працівники найчастіше скаржаться на відчуття втоми, головний біль, сонливість, запаморочення, розслабленість. При дії інтенсивного інфразвуку найбільш специфічними є скарги на тиск у вухах, відчуття вібрації грудної клітки, черевної стінки, шлунка. Тривалий вплив інфразвуку призводить до зниження слуху, особливо у низькочастотній зоні, підвищення артеріального тиску, появи гіпервентиляції легень, підвищення збудливості вестибулярного апарата. Установлено також, що інфразвук викликає порушення у психоемоційній сфері.

Найбільш ефективним і практично єдиним засобом боротьби з інфразвуком є зниження його в джерелі. При виборі конструкцій перевага повинна віддаватися малогабаритним машинам великої твердості, тому що в конструкціях із плоскими поверхнями великої площі і малої твердості створюються умови для генерації інфразвуку. Боротьбу з інфразвуком у джерелі виникнення необхідно вести в напрямку зміни режиму роботи технологічного устаткування - збільшення його швидкохідні (наприклад, збільшення числа робочих ходів ковальсько-пресових машин, таким чином, щоб основна частота проходження силових імпульсів лежала за межами інфразвукового діапазону). Повинні прийматися заходи для зниження інтенсивності аеродинамічних процесів - обмеження швидкостей руху транспорту, зниження швидкостей витікання рідин (авіаційні і ракетні двигуни, двигуни внутрішнього згоряння, системи скидання пари теплових електростанцій і т.д.).

У боротьбі з інфразвуком на шляхах поширення визначений ефект роблять глушители інтерференційного типу, звичайно при наявності дискретних складових у спектрі інфразвуку.

Виконане останнім часом теоретичне обґрунтування плинину нелінійних процесів у поглиначах резонансного типу відкриває реальні шляхи конструювання звуковбирних панелей, кожухів, ефективних в області низьких частот.

В якості індивідуальних засобів захисту рекомендується застосування навушників, вкладишів, що захищають вухо від несприятливої дії супутнього шуму.

До заходів профілактики організаційного плану варто віднести дотримання режиму праці і відпочинку, заборона понаднормових робіт.

Цікава гіпотеза щодо представлення атмосферних явищ (вітер та ін.) в якості наддовгих інфразвукових хвиль висунута в [62].

1.6. Шум як причина акустичної корозії

Ми в цій главі не станемо говорити про негативний вплив шуму на організм людей. Про це вже написано дуже багато. Ми, продовжуючи тематику [63], торкнемось зовсім іншої проблеми: ми досліджуємо негативний, руйнівний вплив міського шуму на неживі об'єкти [64].

Як аксіома сприймається хрестоматійне положення про те, що поглинута звукова енергія в товщі середовища перетворюється в теплову. Влучення звуку на поверхню матеріалу приводить до механічного переміщення конструктивних елементів споруди або пристрою на мікрорівні, що має вид складного коливального руху в товщі цього середовища. Мікро-"цеглинки", що складають на макрорівні наприклад, єдину й цільну бетонну плиту, під впливом проходження шуму в ній розгойдуються! На молекулярному рівні варто говорити про змушені

коливання структурних елементів будь-якої речовини під впливом зовнішнього шуму. Експериментальні зразки конструкцій, досліджувані в лабораторії, руйнуються при так званих статичних руйнівних напруженнях [65]. Однак повністю адекватні їм зразки таких же саме конструкцій у процесі експлуатації руйнуються при навантаженнях, більше низьких, ніж статичні руйнівні навантаження. Це обумовлено накладенням на статичне напруження додаткового знакозмінного напруження під впливом звукової хвилі, вібрацій, і ін. факторів. Це негативне явище одержало назву «втомлення матеріалу». В роботі [66] наводиться фото розламаної конструкції літака, і надається підпис про те, що таке руйнування сталося внаслідок акустичного випромінювання (шум від того ж двигуна); при тому підкреслюється, що причиною руйнування став саме шум, а не вібрація або якісь інші причини. В роботі [67] надається такий вислів: *«...Для "громких звуків" допустимая граница примерно 80 децибел. Звук в 130 децибел уже вызывает у человека болевое ощущение, а в 150 - становится для него непереносимым. Звук в 180 децибел вызывает усталость металла, а при 190 заклёпки вырываются из конструкций...»*.

Зрозуміло, що деформації конструкцій починаються вже при набагато нижчих значеннях, аніж наведено в цитаті з [67]. Навіть малі рівні звуку, що розповсюджуються через будь-який матеріал, викликають деформації на мікрорівні. Додаючись до інших чинників, вони є причиною дуже негативних явищ. Втім, аналіз літературних джерел, окрім наведених вище, показує, що цією проблемою на серйозному рівні ніхто не займався.

Руйнування конструкції внаслідок стомлення відбувається в три етапи. На першому етапі (зародження), з'являються мікротріщини. На другому етапі (зростання тріщин), тріщини ростуть зі збільшенням швидкості під

дією періодичних зовнішніх сил. На третьому етапі (руйнування), конструкція спонтанно руйнується, тому що поперечний перетин, що залишився, занадто малий для протидії зовнішнім силам. Початковий етап віднімає частину ресурсу конструкції, (від 50 до 75%). Однак більш точні дослідження на мікроскопічному рівні показали, що мікротріщини з'являються вже після вироблення 1% ресурсу.

Стонлення в матеріалах має фізичну основу, що досить добре вивчена (задля інших цілей; вплив шуму на матеріали ніким не досліджувався). Першопричини знаходяться на субмікроскопічному рівні структури матеріалу. На цьому рівні всі метали мають монокристалічну структуру, але з деякими недосконаlostями у виді вакансій і дислокацій. Стан навколо дислокації такий же, як на кінці незакінченого ряду зерен на кукурудзяному початку. У металах високої чистоти, лінії дислокацій можна побачити в електронний мікроскоп. В полі напружень, що викликано в кристалічних ґратах зовнішніми силами, дислокації можуть взаємодіяти і пересуватися. Кращим результуючим рухом є зрушення чи ковзання кристалічних шарів відносно один одного; найбільша чутливість до навантаження виявлена при 45° .

Рух дислокацій спрямований на відновлення геометрично правильних кристалічних ґрат. Під час цього процесу, лінії дислокацій обов'язково будуть рухатися до поверхні кристала, де їх можна побачити як мікроскопічні смужки, тобто смуги ковзання. Сусідні смуги ковзання утворюють хвилясту поверхню, на якій канавки діють як центри зародження мікротріщин, що розповсюджуються уздовж міжкристалічних границь. Ці тріщини будуть надчуттєві до компонентів напружень, спрямованих під кутом 90° до поверхні тріщини. Під дією циклічних

навантажень, вони будуть зростати стрибкоподібно. Вони звичайно йдуть з поверхні в глибину металу, і якщо до зразка прикладене слабе розтяжне зусилля, їх можна побачити як маленькі надриви.

Факт розкриття тріщин при низьких напруженнях указує на те, що для їхнього опису може бути використана лінійна залежність між деформаціями і напруженнями. Елементи тензора напружень є безупинні функції від часу і відстані. Але на мікроскопічному рівні, ця рівна і безупинна картина порушується мікротріщинами, вершини яких виявляються як невеликі місцеві сингулярності (особливі місця чи області) у безупинному полі напружень.

Зокрема, ми можемо розглянути невелику плоску тріщину, що йде з поверхні. Розподіл місцевих напружень можна описати в локальній системі координат, де осі x і z перпендикулярні лінії фронту тріщини, (рис. 1.5).

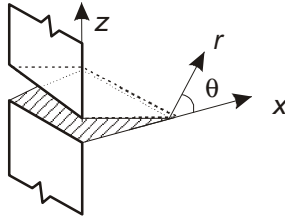


Рис. 1.5. Координати, що описують залежність між локальними деформаціями і напруженнями у фронті тріщини.

Виражаючи лінійне рівняння зв'язку деформацій і напружень у полярних координатах (r, θ) і допускаючи, що ці перемінні незалежні, компоненти локальних напружень можна записати як

$$\sigma_{i\varphi} = P(r) \Theta_{i\varphi}(\theta) \quad (1.1)$$

На поверхнях тріщини, положення яких визначається $\theta = \pm\pi$, як нормальні напруження, так і дотичні повинні дорівнювати нулю. Параметр, який описує напруження, повинний мати радіальну функцію виду

$$R(r) = r^{\frac{n}{2}} \quad (1.2)$$

де n - величина, рівна нулю чи цілому числу. У більшості випадків, n необхідно опустити, тому що виходить або нескінченне напруження на великих відстанях, або нескінченні деформації в області фронту тріщини. Реальним значенням буде $n=1$, що дає сингулярність у фронті тріщини порядку $-1/2$. Для цього значення компонента напружень можна записати у вигляді

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \Theta_{ij}(\theta) \quad (1.3)$$

Тут, $\sqrt{2\pi}$ - це нормований множник, уведений для зручності. Коефіцієнтом K , загальним для всіх компонентів напружень, позначають інтенсивність напружень. Він залежить від форми тріщини й орієнтації тензора номінальних напружень. Він також пропорційний переважній компоненті номінального напруження, що буде позначена через σ_{∞} .

У деяких особливих випадках, інтенсивність напружень K може бути виведена аналітично за допомогою інтегрування комплексної функції. Для довгої плоскої тріщини в металевій пластині довжиною $2x$, перпендикулярної подовжнім напруженням, компоненти місцевих напружень (1.3) будуть дорівнювати

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{x}{2r}} \sigma_{\infty} \Theta_{ij}(\theta),$$

щоб дотримувалась умова

$$K = \sqrt{\pi x} \sigma_{\infty} \quad (1.4)$$

Отже, навіть якщо номінальні напруження малі, компоненти місцевих напружень ij у фронті тріщини при $r=0$ можуть бути надзвичайно високими, та можуть бути навіть вище, ніж міцність матеріалу на розрив.

Ця неоднорідність у поле напружень може привести до руйнування матеріалу в дуже малій області біля вершини тріщини - і, таким чином, збільшити цю тріщину. Однак, якщо напруження малі, така неоднорідність буде зведена на нуль, коли фронт тріщини проходить відстань, яка порівняна з розміром зерна. З іншого боку, якщо напруження великі, неоднорідність у поле напружень не урівноважена, і тріщина розвивається до початку лавинообразного руйнування, що протікає приблизно зі швидкістю звуку.

Основним припущенням, при використанні механіки руйнування для пояснення стомлення, є те, що ріст тріщин, зв'язаний зі змінами інтенсивності напружень K . Цикл напружень визначає максимум K_{\max} і мінімум інтенсивності напружень K_{\min} , при цьому розмах інтенсивності напружень:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (1.5)$$

Приблизно, цей цикл збільшить тріщину глибиною x на величину Δx :

$$\Delta x = \begin{cases} C(\Delta K)^m & \Delta K > \Delta K_0 \\ 0 & \Delta K < \Delta K_0 \end{cases} \quad (1.6)$$

Це вираження відоме як закон росту тріщин Паріса-Ердогана. C , m і K_0 - це емпіричні постійні, отримані в результаті лабораторних досліджень. Довжина тріщини a служить для опису напівеліптичної тріщини, де a і b позначають довгу і коротку півосі: a - описує глибину тріщини, а $2b$ - це розкриття тріщини. Інтенсивність напружень прямо не враховується. Тому, лабораторні виміри бажано проводити на зразках, що мають тріщину такого типу, для якої відомі співвідношення між номінальними напруженням й їх інтенсивністю. Ріст тріщини можна виміряти, усереднюючи по необхідному

числу циклів.

Оскільки крива зростання тріщини зв'язана лише з матеріалом, а не з конкретними геометричними особливостями, то зразок може бути маленьким, а частота навантаження - в звуковому діапазоні частот. Проводячи вимір на одному зразку, за короткий час можна одержати кілька точок на da/d кривій. Діаграма Велера зв'язана як з матеріалом, так і з формою, і для того, щоб одержати усього лише одну крапку на цій кривій, необхідно випробувати один зразок до руйнування. До того ж, великі зразки повинні бути випробувані при низькій частоті, тому одне дослідження може тривати багато часу.

Як і в (1.4), існує лінійне співвідношення між розмахом інтенсивності напружень K і розмахом переважних напружень. Виключивши можливий коефіцієнт концентрації напружень, - (він може дорівнювати розмаху номінальних напружень, тобто подвійній амплітуді, що позначена через S), для того, щоб врахувати можливий вплив форми зразків, (1.4) можна записати в більш загальному вигляді:

$$K = \sqrt{\pi x} \quad g'(x)S = g(x)S, \quad g(x) = g'(x)\sqrt{\pi x} \quad (1.7)$$

У (1.7), $g'(x)$ - локальна геометрична функція, яку можна обчислити аналітично чисельно чи за допомогою лінійного аналізу напружень. Довідник таких функцій є в декількох роботах по механіці руйнування, наприклад у [68]. Член входить до складу геометричної функції для вираження цієї функції без штриха $g(x)$. Підстановка (1.7) у (1.6) дає збільшення розміру тріщини:

$$\Delta x = \begin{cases} Cg(x)^m S^m & S > S_0(x) = \frac{\Delta K_0}{g(x)} \\ 0 & S < S_0(x) \end{cases} \quad (1.8)$$

Процес стомлення може бути описаний як

стрибокподібне поширення тріщини в матеріалі: $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots \Delta x_i \dots$. Початкова глибина тріщини x_0 буде зв'язана з мікротріщинами, а кінцева довжина x_f буде досягнута при руйнуванні матеріалу. Формально, глибина тріщини може визначати коефіцієнт використання η , що зростає стрибками:

$$\eta = \frac{x - x_0}{x_f - x_0} \text{ and } \Delta\eta = \frac{\Delta x}{x_f - x_0} \quad (1.9)$$

Докладно ця проблема описана в авторських роботах [64, 65, 69].

Резюмуючи все вищенаведене, приходимо до наступної схеми (рис. 1.6)

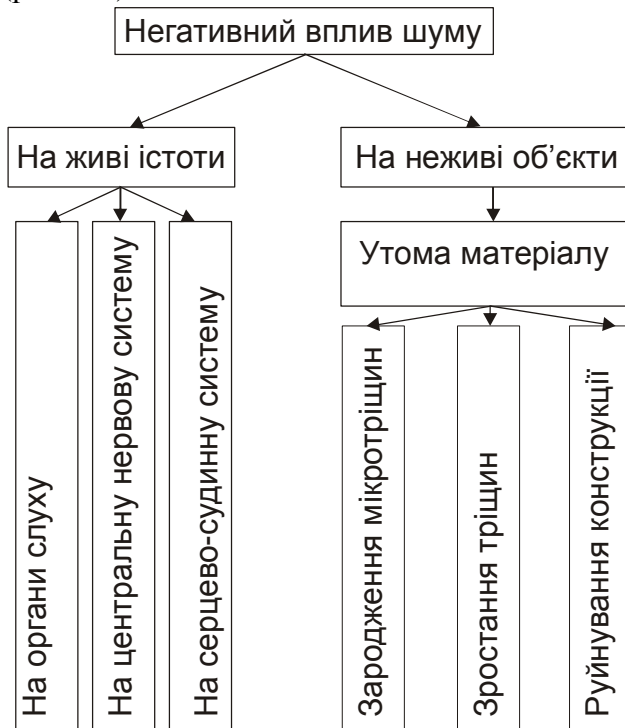


Рис. 1.6. Негативний вплив шуму на неживі та живі об'єкти.

1.7. Необхідність заходів боротьби із шумом (на прикладі галузі будівництва)

На [70] можна знайти такий вислів: «...*Департаментом труда США было подсчитано, что 19,3% рабочих занятых на производстве и в коммунальной сфере в среднем ежедневно подвергаются воздействию шума в 90 дБА и выше, 34% - свыше 85 дБА и 54,1% - свыше 80 дБА. Эти оценки довольно типичны в отношении процента рабочих, подвергающихся воздействию шумов критического уровня и в других странах...*»

Вважаємо, що в Україні стан із шумом не кращий, а гірший. (Тематиці шуму відведено немало місця і в інших енциклопедіях та довідниках: [71 - 74]).

Для детального обґрунтування необхідності шумозахисних заходів розглянемо, наприклад, лише одну складову - шум, що виникає в процесі будівництва.

В умовах міської «тісноти» об'єкти будівництва, ремонту й реконструкції є значними джерелами міського шуму. Вониносять значний соціально-економічний збиток на розташованих поблизу територіях й вимагають до себе особливої уваги у галузі шумозахисту. Дослідженням зашумованих об'єктів, а також розробкою методів і засобів зниження їхньої акустичної активності, зайнято сьогодні багато фахівців в Україні й за рубежом. В останні 10 років, у зв'язку з постійно зростаючими обсягами робіт по будівництву, реконструкції, розбиранню й ремонту будинків і споруд проблема боротьби із шумом на близько розташованих до ДШ виробничих і житлових територіях від будівельних машин й устаткування стає все гостріше. Високі темпи механізації й індустріалізації будівельних робіт, інших технологічних процесів, збільшення швидкості, енергоємності, продуктивності, і потужності застосовуваного устаткування незмінно супроводжуються збільшенням шуму і вібрації.

Таблиця 1.2

**Шумові характеристики устаткування машин і механізмів, використовуваних у будівництві
(за авторськими даними [40, 42])**

Тип машин	$L_{\text{АЭКВ}},$ $\text{дБА}_{\text{ЭКВ}}$	$R_0, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$I, \text{ Вт/м}^2$	$W, \text{ Вт}$
Свердлильна машина, безударної дії	84	1,0	2,57	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Свердлильна машина ударно-обертової дії	87	1,0	12,57	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
Шліфувальна машина, що робить борозни	85	1,0	12,57	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Трамбування	93	1,0	12,57	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Пила, рубанок, лобзик	85	1,0	12,57	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Ножиці, кромкоріз, шабер	82	1,0	12,57	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ударний гайковерт, шурупверт, шпильковерт	90	1,0	12,57	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Будівельний молоток	90	1,0	12,57	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Будівельний перфоратор	101	1,0	12,57	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Машина для занурення паль	>115	5	157	$>3,16 \cdot 10^{-1}$	$\sim 49,6$
Будівельно-монтажний пістолет	>115	5	157	$>3,16 \cdot 10^{-1}$	$\sim 49,6$
Пневматичні молотки	~ 110	3	56,5	$\sim 10^{-1}$	$\sim 5,65$
Бетонозмішувач гравітаційної дії	-100	5	157	$\sim 10^{-2}$	-1,57
Пересувний компресор	-100	5	157	$\sim 10^{-2}$	$\sim 1,57$
Бульдозер	~ 100	5	157	$\sim 10^{-2}$	$\sim 1,57$
Трамбувальна машина, віброплита, трамбування для	~ 100	5	157	$\sim 10^{-2}$	$\sim 1,57$

Тип машин	$L_{\text{АЭКВ}},$ дБА _{ЭКВ}	$R_0, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$I, \text{ Вт/м}^2$	$W, \text{ Вт}$
мощення доріг					
Машина для нарізки швів у бетоні	~100	5	157	$\sim 10^{-2}$	~1,57
Засоби малої механізації для обробки дерева, каменю, бетону	~100	3	56,5	$\sim 10^{-2}$	~0,565
Трактор	~100	5	157	$\sim 10^{-2}$	~1,57
Зварювальний агрегат з довгим приводом	~100	3	56,5	$\sim 10^{-2}$	~0,565
Агрегат пального електроживлення	~100	3	56,5	$\sim 10^{-2}$	~0,565
Самоскид	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Вантажний автомобіль, автокран	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Асфальто-укладальник	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Самохідний коток	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Самохідний грейдер	~90	3	56,5	$\sim 10^{-3}$	~0,056
Навантажувач	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Екскаватор	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Бетононасос	~90	3	56,5	$\sim 10^{-3}$	~0,056
Вібраційний брус та брус, що загладжує	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157
Бетонозмішувач примусової дії	~90	5	157	$\sim 10^{-3}$	~0,157

Наприклад, в [75] наводяться дані експериментальних досліджень (вимірювань) рівнів шуму на підприємствах будівельної індустрії. На правах авторської цитати (Глава 9 [75] написана В.Е. Абракітовим в співавторстві із проф. Сафоновим В.В.) наведемо їх ще один раз.

Таблиця 1.3.

Рівні звукового тиску устаткування, що використовується при виготовленні металоконструкцій

Місце вимірювання шуму	Рівень звукового тиску, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Свердлувальна машина	93	95	100	94	91	90	90	92	94
Шліфувальна машина	90	94	100	94	91	89	92	94	95
Ножиці, кромкоріз	90	93	100	94	92	95	93	93	93
Ударний гайковерт	92	95	99	94	98	100	99	95	92
Вібро-молот	95	102	97	101	99	102	101	98	92
Клепальний і зачищувальний молотки	87	99	103	109	108	103	106	107	106
В кабіні автогрейдера	98	95	91	87	78	76	76	75	73
В кабіні екскаватора	105	110	97	90	87	85	81	74	71
Місце оператора віброкатка	101	98	95	87	86	90	85	80	73
Пересувна компресорна станція	104	95	92	93	94	97	95	92	91

Надалі цієї роботи (гл. 2, рис. 2.15) надаються нормативні рівні шуму. Зіставивши між собою ці обидві таблиці, можна спостерігати значне перебільшення

фактичних, тобто, вимірюваних рівнів над нормативними. Таким чином, є простір задля діяльності; і існує дуже велика потреба в розробці різного роду заходів щодо зниження шуму.

1.8. Індивідуальний ризик негативного впливу шуму. Соціально-економічні аспекти шумозахисних заходів

Розвиток людства супроводжується поступовим відривом його від природного середовища й все більшим переходом у техногенне середовище [76]. Це не є єдиним принципово можливим шляхом розвитку цивілізації: (згадаємо, наприклад, стародавню Грецію, де були здобуті значні культурні, інтелектуальні досягнення, але розвиток суспільства йшов явно не техногенним шляхом? Академік Вернадський, умовно поділяючи навколишнє середовище та середовище мешкання людей на ноосферу (сферу розуму), гомосферу (сферу людства) та техносферу (сферу прикладення технічних добутоків людства), не ототожнював ці поняття між собою), Але, починаючи з (XIX сторіччя, розвиток промисловості прогресує; наука становиться інтелектуальним забезпеченням виробничої діяльності людини; гомосфера в більшому збігається з техносферою; а разом з тим, зростають несприятливі наслідки у вигляді негативного впливу антропогенних (точніше, техногенних) чинників, (до числа яких відноситься також шум), як на навколишнє середовище, так і на самих людей.

Все це призводить до протиріччя між людиною й природою, з одного боку, і техногенним середовищем і людиною - з іншого. Виходом із цього положення є рішення завдання адаптації техногенного середовища до природного шляхом мінімізації величини додаткових факторів, що впливають на навколишнє середовище, що вносяться за рахунок діяльності людини [77]. Для сучасного етапу розвитку суспільства характерна

необхідність економічної оцінки ефективності проведених захисних заходів [78].

Техногенні джерела впливають на людину, живу природу й продуктивні сили суспільства. Витрати на компенсацію їхнього впливу характеризують економічний збиток для суспільства. Економічний аналіз дає можливість зіставити між собою витрати на захисні заходи й відповідні вигоди, оцінювані по відверненому й ліквідованому збитках. Первинний ефект проявляється в зниженні впливу антропогенних факторів на навколишнє середовище, а кінцевий соціально-економічний ефект дає оцінку захисних заходів. Соціальний ефект проявляється в зниженні захворюваності населення, поліпшенні умов праці й відпочинку. При цьому виникає необхідність перекладу будь-яких змін навколишнього середовища у вартісну оцінку ефективності або збитку, що адекватно відбиває відповідні зміни в економічній системі. Витрати на компенсацію наслідків впливу антропогенних факторів відповідають величині економічного збитку.



Рис. 1.7. Різновиди економічного збитку від негативної дії техногенних джерел (у т.ч. ДШ).

Економічний аналіз дозволяє зіставляти між собою витрати на захисні заходи й відповідні вигоди, оцінювані по відверненому й ліквідованому збитком. При цьому всі види збитку від впливу антропогенних факторів доцільно виразити в грошовій формі, що дозволяє дати кількісні подання його в натуральних показниках витрат.

Економічний збиток формується під впливом трьох груп факторів, що надані на рис. 1.8:



Рис. 1.8. Фактори, що впливають на формування економічного збитку.

Дані фактори виступають у нерозривному зв'язку й створюють інформаційну базу для розробки емпіричної методики визначення збитку. При цьому економічний результат не можна відокремлювати від соціального й переваги від реалізації захисних заходів щодо зменшення впливу техногенних факторів на навколишнє середовище повинні носити економіко-соціальний характер. В якості загальноприйнятого соціального показника оцінки різних видів небезпек для людини прийнята імовірність ризику. Рівні ризику для людини в звичайних умовах, у яких звичайно, змінюються в інтервалі від 10^{-6} до 10^{-2} .

Оскільки абсолютна величина ризику принциповим чином не може бути зменшена до 0, тобто будь-яка діяльність людини неминуче пов'язана з небезпекою (аксіома о потенційній небезпеці діяльності), існує (та на цей час є базовою) концепція прийнятного ризику, згідно з якою, за допомогою різного роду заходів (при рівні

прийнятних витрат), ризик зменшується до якихось прийнятних величин.

Джерела ризику за своїм походженням є природними, штучними й антропогенними, які пов'язані з видами діяльності людини, спрямованими на задоволення матеріальних, духовних потреб і забезпечення життєвих функцій. Рівні ризику в окремих сферах діяльності людини носять відносно сталий характер. Прийнятність ризику, пов'язаного з різними видами діяльності людини, визначається економічними, соціальними й психологічними факторами (рис. 1.9).

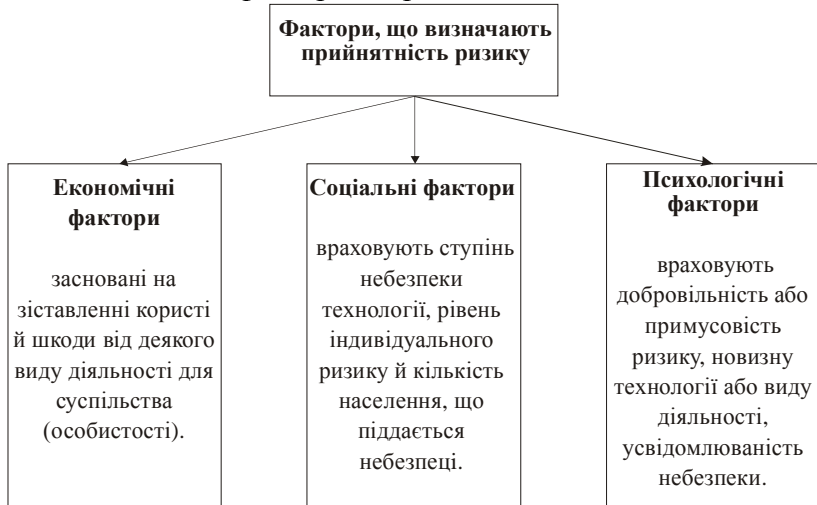


Рис. 1.9. Фактори, що визначають прийнятність ризику техногенних небезпек.

Чим більше людей піддається небезпеці, тим більше суспільство піклується про забезпечення безпеки й вживає заходів до зниження індивідуального ризику.

Рівні ризику, які встановлюються протягом більшої кількості років, являють собою емпірично прийнятний баланс між користю і соціальними витратами для суспільства.

Економічний показник для кожного виду антропогенного впливу на навколишнє середовище розраховується з урахуванням особливості його характеристик і впливу. До числа таких антропогенних впливів віднесено також і негативний вплив шуму.

* * *

В роботі [79. - С. 40.] наведені дані про імовірність поразки слуху людей при дії виробничого шуму.

Таблиця 1.4

Імовірність поразки слуху людей при перевищенні рівнів шуму

Еквівалентний рівень звуку $L_{\text{Аeq}}$, дБА	5	10	15	20	25
85	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07
90	0,04	0,1	0,14	0,16	0,16
95	0,07	0,17	0,24	0,28	0,29
100	0,12	0,29	0,37	0,42	0,43
105	0,18	0,48	0,53	0,58	0,6
110	0,26	0,55	0,71	0,78	0,78
115	0,36	0,71	0,83	0,87	0,84

Оскільки (згідно за існуючими критеріями) соціальна шкода від виробничого шуму визначається кількістю робітників, що одержали пошкодження слуху, а соціальна ефективність заходів по зниженню шуму - їхнім оздоровчим ефектом, тобто зменшенням захворюваності, в цій же роботі надається формула для розрахунку соціальної ефективності заходів із зменшення шуму, %:

$$C = \left(1 - \frac{P_2 D_2}{P_1 D_1}\right) * 100,$$

де D_1 та D_2 - чисельність робітників; P_1 та P_2 - імовірність поразки слуху (згідно за вищенаведеною таблицею) відповідно до й після зміни інтенсивності й

тривалості дії шуму.

Позитивному соціальному ефекту відповідають значення $C > 0$. Як відзначають автори [79], соціальний ефект може бути досягнутий не тільки за рахунок зменшення рівнів шуму в майбутньому (тобто - зменшення імовірності P_2) відносно первісного рівня шуму (що характеризується імовірністю P_1), тобто зменшення відношення P_2/P_1 ; але й за рахунок зменшення чисельності робітників, на яких впливає шум D_2 , тобто зменшення відношення D_2/D_1 . Можливий такий випадок, коли внаслідок застосування нової техніки або нових конструктивних рішень рівень шуму навіть збільшується, але чисельність робітників, на яких впливають перевищені рівні шуму, навпаки, істотно зменшилася (роботизація виробництва, застосування дистанційного управління технологічними процесами тощо) таким чином, що загальна кількість робітників із порушеним слухом суттєво знизилася. Згідно [79], економічна шкода від впливу виробничого шуму може бути охарактеризована збільшенням витрат праці на виробництво одиниці продукції, що обумовлені зростанням кількості днів тимчасової непрацездатності, частковою втратою загальної працездатності, та ін (Рис. 1.10).

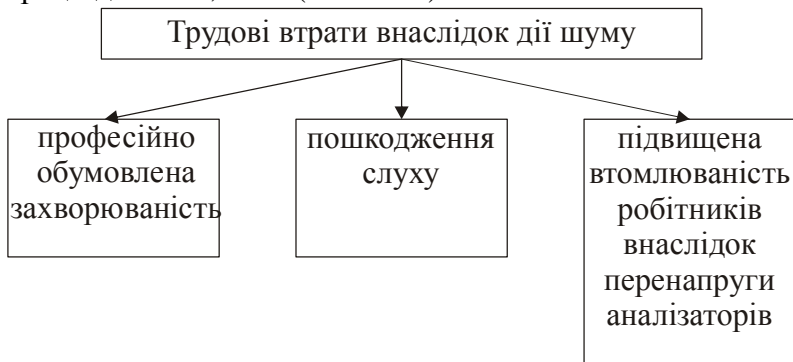


Рис. 1.10. Різновиди трудових втрат під негативним впливом шуму.

[79] наводить розрахункові формули задля визначення повної трудової втрати ΔP внаслідок професійно обумовленої захворюваності (ΔP_1); пошкодження слуху і підвищеної втомлюваності робітників (ΔP_2) в %:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2.$$

Нами створена комп'ютерна програма, яка дозволяє виконати такий розрахунок автоматично. Оскільки наші власні дослідження велися в декілька іншій галузі боротьби із шумом: (а саме - фізичне, аналогове, математичне моделювання акустичних процесів; підвищення ефективності шумозахисних засобів на підставі даних такого моделювання), - проблема врахування розрахунків повної трудової втрати внаслідок перевищення нормативних рівнів, визначення економічної шкоди від впливу виробничого шуму, і т.п. вирішена нами за рахунок застосування в створеній нами програмі відомих математичних залежностей, що наведені на с. 40-41 [79]. Авторство над ними належить таким корифеям акустики, як Г.Л. Осіпов та Є.Я. Юдін; будь-які питання правомочності таких розрахункових формул, їхньої достовірності та ін. ми не приймаємо, переадресовуючи їх колективу авторів довідника [79]. Наша справа - лише перекласти ці формули на машинну мову комп'ютерної програми. Надалі ми надаємо цитовані з [79] формули, та ілюстрації знімків з екрану, що показують, як те або інше місце реалізовано в нашій програмі.

Повна трудова втрата внаслідок професійно обумовленої захворюваності:

$$\Delta P_1 = 0,16(L_{\text{Aeq}} - 85), \%$$

Така формула, наведена в [79] (за номером 2.2 в його власній системі нумерації формул), викликає значну кількість нарікань, бо як L_{Aeq} ; так і 85, як відомо,

вимірюється в дБА?! (Чисельне значення 85 в даній формулі означає граничну кількість децибелів, при перевищенні якої спостерігається підвищена захворюваність робітників внаслідок виробничого шуму; при менших рівнях, за даними того ж [79], вона не зустрічається). Що означає чисельний коефіцієнт 0,16 в тій же формулі, пояснити ми не в змозі, оскільки це не розуміємо; а автори [79] залишили таке, безумовно, цікаве питання без жодних пояснень або якихось коментарів. Зрозуміло тільки одне - 0,16, згідно за нерозшифрованою інформацією [79], це - якийсь переводний коефіцієнт, за допомогою якого рівні, (що виражаються в дБА) перекладаються в %. Як це можливо; яка правомірність такої операції - давайте залишимо на совісті авторів [79]??!

Ми лише застосуємо надані в [79] залежності в нашій програмі для розрахунку економічних втрат від дії шуму, не проводячи ніяких досліджень в даному питанні. В нашій математичній моделі це буде мати такий вигляд:

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
57	Розрахунок ΔП1 для різних значень LAeq								
58									
59							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
60	При рівні LAeq =		85	дБА			ΔП1 = 0 %		
61									
62									
63							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
64	При рівні LAeq =		90	дБА			ΔП1 = 0,8 %		
65									
66									
67							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
68	При рівні LAeq =		95	дБА			ΔП1 = 1,6 %		
69									
70									
71							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
72	При рівні LAeq =		100	дБА			ΔП1 = 2,4 %		
73									
74									
75							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
76	При рівні LAeq =		105	дБА			ΔП1 = 3,2 %		
77									
78									
79							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
80	При рівні LAeq =		110	дБА			ΔП1 = 4 %		
81									
82									
83							ΔП1 = 0,16*(LAeq - 85), %.		
84	При рівні LAeq =		115	дБА			ΔП1 = 4,8 %		
85									
86									

Рис. 1.11. Етап вирахувань: розрахунок ΔP_1 для різних значень L_{Aeq} в нашій програмі.

Повна трудова втрата внаслідок пошкодження слуху і підвищеної втомлюваності робітників, згідно тому ж джерелу інформації:

$$\Delta P_2 = 2 \left(\Delta T_1 + \Delta T_2 \frac{t_0 - t}{t} \right).$$

Аргумент $\frac{t_0 - t}{t}$ в нашій програмі обчислюваний таким

чином:

	A	B	C			
55	(t0-t)/t					
56	t0/t	5	10	15	20	25
57	0,5	-0,90	-0,95	-0,97	-0,98	-0,98
58	1	-0,80	-0,90	-0,93	-0,95	-0,96
59	2	-0,60	-0,80	-0,87	-0,90	-0,92
60	3	-0,40	-0,70	-0,80	-0,85	-0,88
61	4	-0,20	-0,60	-0,73	-0,80	-0,84
62	5	0,00	-0,50	-0,67	-0,75	-0,80
63	6	0,20	-0,40	-0,60	-0,70	-0,76
64	7	0,40	-0,30	-0,53	-0,65	-0,72
65	8	0,60	-0,20	-0,47	-0,60	-0,68
66	9	0,80	-0,10	-0,40	-0,55	-0,64
67	10	1,00	0,00	-0,33	-0,50	-0,60
68	11	1,20	0,10	-0,27	-0,45	-0,56
69	12	1,40	0,20	-0,20	-0,40	-0,52
70	13	1,60	0,30	-0,13	-0,35	-0,48
71	14	1,80	0,40	-0,07	-0,30	-0,44
72	15	2,00	0,50	0,00	-0,25	-0,40
73	16	2,20	0,60	0,07	-0,20	-0,36
74	17	2,40	0,70	0,13	-0,15	-0,32
75	18	2,60	0,80	0,20	-0,10	-0,28
76	19	2,80	0,90	0,27	-0,05	-0,24
77	20	3,00	1,00	0,33	0,00	-0,20
78	21	3,20	1,10	0,40	0,05	-0,16
79	22	3,40	1,20	0,47	0,10	-0,12
80	23	3,60	1,30	0,53	0,15	-0,08
81	24	3,80	1,40	0,60	0,20	-0,04
82	25	4,00	1,50	0,67	0,25	0,00

Рис. 1.12. Вирахування t_0 . Слід звернути увагу на деталізацію t_0 (кроки періодичністю 1 рік), що дозволяє провести розрахунки із завданням будь-якого потрібного проміжку часу.

Вище: ΔT_1 - середній ступінь витрати загальної працездатності внаслідок пошкодження слуху та підвищеної втомлюваності здорових робітників, що віднесений до усіх робітників через t років роботи в умовах шуму:

$$\Delta T_1 = 7,5 \cdot 3^{\frac{1}{\alpha\beta-1}};$$

ΔT_2 - середній ступінь витрати загальної працездатності у всіх робітників внаслідок пошкодження слуху у частки з них:

$$\Delta T_2 = 7,5 \cdot 3^{\frac{1}{\alpha\beta-1}} \left\{ 1 - [1 - P(t)]^\beta \right\};$$

$$\alpha = \lg[1 - P(10)] \lg^{-1}[1 - P(t)];$$

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F
14	$\beta = 1 + 0,477 \lg[1 - P(10)]$					
15	L_{Aeq} , дБА	β при $P(10)$				
16	85	0,994				
17	90	0,978				
18	95	0,961				
19	100	0,929				
20	105	0,865				
21	110	0,835				
22	115	0,744				
23						
24	$\alpha = \lg[1 - P(10)] \lg[1 - P(t)]$					
25						
26	L_{Aeq} , дБ	$t=5$	$t=10$	$t=15$	$t=20$	$t=25$
27	85	3,031	1	0,59	0,49	0,42
28	90	2,581	1	0,7	0,6	0,6
29	95	2,568	1	0,68	0,57	0,54
30	100	2,679	1	0,74	0,63	0,61
31	105	3,295	1	0,87	0,75	0,71
32	110	2,652	1	0,65	0,53	0,53
33	115	2,774	1	0,7	0,61	0,68
34						

Рис. 1.13. Вирахування аргументів α та β в нашій програмі.

$$\beta = 1 + 0,477 \lg[1 - P(10)],$$

де $P(t)$ та $P(10)$, відповідно, ймовірності пошкодження слуху при заданому еквівалентному рівні звуку відповідно через t та через 10 років праці.

ΔP_2 враховує втрати, що пов'язані із пониженням працездатності у робітників із пошкодженим слухом в разі їхнього переходу на роботу із рівнем звуку, що < 85 дБА та має значення при $t_0 > t$.

Якщо вираховані повні витрати ΔP , може бути

знайдена річна економічна шкода від дії виробничого шуму:

$$Y = \frac{1,5 \cdot \bar{Z} \cdot D}{100} \Delta \Pi,$$

де \bar{Z} - середньорічна заробітна платня робітника, грн./рік; D - кількість робітників, що випробувала дію шуму.

Можливо також визначити річний економічний ефект, усереднюваний за нормативний строк окупаємості капітальних вкладень,

$$E = \frac{1,5 \cdot \bar{Z} \cdot D}{100} (\Delta \bar{\Pi}_1 - \Delta \bar{\Pi}_2) - \left(\frac{K}{N} + C_e \right), \text{ грн./рік},$$

де $\Delta \bar{\Pi}_1$ та $\Delta \bar{\Pi}_2$ - щорічні повні трудові втрати, %, що усереднювані за нормативний строк окупаємості, при роботі в умовах шуму із еквівалентними рівнями звуку на робочих місцях L_{A1eq} та L_{A2eq} відповідно до та після застосування засобів шумозахисту; \bar{Z} - середня річна заробітна платня за нормативний строк окупаємості я, грн.; K - капітальні вкладення в засоби шумозахисту, грн.; N - нормативний строк окупаємості капітальних вкладень, років; C_e - середньорічні експлуатаційні витрати на засоби шумозахисту, грн.

Створена нами програма дозволяє виконувати розрахунки за формулами із довідника [79] автоматично.

Питання розрахунку економічної доцільності саме новітніх технологій та винаходів серед інших рішень розглянуті в [80].

ЧАСТИНА 2. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЗВУК, ПРИТАМАННІ ЙОМУ ХВИЛЬОВІ ЯВИЩА ТА ВЛАСТИВОСТІ

2.1. Звукові хвилі як один з видів хвиль

Хвилі – це збурювання, які поширюються з кінцевою швидкістю в просторі, і несуть енергію без переносу речовини [81 - 82].

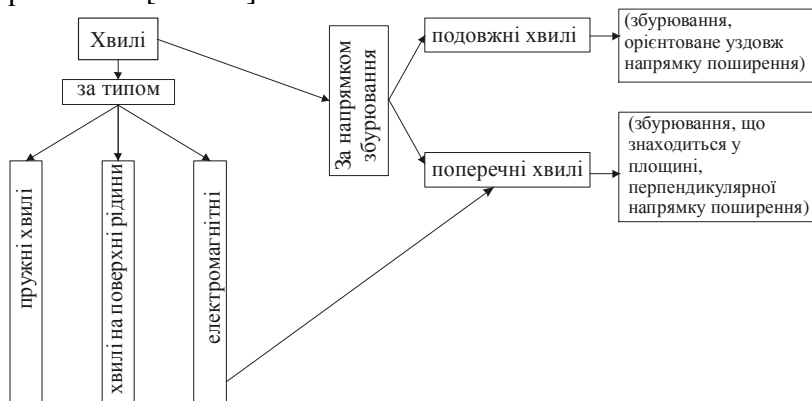


Рис. 2.1. Класифікація видів хвиль за типом та напрямком збурювання.

Звукові хвилі є частковим випадком хвильового руху, та відносяться до так званих пружних хвиль. В рідинах та газах розповсюджуються тільки подовжні звукові хвилі, в твердому середовищі – як подовжні, так і поперечні [83 - 84] (докладніше – див. далі).

Звукові хвилі, як згадувалося вище, здатні розповсюджуватися тільки в середовищі, що має пружні властивості. Єдиним прикладом середовища, що не є пружним, є вакуум: (тобто звукові хвилі в вакуумі не розповсюджуються [85]).

Уявимо собі розташування часток пружного середовища в незбуреному просторі. Ця умовна картина надана на рис. 2.1.а. На рис 2.1.б. надана умовна картина розташування

тих же самих часток у середовищі, що збурене звуковою хвилею, яка проходить через те середовище. Через те, що кожна частка під впливом зовнішнього збурення (яке передається через сусідні, суміжні частки) випробує коливальний рух, утворюються стиснуті та розріджені області розподілу часток у просторі.

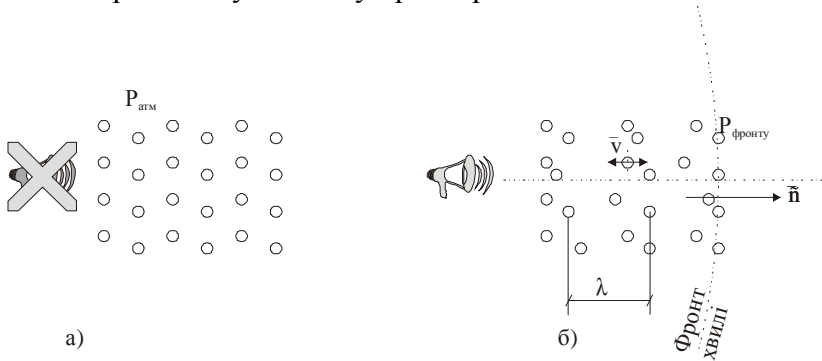


Рис. 2.2. Умовне зображення розташування пружних часток у незбуреному (а) та збуреному (б) середовищі.

2.2. Характеристики звуку

Поширення хвилі визначається декількома групами характеристик, представленими на рис. 2.3.:

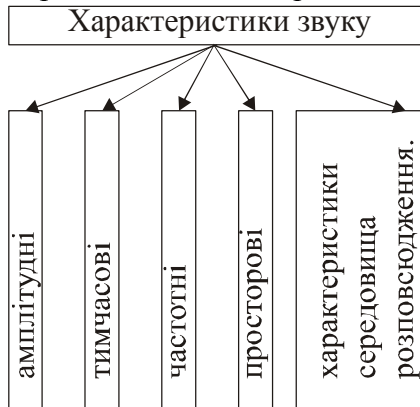


Рис. 2.4. Все різноманіття хвильових характеристик, що описують розповсюдження звукової хвилі, може бути зведено до п'яти груп.

Амплітудні характеристики звуку визначають величину коливання; а, у найбільш загальному змісті, – величину енергії, що переноситься хвилею.

Отже, звукові хвилі не викликають істотних переміщень середовища, за винятком його коливальних рухів. Перенос матеріалу середовища не відбувається. Переміщується в просторі й часі тільки саме по собі збурення; слід говорити про "фронт хвилі", (що геометрично з'єднує всі точки збуреного середовища, що знаходяться в однакових фазах). Отой хвильовий фронт переміщується від джерела звуку в усіляких напрямках, а вимір швидкості його поширення дозволяє говорити про швидкість розповсюдження звуку.

Найважливішим моментом при розгляді такої умовної моделі є той безперечний факт, що кожна частинка пружного середовища змінює свою позицію в просторі лише в незначних межах. Вона первісно подається вперед, потім - назад; потім - знову вперед, потім - знову назад і т.п.; істотного переносу самого середовища за рахунок переміщення часток не відбувається. Цей розмах коливань відносно якогось вихідного, первісного положення, зветься амплітудою, і вимірюється в одиницях довжини. При розповсюдженні звуку в звичайних умовах слід говорити про амплітуди, що не перевищують міліметрів.

Напрямок тих коливань також відіграє дуже важливу роль. Якщо напрямок коливань часток збігається з напрямком розповсюдження звукової хвилі, говорять про подовжні хвилі; а якщо він перпендикулярний - поперечні хвилі. З-за особливостей побудови внутрішньої структури в рідинах і газах коливання в напрямку, перпендикулярному напрямку розповсюдження хвилі, не відбуваються, тобто в рідинах та газах розповсюджуються тільки подовжні хвилі. В твердому середовищі коливання можуть бути орієнтованими за різними напрямками, тобто,

в них існують як подовжні, так і поперечні хвилі.

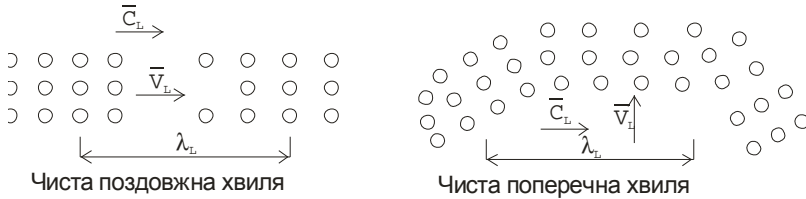


Рис. 2.5. Вектори коливальної швидкості \vec{v}_L , \vec{v}_\perp і швидкості поширення \vec{c}_L , \vec{c}_c в різних типах хвиль. λ_L - довжина хвилі, м: (тобто відстань між двома точками, що коливаються у однаковій фазі).

Вектор коливальної швидкості \vec{v}_L в поздовжній хвилі спрямований з вектором швидкості її поширення \vec{c}_L (тобто з напрямком її поширення), у поперечній хвилі еквівалентний вектор \vec{v}_\perp , називаний вектором зсуву, перпендикулярний до вектора швидкості її поширення \vec{c}_c , причому $\vec{c}_L \neq \vec{c}_c$. Коливальна швидкість хвилі v , як відомо, її основний енергетичний параметр, що визначає амплітуду зсуву часток Y , м залежно від частоти f , Гц.

$$v = 2\pi Y f, \text{ м/с.}$$

При цьому в реальних подовжньо-поперечних хвилях, для яких у фізиці прийняті спеціальні назви: вигинова хвиля, крутильна хвиля й ін., амплітуда поздовжньої Y_L і поперечної Y_c складових, природно, не рівні між собою, і тип, (вірніше, конкретна назва: вигинова, крутильна й т.д.) хвилі визначається вищеприписаною енергетикою хвильового руху аж до чистих поздовжніх хвиль у рідинах і газах (де $Y_c = 0$).

Якщо наше умовне середовище - газ (повітря), можливо виміряти його тиск в обох випадках. У випадку незбуреного середовища це буде звичайний атмосферний тиск $P_{\text{атм}}$, Па. У випадку середовища, збуреного

проходженням звукової хвилі, вимірний тиск відрізняється від атмосферного (назвемо його $P_{\text{фронт}} \text{, Па}$ - тиск у фронті звукової хвилі). $P_{\text{фронт}}$ може бути як менше, так і більше атмосферного; в залежності від того, область розрідження чи стиснення проходить через точку виміру; а взагалі в часі вони змінюють одна одну за законом гармонійних коливань. Різниця тисків в збуреному та незбуреному середовищі зветься звуковим тиском $P \text{, Па}$:

$$|P| = P_{\text{фронт}} - P_{\text{атм}} \text{, Па.} \quad (2.1)$$

Людина відчуває в якості характеристики звуку саме цю різницю тисків, тобто звуковий тиск; атмосферний тиск, над яким при звуковому збуренні стаються перебільшення / переменшення тиску, ми не відчуваємо. Кажучи більш точно, у суб'єктивному відчутті Людини вплив амплітудних характеристик задля сприйняття звукових хвиль визначає голосність звуку.

Слід відзначити, що людське вухо неспроможне розрізняти найменші звукові тиски, що лежать в межах від $0 < P < P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. Сюди відноситься, наприклад, шум молекул при їхньому зіткненні (що насправді існує, та може бути зафіксований за допомогою мікрофону із (найпотужнішим) підсилювачем, та ін.) Найменші, найтихіші звуки характеризуються граничним значенням $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. Отже, діапазон чутності звуку (за гучністю) лежить в межах $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} < P < P_{\text{больове}} = 10^2 \text{ Па}$, де $P_{\text{больове}}$ - так званий поріг больового відчуття. При його перебільшенні людина вже не чує звук як звук, а відчуває замість того біль; подальше перебільшення призводить до втрати слуху, робить руйнування в організмі і т.і. Таке перебільшення фактично переводить звукову хвилю в розряд ударних хвиль (що також описуються тією ж формулою (2.1)), і деякі хвильові особливості, що (з точки зору скрупільозного фізичного підходу) відрізняють

звукову хвилю від ударної, із значним підвищенням P затираються.

Таким чином, якщо потребується графічно зобразити звуковий тиск на осі координат, початок її відліку не може збігатися із нулем (початок відліку - від величини $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па); крім того, при такій побудові виникають проблеми, що пов'язані з великим діапазоном (від 10^{-5} до 10^2 ; фактично це означатиме необхідність градуювати таку шкалу на 10 мільйонів поділок). Тому в акустиці прийнято, (прологарифмувавши означену шкалу), вимірювати не абсолютні значення звукового тиску P , Па, а відносні логарифмічні величини - рівні звукового тиску L , дБ. Рівень звукового тиску зв'язується з (абсолютним) значенням звукового тиску P , Па залежністю:

$$L = 20 \lg P/P_0, \text{ дБ.}$$

В розглянутому прикладі ми взяли для розгляду таку характеристику, як тиск газу (звуковий тиск та його рівень). Це обумовлено тим, що рівні звукового тиску на практиці вимірюють шумомірами, які в якості приймача застосують мікрофон (що реагує саме на звуковий тиск). Як бути у випадку, наприклад, твердого тіла (що просто не може бути характеризовано через який-небудь тиск)? В такому разі використовується така характеристика, як коливальна швидкість v , м/с, (гранічне значення $v_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м/с якої відповідає гранічному значенню $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па); та рівень коливальної швидкості:

$$L = 20 \lg v/v_0, \text{ дБ;}$$

приймачем в вимірювальних пристроях є датчик коливальної швидкості. Якщо розмірковувати про звукову енергію (що більш правильно, тому що звуковий тиск та коливальна швидкість є локальними характеристиками звукової енергії), то тут застосовують порогові значення інтенсивності $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²; $I_{\text{больше}} = 10^2$ Вт/м²; рівень

інтенсивності звуку

$$L = 10 \lg I/I_0, \text{ дБ.}$$

В любому разі, логарифмічна шкала має початок відліку з 0 дБ, (а не з якоїсь малозрозумілої некваліфікованому користувачеві чисельної величини); діапазон чутних звуків $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2 < I < I_{\text{больове}} = 10^2 \text{ Вт/м}^2$ уміщається в 140 дБ.

Застосування децибелів має ще інші переваги. Загальновідомі психофізіологічні дослідження Вебера та Фехнера довели, що сприйняття людиною відчуттів (звук, світло, інші подразники) здійснюється нелінійно.

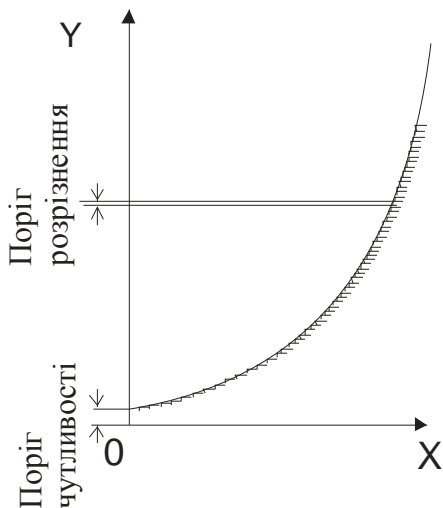


Рис. 2.6. Східчасте збільшення будь-яких відчуттів людини Y в залежності від збільшення величини подразника X (згідно з дослідженнями в галузі психофізіології).

Вебер довів, що приріст абиякого відчуття (u відповідності приросту подразника) відбувається не плавно, а східчастим чином; визначив величину одиниці такого східчастого графіку, тобто поріг (ми вже оперували поняттями поріг сприйняття звуку, поріг больового

відчуття); Фехнер же довів, що форма графіка апроксимується логарифмічною залежністю (залежність Вебера-Фехнера):

$$Y = \log X + C$$

де Y - величина приросту відчуття, що сприймається; X - величина приросту подразника; C - константа (поріг сприйняття подразника). Докладніше це можна прочитати в літературі по психофізіології, (або, наприклад, в [86]).

Так от, дослідження довели, що слухові відчуття (у відповідності закону Вебера-Фехнера) сприймаються сходинками величиною в 1 дБ. Таким чином, застосування логарифмічних рівнів не тільки складає зручності в математичному плані, але й в повній мірі відповідає психофізіологічним особливостям організму людини. Завдяки цьому, наприклад, легко пояснюється такий (первісно малозрозумілий) факт: магнітофон із двома акустичними системами не дає точно в два рази більшу гучність, аніж той самий магнітофон із однією акустичною системою. Гучність, звісно, буде вище, але не в два рази? Відповідь в тому, що ми маємо справу із рівнями, що складаються між собою за правилами складання логарифмів.

Ця задача важлива при розгляді поставлених в цій книзі питань. Якщо одночасно працюють декілька джерел шуму з рівнями звукового тиску L_{Ri} , то в розрахунковій точці сумарний розмір рівня звукового тиску визначається при складанні рівнів (в дБ) за правилами складання логарифмів, що існують в математиці. Енергетична сумація рівнів звуку здійснюється за співвідношенням

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum 10^{0,1L_{Ri}}, \text{ дБ,}$$

де L_{Ri} - величини абсолютних значень кожного з рівнів звукового тиску, що складаються, дБ.

Також сумарний рівень можна визначити,

використовуючи графік (рис. 2.7). Знаючи різницю між двома рівнями, дБ, що підсумовуюються, за ним визначають додаток ΔL до найбільшого з рівнів.

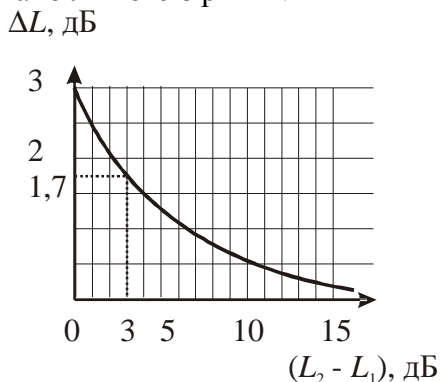


Рис. 2.7. Вирахування сумарної дії шуму від декількох джерел.

Наприклад, необхідно знайти сумарний рівень для двох рівнів, що складаються: $L_1 = 90$ дБ, $L_2 = 93$ дБ. Використовуючи рис 2.7, визначаємо різницю між L_1 та L_2 . Різниця рівнів, що складаються $L_2 - L_1 = 3$ дБ, додаток до найбільшого рівня $\Delta L = 1,7$ дБ. Тоді $L_{\Sigma} = L_2 + \Delta L = 93 + 1,7 = 94,7$ дБ.

Частотні характеристики звуку визначають спектральний склад коливань, - що для звукової хвилі, наприклад, виливається в суб'єктивне відчуття тембру звучання (і його відтінків). Окрім амплітудних характеристик, значну роль в описі звуку відіграють так звані частотні характеристики звуку. Частота - це кількість коливань в одиницю часу, тобто 1 Гц являє собою 1 коливання в секунду.

Частота коливань f , Гц, являє собою величину, зворотну періоду коливань:

$$f = 1/T, \text{ Гц,}$$

де T - період коливань, (тобто час, за який відбувається 1 окремо узятє коливання), с.

Таким чином, частота ув'язана з часом. Тим часом, в одній хвилі, як правило, одночасно представлені коливання різних частот, кожне з яких має свою амплітуду, - що дозволяє побудувати так названий спектр: (залежність АЧХ від частоти), - до того ж безперестанно мінливий у часі. Частотні характеристики визначають спектральний склад коливань, - що для звукової хвилі, наприклад, виливається в суб'єктивне відчуття тембру звучання (і його відтінків).

Звукова хвиля являє собою сукупність різночастотних коливань на певних частотах. Наприклад, неодмінно в ній присутній так званий броунівський рух часток пружного середовища, неупорядкований рух дрібних часток в газі або рідині, але частоти броунівського руху молекул повітря лежать за межами чутного для Людини (за частотою) діапазону звуків (див. главу 1.5 монографії "На шляху до наукових відкриттів" [58]), і тому вони ніяк не відбиваються на сприйнятті мовної та ін. інформації. Діапазон чутних для Людини звуків лежить в межах $20 \text{ Гц} < f < 20000 \text{ Гц}$.

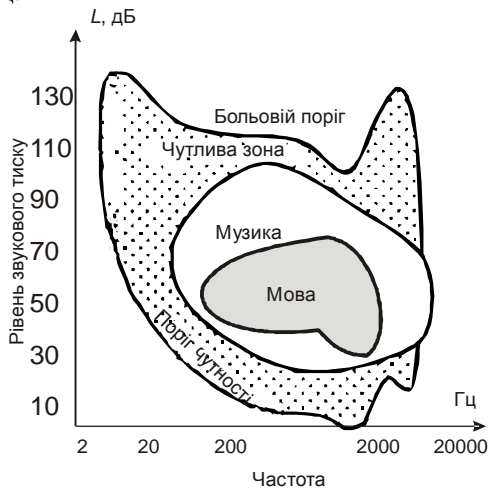


Рис 2.8. Діапазон слухового сприйняття людини

Звуки із наднизькою частотою $f < 20$ Гц називаються інфразвуками; звуки із надвисокою частотою $f > 20000$ Гц - ультразвуками. Людина в силу особливостей побудови органів слуху не може чути ні ультразвук, ні інфразвук. Різні тварини, на відміну від людини, в силу притаманної їм конституції тіла мають інші діапазони чутних звуків (рис. 2.9).

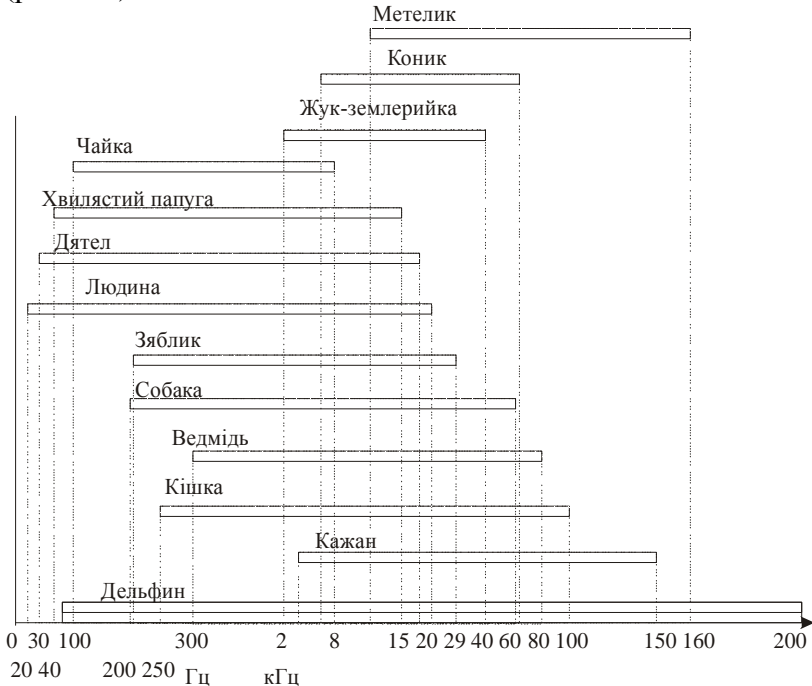


Рис. 2.9. Чутні діапазони звуку для різних тварин (згідно за даними [87]).

Отже, чутний для людини звук буде характеризуватися якимсь графіком АЧХ (залежністю рівнів звукового тиску від частоти на різних частотах), що називається *спектром звуку*. В залежності від форми графіку розрізняють лінійчатий спектр (приклад - сирена), та ін.

Просторові характеристики визначають розподіл

енергії в просторі хвилею, що розповсюджується: геофізичні координати збурювання, що переносяться даною хвилею, його конкретні геометричні параметри, просторову конфігурацію.

Основним принципом, що описує поширення хвиль, є так званий принцип Гюйгенса-Френеля: кожна точка простору, який досягла в даний момент хвиля, що поширюється, стає джерелом елементарних сферичних хвиль. Результат інтерференції цих хвиль – поверхня елементарних сферичних хвиль, що обгинає, яка утворює хвильову поверхню.

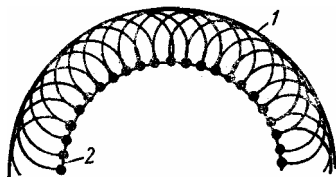


Рис. 2.10. Фронт хвилі, що, наприклад, спостерігається при дифракції (крива 1) – як результат додавання цих вторинних хвиль, що надходять від джерела хвильового збурювання (крива 2).

Ключовим поняттям при цьому виступає фронт хвилі: тобто сумарна поверхня, що оточує джерело випромінювання, утворене точками, що знаходяться в однакових фазах. Варто мати на увазі, що така уявлювана поверхня, (яка може бути побудована графічно на базі відомих класичних закономірностей), і реальна для тієї ж хвилі, - (з урахуванням того, що вона поширюється в повітрі чи якому-небудь іншим середовищі, переходить з одного середовища в інше і т.п.), - у дійсності, як правило, дуже сильно розрізняються між собою [88]. Ці перекручування і корективи визначаються, у першу чергу, характеристиками середовища поширення хвилі, що дуже сильно впливають на форму фронту, ослаблення амплітуди хвилі, і ін.

Тимчасові характеристики визначають розподіл

коливань у часі, тривалість звукових і світлових імпульсів, і ін.

Характеристики середовища розповсюдження відіграють найважливішу роль при акустичних процесах, оскільки, як вже говорилося вище, звукові хвилі можуть розповсюджуватися тільки в пружному середовищі. (Вакуум, наприклад, не є пружним середовищем, і звукові хвилі в ньому не розповсюджуються). Найважливішою з таких характеристик є хвильовий опір. В виносці ми надаємо пряму цитату з [89]¹.

Швидкість поширення звуку c залежить від характеристик середовища:

$$c = X / \rho, \text{ м/с}$$

де ρ - щільність середовища поширення, кг/м^3 ; X -

¹ «Волновое сопротивление в акустике, в газообразной или жидкой среде — отношение звукового давления p в бегущей плоской волне к скорости v колебания частиц среды. В. с. характеризует степень жёсткости среды (т. е. способность среды сопротивляться образованию деформаций) в режиме бегущей волны. В. с. не зависит от формы волны и выражается формулой: $p/v = \rho c$, где ρ — плотность среды, c — скорость звука. В. с. представляет собой импеданс акустической среды для плоских волн. Термин «В. с.» введён по аналогии с В. с. в теории электрических линий; при этом давление соответствует напряжению, а скорость смещения частиц — электрическому току. В. с. — важнейшая характеристика среды, определяющая условия отражения и преломления волн на её границе. При нормальном падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред коэффициент отражения определяется только отношением В. с. этих сред; если В. с. сред равны, то волна проходит границу без отражения. Понятием В. с. можно пользоваться и для твёрдого тела (для продольных и поперечных упругих волн в неограниченном твёрдом теле и для продольных волн в стержне), определяя В. с. как отношение соответствующего механического напряжения, взятого с обратным знаком, к скорости частиц среды.»

характеристика стискальності середовища, Па: (рис. 2.11)

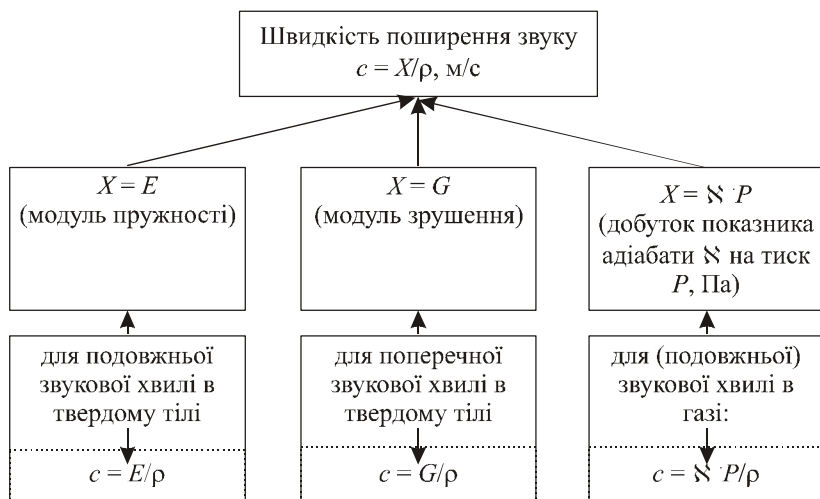


Рис. 2.11. X - характеристика стискальності середовища для різних типів хвиль, та формули визначення швидкості звуку c , м/с.

Усі групи хвильових характеристик дуже тісно зв'язані між собою. Наприклад, поширення хвилі в просторі супроводжується невинним розширенням її фронту, - що, як більш докладно показано далі, - приводить до перерозподілу енергії по його поверхні, яка постійно збільшується, - і, в остаточному підсумку, забезпечує безперестанне ослаблення інтенсивності коливань (розсіювання).

Якщо аналізувати графіки АЧХ хвилі, явно видно, що в той же самий момент часу та ж сама хвиля в одній і тій же точці має безліч фронтів, кожний для своєї дискретної частоти, що розрізняються між собою фразами коливань, а однакову фазу вона має відповідно до графіка гіперболічної залежності:

$$T = \frac{R}{c} = \frac{R}{\lambda \cdot f}, \text{ с,} \quad (2.2)$$

де R - відстань, м, пройдена хвилею, що має довжину хвилі λ , м, і частоту f , Гц, за час T , с: (c – швидкість розповсюдження звуку). Тут взаємопов'язані тимчасові, просторові, частотні характеристики одночасно.

Зменшення амплітуди хвилі ув'язано і з характеристиками її середовища поширення: явище поглинання енергії в середовищі, (яке залежить від її фізико-хімічного складу й ін.).

Ось як говорить про «гучність звуку» [90]: *«Громкость звука, величина, характеризующая слуховое ощущение для данного звука. Г. з. сложным образом зависит от звукового давления (или интенсивности звука), частоты и формы колебаний. При неизменной частоте и форме колебаний Г. з. растет с увеличением звукового давления (см. рис.). При одинаковом звуковом давлении Г. з. чистых тонов (гармонических колебаний) различной частоты различна, т. е. на разных частотах одинаковую громкость могут иметь звуки разной интенсивности. Г. з. данной частоты оценивают, сравнивая её с громкостью простого тона частотой 1000 Гц. Уровень звукового давления (в дБ) чистого тона с частотой 1000 Гц, столь же громкого (сравнением на слух), как и измеряемый звук, называется уровнем громкости данного звука (в фонах). Г. з. для сложных звуков оценивают по условной шкале в сонах. Г. з. является важной характеристикой музыкального звука...»*

При незмінній частоті гучність звуку зростає зі збільшенням інтенсивності. При однаковій інтенсивності найбільшою гучністю володіють звуки в діапазоні частот 700 - 6000 Гц. Нульовий рівень гучності звуку відповідає звуковому тиску 20 мкПа й інтенсивності звуку 10^{-12} Вт/м² при частоті 1 кГц. Вимірюється звучність в сонах і фонах. Фон, є одиницею рівня гучності звуку. Для чистого тону 1 фон збігається з 1 дБ. Сон (від лат. sonus - звук), одиниця

шкали гучності звуку, що виражає безпосередню суб'єктивну оцінку порівняльної гучності чистого тону. 1 сон відповідає рівню гучності 40 фон при частоті звуку 1000 Гц. При кожному збільшенні гучності на 10 фон число одиниць сонів приблизно подвоюється.

Також надаємо ілюстрацію, що надає вищезгадану умовну шкалу, від градуйовану в тонах, в залежності від рівня звукового тиску та частоти:

L , дБ

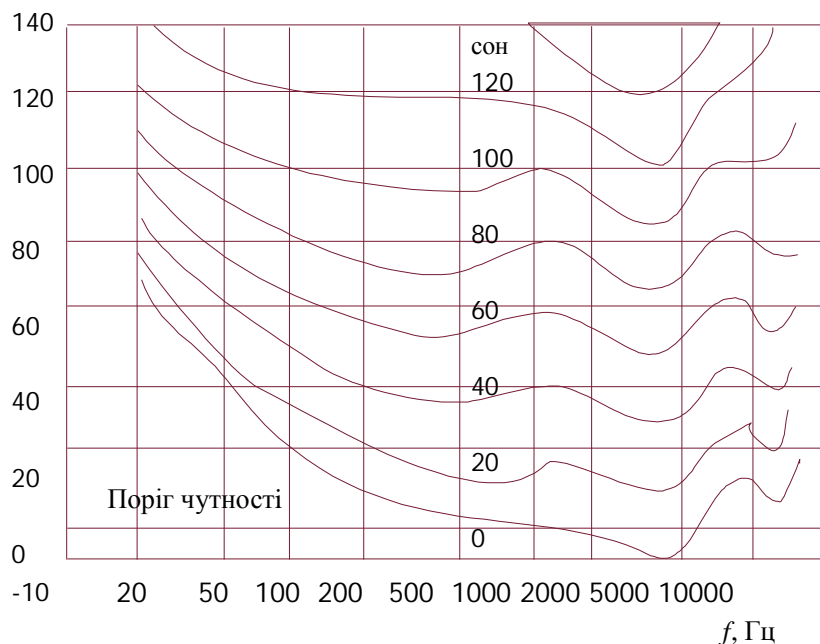


Рис. 2.12. Криві рівної голосності.

Спроба об'єднати вплив тих чи інших хвильових характеристик на характер протікання різноманітних хвильових явищ в літературних джерелах не зустрічається. Вона надана автором в роботі [58]. Оскільки ця інформація важлива для розуміння подальшого тексту; але, являючись повторно наведеною в цій роботі, фактично дублює [58], -

вона винесена в додатки.

2.3. Вимірювання рівнів шуму

Для вимірювання рівнів шуму застосовуються шумоміри, основними елементами яких є: мікрофон, що перетворює звукові коливання повітряного середовища на електричні, підсилювач та стрілочний або цифровий індикатор [91].

Спектральний аналіз шуму може здійснюватися і за допомогою вимірювального тракту, який складається з мікрофона, шумоміра та аналізатора шуму (фільтра).

Приклад одного шумомірів - пристрій ВШВ-003 показаний на наступному кресленні (рис. 2.13).

Вимірювання рівнів звука в децибелах А на характеристиці А передбачає, що кнопки "V", "Г кГц" і "ФІЛЬТРИ ОКТАВНІ" повинні бути відключені, тобто знаходитися у віджатому стані; роблять вимір рівня звуку поступово, спочатку перемикачем "ДЕЛИТЕЛЬ І", а потім "ДЕЛИТЕЛЬ ІІ", виводячи стрілку приладу в сектор 0–10 дБ. Для зручності можна використовувати світлове табло, що фіксує суму положень перемикачів "ДЕЛИТЕЛЬ І" і "ДЕЛИТЕЛЬ ІІ" навпроти світлодіода. Для одержання результату виміру слід скласти показання світлодіода і вимірювальної шкали на передній панелі приладу. Якщо періодично загоряється індикатор "ПЕРЕГРУЗ", необхідно переключити "ДЕЛИТЕЛЬ" на рівень вище. Вимірювання рівня звукового тиску в октавних смугах частот проводять при натиснутій кнопці "ФІЛЬТРИ ОКТАВНІ". Переключаючи перемикач, включають по черзі середньгеометричні частоти 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, установлюючи щоразу перемикач "ДЕЛИТЕЛЬ І" і "ДЕЛИТЕЛЬ ІІ" у положення, при якому стрілка вимірювального приладу займає положення 0 – 10. При цьому відлік здійснюється аналогічно виміру рівня звуку.

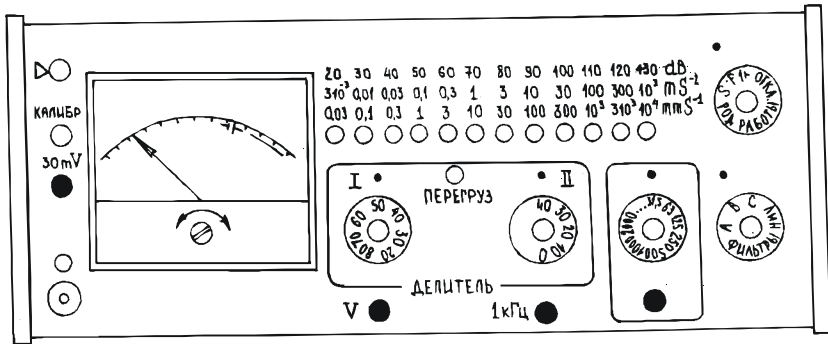


Рис. 2.13. – Загальний вигляд вимірювача шуму та вібрації ВШВ-003.

Вимірювання звукоізолюючої акустичної ефективності матеріалів (тобто їхньої звукоізолюючої здатності) можуть бути здійснені на лабораторному стенді, що показаний на рис. 2.14.

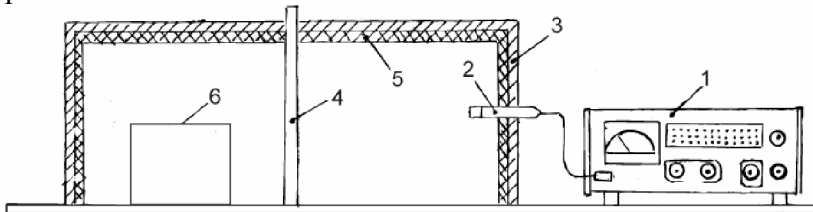


Рис. 2.14. Лабораторний стенд: 1 - шумомір ВШВ - 003, 2 - мікрофонний капсуль М - 101, 3 - звукоізолюючий кожух, 4 - зразок досліджуваної конструкції (панелі), 5 - звуковбирний матеріал, 6 - ДШ.

Акустичні випробування приміщень засновані на електричних вимірах звукового сигналу, прийнятого в приміщенні мікрофоном, і полягають у визначенні рівномірності розподілу звуку в просторі й у дослідженні загасання відзвуку в часі. Поряд з випробуваннями залів у природі все більше поширення знаходять випробування малих моделей, що дозволяє вчасно уникнути помилок при проектуванні нових залів і знаходити способи виправлення дефектів уже існуючих.

Час реверберації вимірюють, записуючи процес убування рівня звуку після вимикання його джерела; для цього застосовуються самописи з логарифмічною шкалою. Час реверберації визначається по середньому нахилу записаної на стрічці рівнеграми.

Визначення коефіцієнта поглинання α здійснюють на підставі відомих формул Себіна (5.1) та Ейрінга (5.2), про які буде докладніше розказано пізніше. Коефіцієнти поглинання різних матеріалів визначають вимірами в "гучній" (ревербераційної) камері. Позначимо обсяг камери через V , м³ а її час реверберації через T_0 , с. Після внесення в камеру досліджуваного матеріалу із площею S_M , м² час реверберації зменшується до T_M . Тоді:

$$\alpha = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{S_M} \cdot \left[\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right]$$

Якщо площа досліджуваного предмета (наприклад, стола, крісла й т.д.) не може бути виражена певним числом, знаходять поглинання предмета

$$A = \frac{V}{6} \cdot \left[\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right].$$

Докладно про акустичні виміри можна дізнатися, наприклад, в [92 - 94], а про вимірювальну апаратуру для них – в [95].

2.4. Нормовані характеристики звуку

Контроль за рівнями шуму та його оцінка здійснюються згідно з ДСН № 3.3.6.037-99, та ГОСТ 12.1.050-86; ГОСТ 12.1.003-83*; ДСТУ 2867-94 [6, 7, 9, 8].

На робочих місцях згідно з ГОСТ 12.1.003-83 шум характеризують рівні звукового тиску в октавних середньгеометричних смугах частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 та 8000 Гц. Для орієнтовної оцінки допускається брати рівні звуку за шкалою А (у дБА).

Характеристика непостійного шуму на робочих місцях — еквівалентний рівень звуку. На рис. 2.15 надано нормативні рівні звукового тиску та рівні звуку на постійних робочих місцях («Санітарні норми виробничого звуку, ультразвуку та інфразвуку» ДСН 3.3.6.037-99) у графічному вигляді (тобто спектри).

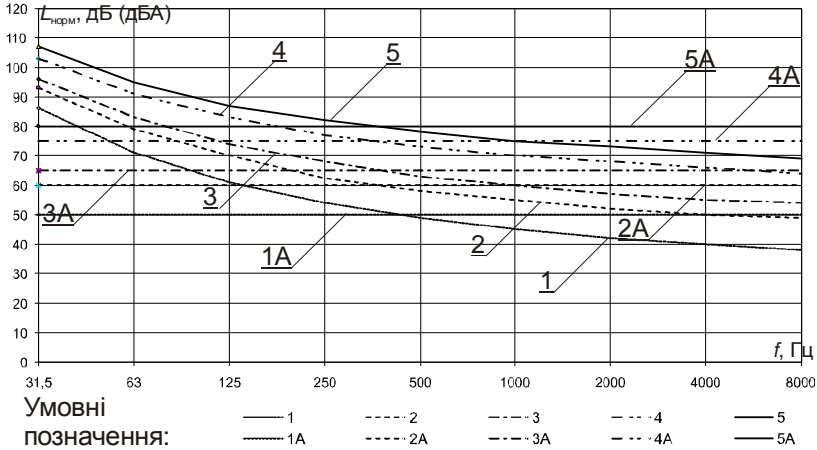


Рис. 2.15. Нормативні спектри шуму (рівні звуку та звукового тиску згідно ДСН 3.3.6.037-99 для різних видів діяльності):

1. Творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами, наукова діяльність, конструювання та проектування, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність; робочі місця у приміщеннях – дирекції, проектно-конструкторських бюро, розрахувачів, програмістів обчислювальних машин, у лабораторіях для теоретичних робіт та обробки даних, прийому хворих у медпунктах (рівень звукового тиску, дБ); 1А. Те ж, рівень звуку в дБА (=50 дБА).

2. Висококваліфікована робота, що вимагає зосередження, адміністративно-керівна діяльність, вимрювальні та аналітичні роботи у лабораторії; робочі місця в приміщеннях цехового керівного апарату, контор, лабораторій; 2А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 60 дБА).

3. Робота, що виконується з вказівками та акустичними сигналами, які часто надходять; робота, що потребує постійного слухового контролю, операторська робота за точним графіком з інструкцією, диспетчерська робота: робочі місця у приміщеннях диспетчерської служби, кабінетах та приміщеннях спостереження та дистанційного

керування з мовним зв'язком по телефону, друкарських бюро, на дільницях точного складання, на телефонних та телеграфних станціях, у приміщеннях майстрів, у залах обробки інформації на обчислювальних машинах без дисплея та у приміщеннях операторів акустиків; 3А. Те ж, рівень звуку в дБА (=65 дБА).

4. Робота, що вимагає зосередження, робота з підвищеними вимогами до процесів спостереження та дистанційного керування виробничими циклами: робочі місця за пультами у кабінетах нагляду та дистанційного керування без мовного зв'язку по телефону; у приміщеннях лабораторій з шумовим устаткуванням, шумними агрегатами обчислювальних машин. 4А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 75 дБА).

5. Виконання всіх видів робіт (крім перелічених у пп. 1-4 та аналогічних їм) на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та території підприємств. 5А. Те ж, рівень звуку в дБА (= 80 дБА).

Норми враховують біологічну небезпеку тонального та імпульсного шуму, а також категорію фізичного напруження (важкості праці) завдяки введенню відповідних поправок.

Вимоги до допустимих рівнів ультразвуку на робочих місцях визначаються в «Санітарних нормах виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» (ДСН 3.3.6.037-99) [17]. Джерелами ультразвуку є виробниче устаткування, в якому генеруються ультразвукові коливання для виконання технологічного процесу, а також обладнання, при використанні якого ультразвук виникає як супровідний фактор. ДСН 3.3.6.037-99 визначає допустимі рівні звукового тиску для робочих місць вимірюваного ультразвуку у третьоктавних смугах із середньгеометричними частотами. Так, для середньгеометричної частоти 12,5 кГц рівень звукового тиску не повинен перевищувати 80 дБ, для 16 кГц - 90 дБ, 20 кГц - 100 дБ, 25 кГц - 105 дБ; для середньгеометричних частот у діапазоні 31,5 - 10 кГц рівні звукового тиску не повинні перевищувати 110 дБ.

Загальний рівень звукового тиску не повинен перевищувати 110 дБ.

"Санітарними нормами і правилами при роботі на промислових ультразвукових установках" (№ 1733-77) обмежуються рівні звукового тиску у високочастотній області чутних звуків і ультразвуків на робочих місцях (від 80 до 110 дБ при середньгеометричних частотах третьоктавних смуг від 12,5 до 100 кГц).

Ультразвук, що передається контактним шляхом, нормується "Санітарними нормами і правилами при роботі з устаткуванням, що створює ультразвуки, що передаються контактним шляхом на руки працюючих" № 2282-80.

Вимоги до допустимих рівнів інфразвуку на робочих визначаються в "Санітарних нормах виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку" (ДСН 3.3.6.037-99), де за характером спектру інфразвук підрозділяється на широкосмуговий і гармонійний. Гармонійний характер спектра встановлюють в октавних смугах частот по перевищенню рівня в одній смузі над сусідніми не менш чим на 10 дБ. По тимчасових характеристиках інфразвук підрозділяється на постійний і непостійний.

Нормованими характеристиками інфразвуку на робочих місцях є рівні звукового тиску в децибелах в октавних смугах частот зі середньгеометричними частотами 2, 4, 8, 16 Гц. ДСН 3.3.6.037-99 визначає допустимі рівні звукового тиску для робочих місць вимірюваного інфразвуку у третьоктавних смугах з середньгеометричними частотами. Так, припустимими рівнями звукового тиску є 105 дБ в октавних смугах 2, 4, 8, 16 Гц і 102 дБ в октавній смузі 31,5 Гц. При цьому загальний рівень звукового тиску не повинний перевищувати 110 дБ.

Для непостійного інфразвуку нормованою характеристикою є загальний рівень звукового тиску.

2.5. Хвильові явища, що супроводжують розповсюдження звуку

2.5.1. *Взаємозв'язок коефіцієнтів відбиття ρ , поглинання α і пропусення τ*

Відповідно до закону збереження енергії інтенсивність падаючої хвилі $I_{\text{падіння}}$, що попадає на яку-небудь перешкоду, перерозподіляється таким чином:

частково відбивається $I_{\text{відбиття}}$, Вт/м²;

частково поглинається усередині середовища перешкоди $I_{\text{поглинання}}$, Вт/м²;

частково проходить наскрізь $I_{\text{пропусення}}$, Вт/м²;

$$I_{\text{пад}} = I_{\text{відбиття}} + I_{\text{поглинання}} + I_{\text{пропусення}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.3)$$

Відношення $I_{\text{відбиття}}$, $I_{\text{поглинання}}$, і $I_{\text{пропусення}}$ до $I_{\text{падіння}}$ відповідно носять назви:

ρ - коефіцієнт відбиття, - (іноді називаний альбедо):

$$\rho = \frac{I_{\text{відбиття}}}{I_{\text{падіння}}}; \quad (2.4)$$

α - коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \frac{I_{\text{поглинання}}}{I_{\text{падіння}}}; \quad (2.5)$$

τ - коефіцієнт пропусення:

$$\tau = \frac{I_{\text{пропусення}}}{I_{\text{падіння}}}. \quad (2.6)$$

Відповідно, залежність (2.3) (згідно до фундаментальної закономірності матеріального світу –

закону збереження енергії) має вигляд:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.7)$$

2.5.2. *Відбиття.* Явище відбиття звуку полягає в поверненні звукової хвилі при зустрічі з границею розподілу 2-х середовищ з різними щільністю і стискальністю "назад" у перше середовище [96]. Для усіх видів хвиль правомірний закон відбиття: кути падіння φ і відбиття φ' рівні між собою; промінь, що падає, відбитий промінь і перпендикуляр, відновлений у крапці падіння, лежать у одній площині.

$$\varphi = \varphi' = \text{const.}$$

Ця залежність справедлива як у випадку дзеркального (розміри l нерівностей на поверхні розподілу менше λ), так і дифузійного ($l \geq \lambda$) відбиття [97, 98]. Кожен окремий промінь, що падає, при дифузійному відображенні підкоряється законам відбиття. Промені, відбиті від ділянок шорсткуватої поверхні, орієнтованих різним чином стосовно падаючого променя, не утворюють рівнобіжного пучка після процесу відбиття.

Для законів відбиття звуку виконується принцип оборотності ходу звукових променів: промінь звуку, що поширюється за шляхом відбитого променя, відбившись в місці падіння від поверхні тіла, поширюється далі за шляхом променя, що падає [99, с. - 420]. Ця залежність широко застосована нами в 7-й частині цієї книги.

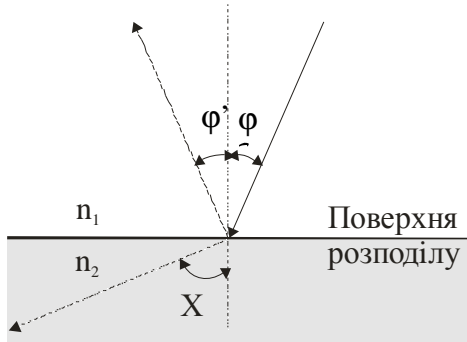


Рис. 2.16. Шляхи падаючого, відбитого та переломленого променів.

Звукові промені, проходячи через границю розподілу двох середовищ з різними показниками переломлення n_1 і n_2 , визнають відбиття і переломлення. Відбитий і переломлений промені виявляються частково лінійно поляризованими. У відбитому звуковому промені коливання відбуваються переважно перпендикулярно площини падіння, а в переломленому — у площині падіння (рис. 2.17).

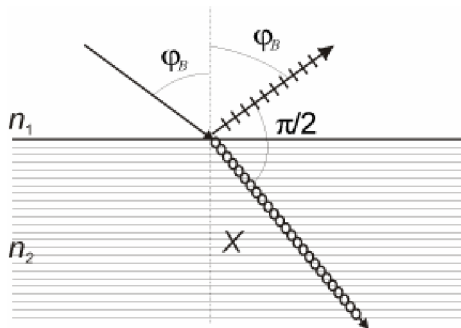


Рис. 2.17. Поляризація при відбитті звуку (згідно за нашими власними дослідженнями процесів поляризації звуку - (див. монографію «На шляху до наукових відкриттів» [58])).

Згідно за нашими даними [58], існує такий кут падіння φ_B , називаний кутом Брюстера, при якому відбитий звук

виявляється цілком лінійно поляризованим. Це явище називається законом Брюстера. Кут Брюстера визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n_{12},$$

де $n_{12} = n_2/n_1$ - показник переломлення середовища, в якому поширюється переломлений звук, щодо середовища, в якому поширюється промінь, що падає. При куті Брюстера відбитий та переломлений промені утворюють прямий кут: $\varphi_B + \varphi_B = \pi/2$.

Відбиття під кутом Брюстера являє собою найпростіший спосіб одержання поляризованого звуку. Відбитий звук лінійно поляризований таким чином, що коливання його хвилі відбуваються в площині, перпендикулярній площині падіння. Недоліком цього способу одержання поляризованого звуку є мала інтенсивність відбитих променів.

2.5.3. *Дисперсія.* Це - залежність швидкості хвиль c у речовині від їхньої частоти f .

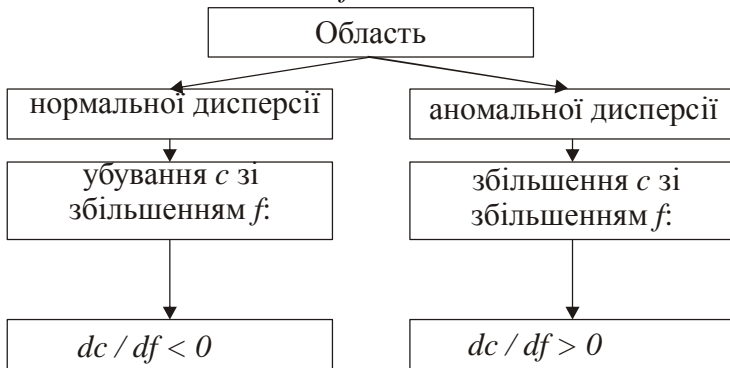


Рис. 2.18. Дисперсія буває нормальна і аномальна.

Що ж стосується поширення звуку в повітрі, те його фазова швидкість c для амплітуд, що звичайно зустрічаються в технічній акустиці при рішенні звичайних завдань, є частотно-незалежною, тобто вона вільна від

дисперсії. Явище дисперсії звуку в газах виявляється в області ультра- і гіперзвукових частот і при дуже великих амплітудах, що ведуть до нелінійних процесів.

2.5.4. *Дифракція*. Дифракція – це обгинання хвилями перешкод, що включає як порушення прямолінійності поширення, так і супутні йому інтерференційні явища при розмірах перешкоди, порівнянних з довжиною хвилі λ . При цьому хвиля заходить за перешкоду (в область геометричної тіні). Дифракція властива усякому хвильовому руху. У більш широкому змісті під дифракцією розуміють сукупність явищ, що спостерігаються при проходженні хвиль через середовища із сильно вираженими неоднорідностями.

Теорія дифракції розглядає хвильові процеси в тих випадках, коли на шляху поширення хвилі є які - або перешкоди. Строге вивчення дифракції хвиль на основі рішення хвильових рівнянь, доповнених граничними умовами, що враховують неоднорідності середовища, є дуже складним завданням. Тому для аналізу явища використовують принцип Гюйгенса — Френеля: кожне місце хвильового фронту в даний момент часу можна розглядати як джерело вторинних хвиль, що є когерентними. Відповідно до цього принципу кожне місце середовища, що занурене в хвильовий рух, є джерелом нової хвилі, що підлягає інтерференції. Явище інтерференції спостерігається і при проходженні хвилі через вузьку щілину. При падінні хвилі на екран з вузькою щілиною на краях тієї щілини відповідно до принципу Гюйгенса утворюються віялообразно розбіжні вторинні елементарні хвилі, причому для визначених напрямків їхня різниця ходу є такою, що при накладенні хвилі підлягають інтерференції [97]. Принцип Гюйгенса — Френеля не може бути застосований, якщо на поверхні перешкод змінюється розподіл інтенсивності хвиль.

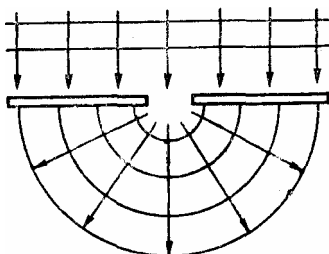


Рис. 2.19. Дифракція при падінні хвилі на екран з вузькою щілиною.

Окремий випадок цього явища являє собою так звана дифракція Френеля – дифракція сферичної хвилі на неоднорідності: наприклад, отвір в екрані, розмір якого порівняємо з розміром зони Френеля в $\sqrt{z\lambda}$, де z – відстань місця спостереження до екрана (ділянки, на якому розбивається хвильова поверхня при розгляді дифракційної хвилі; вибирається так, щоб віддалення кожної наступної зони від місця спостереження було на $\frac{1}{2}$ більше, ніж віддалення попередньої зони від того ж місця).

Відомі Френеля формули, що визначають амплітуди, фази і поляризації відбиття і переломлення плоских хвиль, що виникають при падінні плоскої монохроматичної світлової хвилі на нерухому плоску границю розподілу двох однорідних середовищ.

2.5.5. *Дихроїзм* - (від *dichroos* - двоколірний), різне фарбування одноосьових кристалів у білому світлі при спостереженні уздовж оптичної осі й перпендикулярно до неї. Відкритий П. Кордьє (P. Cordier) в 1809. Порозумівається неоднаковим поглинанням звичайних і незвичайної світлових хвиль. Круговий дихроїзм - різне поглинання світла правої й лівої кругових поляризацій. Дихроїзм - окремий випадок плеохроїзму.

Плеохроїзм (*pleon* - більше численний й *chroma* - колір), властивість анізотропних тіл, напр. кристалів, виявляти різне фарбування при розгляданні їх у білому світлі в

різних напрямках. Обумовлений розходженням спектрів поглинання речовини для променів, що мають різний напрямок і поляризацію.

Дихроїзм (а також плеохроїзм) - різниця поглинання речовиною світла в залежності від орієнтації його вектора \vec{E} - наприклад, при поляризації світла. У будь-яких літературних джерелах дихроїзм розглядається саме як хвильове явище, притаманне лише світлу. Але ж дихроїзм притаманний усіляким хвилям, що випробують поляризацію? Оскільки нами було доказане явище поляризації звукових хвиль в твердому тілі, слід зробити подальший крок... Виходячи з цього, автором уперше була передвіщена гіпотетична можливість дихроїзму звуку при його поляризації [100, 101]. Інші відомості, надавані в будь-яких офіційних джерелах (матеріалах досліджень інших авторів), відсутні.

Таким чином, власними авторськими дослідженнями виявлене невідоме раніше явище дихроїзму (поліхроїзму) звуку - яке відбувається, наприклад, при випадку поляризації звуку, - що полягає в тому, що існує різниця поглинання речовиною звукової енергії в залежності від орієнтації вектора зсуву \vec{S} , обумовлена розходженням спектрів поглинання речовини для звукових променів, що мають різний напрямок і поляризацію.

2.5.6. *Доплера ефект.* Характерний для будь-яких хвиль (світло, звук і ін.): при наближенні джерела хвиль до приймача зменшується частота хвилі f , Гц (а при віддаленні - збільшується) на величину:

$$f - f_0 = \frac{V \cdot f_i}{c}, \text{ Гц,}$$

де f_0 - вихідна частота хвилі джерела, Гц; V - відносна швидкість руху джерела і приймача, м/с; c - швидкість

поширення хвиль, м/с.

2.5.7. *Імпульс хвильовий* – однократне збурювання, що поширюється в просторі чи середовищі. Звуковий імпульс – раптове і швидко зникаюче підвищення тиску.

2.5.8. *Інтерференція*. Компонування декількох хвиль на основі принципу суперпозиції [97], причому:

$$\delta = K \cdot \lambda, \text{ м}$$

- умова посилення інтенсивності хвиль;

$$\delta = (2K + 1) \lambda / 2, \text{ м}$$

- умова гасіння інтенсивності хвиль:

де δ - різниця ходу двох хвиль в області суперпозиції; K - ціле число (0; ± 1 ; ± 2 ; ± 3 ; ...).

Практичними застосуваннями інтерференції, зокрема, є фокусування хвиль, а також так зване самофокусування хвиль.

2.5.9. *Когерентність* (від лат. *cohaerens* — що знаходиться в зв'язку), погоджене протікання в часі декілька коливальних чи хвильових процесів. Якщо різниця фаз 2 коливань залишається постійною в часі чи міняється за певним законом, то коливання називаються когерентними. Коливання, у яких різниця фаз змінюється безладно і швидко в порівнянні з їхнім періодом, називаються некогерентними. Джерелом когерентних коливань, наприклад, є лазер (у т.ч. акустичний [104, 105 - 113]).

2.5.10. *Модуляція коливань*. Зміна амплітуди, частоти, фази й інших характеристик коливань (наприклад, для світла - поляризації монохроматичних світлових коливань) за заданим законом, повільна в порівнянні з періодом цих коливань. Модуляція коливань використовується для передачі інформації. Переносник сигналу в даному випадку – синусоїдальні коливання високої (несущої) частоти, - амплітуда, частота чи фаза яких модулюється

сигналом, що передається. Зокрема, модуляція звуку – це зміна інтенсивності звукового потоку в часі.

2.5.11. *Обертання площини поляризації*. Впливає з фізики процесу поляризації хвиль, але іноді розглядається як самостійне явище. Являє собою поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла при його проходженні через речовину, і спостерігається в оптично активних речовинах, а також у речовинах, поміщених у магнітне поле.

Таким чином, існує базовий матеріал для майбутніх наукових досліджень: якщо є обертання площини поляризації для світла, - чому ж не припустити, що аналогічне явище можливе і для звуку? Це припущення робиться в нашій монографії «На шляху до наукових відкриттів» (п. 2.3.15). Основне завдання при дослідженнях у даному напрямку полягає в тому, щоб виявити такі умови, - (підібрати відповідні сполучення матеріалів), щоб згідно [106], що передбачає поляризацію звукових хвиль, - експериментальним шляхом підтвердити існування даного, невідомого раніше (сугубо стосовно до звуку) хвильового явища. Усе це – досить просто; і, за умови належного експерименту в лабораторних умовах, здатного підтвердити існування даного явища в акустиці, з використанням матеріалів [106, 115], - може зробити справжній переворот в науці!

2.5.12. *Переломлення хвиль*. Це - зміна напрямку поширення хвиль через границю 2-х середовищ. Кути падіння φ і переломлення X зв'язані для пружних (звукових) хвиль як:

$$\frac{\sin\varphi}{\sin X} = \frac{c_{i-1}}{c_i};$$

c_{i-1} і c_i - швидкості поширення хвиль у середовищах $i-1$ і i , м/с.

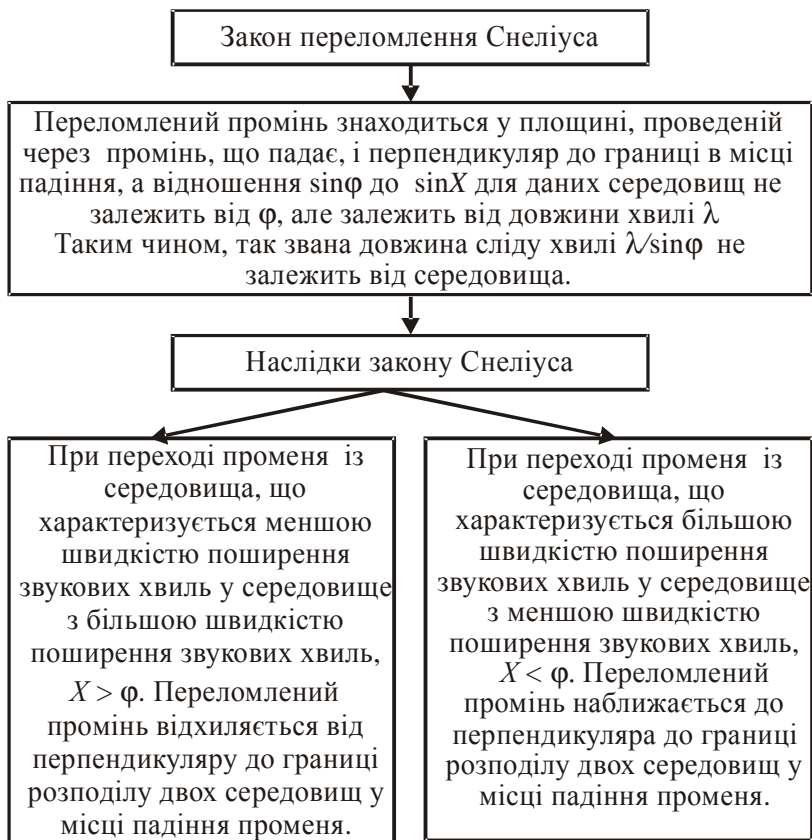


Рис. 2.20. Закон переломлення Снеліуса та його наслідки.

2.5.13. *Повне внутрішнє відбиття.* У всіх видів хвиль [116] відбиття відбувається при їхньому похилому падінні на границю розподілу 2-х середовищ при переході випромінювання із середовища $i-1$ з меншою швидкістю поширення c_{i-1} , м/с у середовище i з більшою швидкістю поширення c_i , м/с при перевищенні фактичним кутом падіння ϕ його граничного значення, обумовленого таким чином:

$$\sin \varphi_{\text{граничне}} = \frac{c_{i-1}}{c_i};$$

де $\varphi_{\text{граничне}}$ - граничне значення кута падіння (рис. 2.16).

На базі [97, с. - 243, 273] можна вказати, що при переході із середовища $i-1$, що характеризується меншою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль у середовище i з більшою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль, $X > \varphi$; переломлений промінь i відхиляється від нормалі, причому кут падіння φ не може перевищувати деякого граничного значення $\varphi_{\text{граничне}}$, тому що $\sin \varphi$ не може бути > 1 .

Якщо фактичне значення $\varphi > \varphi_{\text{граничне}}$, згідно [97, с. - 273] відбувається повне внутрішнє відбиття, і вся енергія звукової хвилі i відбивається назад у те середовище $i-1$, звідки вона прийшла, маючи швидкість поширення $c_{i-1} < c_i$.

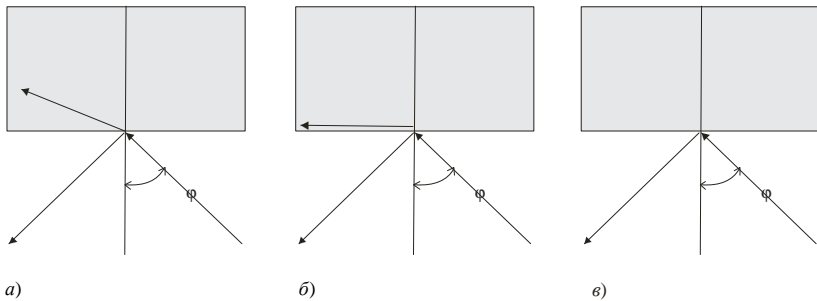


Рис. 2.21. Відбиття хвиль при різних кутах падіння: a - кут падіння менше граничного значення: $\varphi < \varphi_{\text{граничне}}$; b - кут падіння дорівнює граничному значенню: $\varphi = \varphi_{\text{граничне}}$; v - кут падіння більше граничного значення: $\varphi > \varphi_{\text{граничне}}$.

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішньому відбитті хвиль легко може бути обчислений за відомими залежностями. Так, у роботі [117] прямо вказується, наприклад (задля світлових хвиль, але це

повністю аналогічно звуку): *«Правильнее было бы назвать предельным углом тот угол падения, при котором угол преломления светового пучка, вошедшего в оптически менее плотную среду - если бы он существовал - был бы менее $\pi/2$ ».*

2.5.14. *Поглинання.* Поглинання звуку - явище перетворення звукової енергії у внутрішню енергію середовища, обумовлене теплопровідністю, внутрішнім тертям, в'язкістю і деякими релаксаційними процесами в середовищі при зміні її тиску і температури, викликаними звуковою хвилею.

Поширення звуку в атмосфері викликає обмін імпульсами молекул у різних частинах звукової хвилі, що рухаються з різними швидкостями (класичне поглинання за теорією Стокса-Кирхгофа).

Поглинання залежить від частоти джерела звуку, вологості і температури повітря. Вплив поглинання шуму поверхневим покривом при його поширенні над ландшафтом відзначається при висоті місця виміру в межах кута 10° між поверхнею землі і РТ. Характеризується коефіцієнтом поглинання α , який визначається як величина, зворотна відстані, на якій амплітуда звукової хвилі зменшується в $\epsilon = 2,718$ разів, а виражається в см^{-1} (тобто в неперах на см) або в децибелах на м ($1 \text{ дБ/м} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$). Поглинання звуку характеризує також коефіцієнт утрат $e = \alpha\lambda/\rho$: (де λ - довжина хвилі звуку) чи добротність $Q = 1/e$. Величина $\alpha\lambda$ називається логарифмічним декрементом загасання. При поширенні звуку в середовищі характеризується в'язкістю, що володіє (т.зв. «обладающей вязкостью» - рос.), і теплопровідністю,

$$\alpha N \frac{\check{S}^2}{2\rho c^2} \frac{4}{3} y < ' < t \frac{1}{C_v} > \frac{1}{C_p} \quad (2.8)$$

де ρ - щільність середовища, c - швидкість звуку в ньому, ω - кругова частота звукової хвилі, η та ξ - коефіцієнти зсувної і об'ємної в'язкості відповідно, χ - коефіцієнт теплопровідності, C_p та C_v - теплоємності середовища при постійному тиску й обсязі відповідно. Якщо жоден з коефіцієнтів η , ξ и χ не залежить від f , що часто виконується на практиці, то $\alpha \sim \omega^2$. Якщо при проходженні звуку порушується рівноважний стан середовища, поглинання звуку виявляється значно більшим, ніж обумовлене формулою (2.8). Таке поглинання називається релаксаційним і описується формулою

$$\alpha \approx N \frac{1}{2c_0^3} \frac{\tilde{S}^2 t (c_\infty^2 > c_0^2)}{1 < \tilde{S}^2 t^2}$$

де t - час релаксації, c_0 та c_∞ - швидкості звуку при $\omega t \ll 1$ та при $\omega t > 1$ відповідно. У цьому випадку поглинання супроводжується дисперсією звуку. Величина α/f^2 , де $f = \omega/2\pi$, є характеристикою речовини, що визначає поглинання. Вона, як правило, у рідинах менше, ніж у газах, а у твердих тілах для подовжніх хвиль менше, ніж у рідинах.

Поглинання звуку у газах залежить від тиску газу, розрідження газу еквівалентно збільшенню частоти. Теплопровідність і зсувна в'язкість у газах дають у поглинання звуку внесок одного порядку величини. У рідинах поглинання в основному визначається в'язкістю, а внесок теплопровідності зневажено малий. У більшості рідин для поглинання істотні об'ємна в'язкість і релаксаційні процеси. Частота релаксації в рідинах, тобто величина $\omega_p = 1/\tau$, як правило, дуже велика й область релаксації виявляється такою, що лежить в діапазоні високих ультразвукових і гіперзвукових частот. Коефіцієнт

поглинання звичайно сильно залежить від температури і від наявності домішок. Поглинання звуку у твердих тілах визначається в основному внутрішнім тертям і теплопровідністю середовища, а на високих частотах і при низьких температурах - різними процесами взаємодії звуку з внутрішніми порушеннями у твердому тілі, такими, як фонони, електрони, спінові хвилі й ін. Величина поглинання звуку у твердому тілі залежить від кристалічного стану речовини (у монокристалах поглинання звичайно менше, ніж у полікристалах), від наявності дефектів, домішок і дислокацій, від попередньої обробки, який був підданий матеріал. У металах, що пройшли попередню термообробку, а також кування, прокатку і т.п., поглинання часто залежить від амплітуди звуку. У багатьох твердих тілах при не дуже високих частотах $\alpha \sim \omega$, тому величина добротності не залежить від частоти і може служити характеристикою втрат матеріалу. Найменше поглинання при кімнатних температурах було виявлено в деяких діелектриках, наприклад у топазі, берилі, залізоітрієвому гранаті ($\alpha \sim 15$ дБ/см при $f = 9$ ГГц). У металах і напівпровідниках поглинання завжди більше, ніж у діелектриках, оскільки мається додаткове поглинання, зв'язане з взаємодією звуку з електронами провідності. У напівпровідниках ця взаємодія за певних умов може приводити до "негативного поглинання", тобто до посилення звуку. З ростом температури поглинання звуку, як правило, збільшується.

Наявність неоднорідностей у середовищі приводить до збільшення поглинання. У різних пористих і волокнистих речовинах поглинання звуку велике, що дозволяє застосовувати їх для заглушення і звукоізоляції.

Поглинання звуку в повітрі має значення при поширенні його на відстані ($> 100 \lambda$), - чи, інше, якщо на його шляху маються тіла великої площі.

В акустиці прийнято вважати звукопоглинаючими матеріалами такі, у яких $\alpha > 0,2$ (для {найбільш типової} частоти $f = 500$ Гц).

2.5.15. *Подвійна променезаломлюваність.* Є специфічним явищем для світлових хвиль і являє собою роздвоєння їхніх променів при проходженні через оптично неоднорідне (анізотропне) середовище, що відбувається внаслідок залежності показника переломлення n від напрямку вектора \vec{E} світлової хвилі. В одноосьовому кристалі один з цих променів (ординарний) підкоряється звичайним законам переломлення світла, іншої (екстраординарний) - не підкоряється. Обидва промені плоскополяризовані [116]. Згідно за нашими даними, можлива подвійна променезаломлюваність звукових хвиль (монографія «На шляху до наукових відкриттів», п. 2.3.21).

(Це питання ніким не досліджене, окрім нас особисто; але ми вважаємо, що більш ширше розкривати питання, що може стати основою майбутнього наукового відкриття, зараз ще передчасно).

2.5.16. *Поляризація.* Поляризація хвиль - порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Відома поляризація світла, поляризація звуку у твердому середовищі (точніше, її застосування в акустиці) заснується на нашому власному винаході [106].

Поляризацією називають сукупність явищ, у яких виявляється властивість поперечності хвиль видимої (оптичної) частини спектра. Хвиля називається поляризованою, якщо в ній існує виділений напрямок коливань. Розрізняють кілька видів поляризації, що надані на рис. 2.22.a.

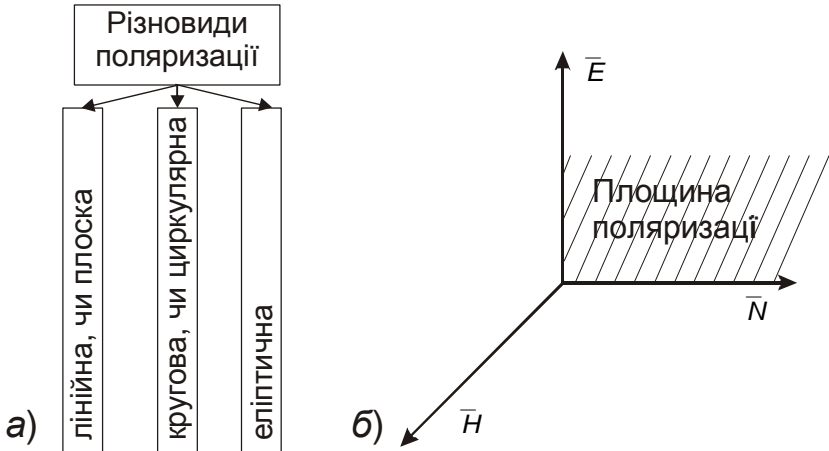


Рис. 2.22. Поляризація: *а* – види поляризації; *б* – площина поляризації - площина, що проходить через два вектори \vec{E} і \vec{N} поперечної ЕМ хвилі.

Поляризація можлива тільки в поперечних хвилях [119]. Плоска світлова хвиля називається лінійно поляризованою, якщо її електричний вектор \vec{E} увесь час знаходиться в одній площині, у якій розташована нормаль \vec{N} до фронту хвилі (рис. 2.22.б).

Поляризація подовжніх звукових хвиль у повітрі у будь-яких умовах неможлива.

Спеціальні відомості про поляризацію звуку у твердих середовищах, засновані на власних дослідженнях автора, див. в монографії «На шляху до наукових відкриттів», частина 5, глави 5.1-5.7. Саме в цій книзі ми приділяємо увагу цьому питанню в частині 3.

2.5.17. *Реверберація, луна - (багаторазові відбиття).* Практичним наслідком поширення звуку і світла в відносно складних умовах є їхні багаторазові відбиття. Врахування їх у математичних моделях поширення звуку і світла ускладнене; зневажити цим явищем, - (на відміну від інших, менш істотних), - неможливо, тому що вони в істотній мері визначають якість досліджуваного

приміщення. Багаторазове відбиття звуку має спеціальну назву – реверберація (від лат. *reverberatio* - відбиття, від лат. *reverbero* - відкидаю), процес поступового загасання звуку в закритих приміщеннях після вимикання його джерела [120, 121]. Повітряний обсяг приміщення являє собою коливальну систему з дуже більшим числом власних частот. Кожне із власних коливань характеризується своїм коефіцієнтом загасання, що залежить від поглинання звуку при його відбитті від обмежуючих поверхонь і при його поширенні. Тому збуджені джерелом власні коливання різних частот загасають неодноразово. Реверберація значно впливає на чутність мови й музики в приміщенні, тому що слухачі сприймають прямий звук на тлі раніше збуджених коливань повітряного обсягу, спектри яких змінюються в часі в результаті поступового загасання складових власних коливань. Вплив реверберації тим більше значний, чим повільніше вони загасають. У приміщеннях, розміри яких великі в порівнянні з довжинами хвиль, спектр власних коливань можна вважати безперервним і представляти реверберацію як результат додавання прямого звуку й ряду запізнілих й убутних по амплітуді його повторень, обумовлених відбиттям від обмежуючих поверхонь.

Тривалість реверберації характеризується так званим часом реверберації, тобто часом, протягом якого інтенсивність звуку зменшується в 10^6 разів, а його рівень на 60 дБ. Час реверберації - найважливіший фактор, що визначає акустичну якість приміщення (див. в главі 5). Він тим більший, чим більше обсяг приміщення (або час вільного пробігу звуку) і чим менше поглинання на обмежуючих поверхнях.

2.5.18. *Резонанс* (франц. *resonance*, від лат. *resono* - відгукуюся), різке зростання амплітуди сталих змушених коливань при наближенні частоти зовнішнього

гармонійного впливу до частоти одного з власних коливань системи.

При певних значеннях амплітуди сили, що збудує, яка відноситься до одиниці маси системи, і коефіцієнта загасання, амплітуда змушених коливань є функцією тільки кутової частоти ω сили, що збудує. При наявності деякої характерної для даної системи частоті $\omega = \omega_{\text{резонансу}}$ амплітуда досягає максимального значення. Явище різкого зростання амплітуди змушених коливань Y при частотах сили, що збудує, близьких до $\omega_{\text{резонансу}}$, називається резонансом. Величина $\omega_{\text{резонансу}}$ називається резонансною циклічною частотою.

В акустиці і радіотехніці явище резонансу корисне. Однак у більшості механічних пристроїв воно має негативну роль. У ряді випадків резонанс може привести до руйнування механізмів, що витримують змушені коливання. Для запобігання резонансу необхідно усувати періодично діючу силу чи добиватись великої різниці між власною частотою коливань пристрою і частотою сили, що збудує.

2.5.19. *Рефракція хвиль.* Рефракція - скривлення напрямку поширення хвиль у середовищі, швидкість хвиль у якому є безупинною функцією координат. Рефракція звуку в атмосфері обумовлена просторовими змінами температури повітря, швидкості і напрямки вітру. Оскільки швидкість вітру змінюється з висотою, а швидкість поширення звуку дорівнює векторній сумі швидкості звуку в нерухомому середовищі і швидкості вітру, траєкторії звукових променів мають вид:

- вигнутих униз кривих при поширенні їх у напрямку вітру;

- вигнутих нагору кривих при поширенні проти вітру, причому виникає зона звукової тіні.

Оскільки швидкість звуку залежить від температури, на

поширення звуку також впливає зміна температури при зміні висоти. Згідно [122], результати впливу градієнтів температури і швидкості вітру взаємно доповнюються. Також згідно [123, 124] вплив турбулентності атмосфери збільшується майже в лінійній залежності від відстані пропорційно квадратному кореню з частоти f звуку.

2.5.20. Розсіювання хвиль. Розсіювання - явище, що спостерігається при їхньому поширенні в середовищі з безладно розподіленими неоднорідностями і таке, що полягає в утворенні вторинних хвиль, що поширюються по можливих напрямках, слабшаючи в середовищі.

Коли звукові хвилі попадають на великі плоскі перешкоди (з радіусом кривизни більшим аніж λ), вони відбиваються, якщо перешкода мала в порівнянні з λ , відбувається їхнє розсіювання. Можливо дифузійне розсіювання звуку на невеликих перешкодах, що самі по собі не утворюють яскраво виражену звукову тінь, однак розсіюють частину звукової енергії в різних напрямках (наприклад, зниження шуму зеленими насадженнями й ін.).

2.5.21. Самофокусування. Відоме явище самофокусування звукових хвиль, що полягає в зменшенні розходження чи збільшенні збіжності променів через появу поперечного градієнта нелінійного показника переломлення і виникнення нелінійного хвилеводу, що зменшує світіння пучка при порівняно великій потужності випромінювання [59, с. - 322-323].

2.5.22. Спад інтенсивності випромінювання у вільному просторі.

Безумовно, при розповсюдженні звукової хвилі її фронт безперервно поширюється з віддаленням від джерела. Докладно це було нами досліджено в роботах [125, 126]. Із збільшенням площі фронту, звісно, енергія розподіляється по його поверхні, і на кожному одиницю площі хвильового фронту припадає менше значення інтенсивності. Тут ми не

станемо повторювати специфічні викладки [125, 126], надаємо тільки узагальнені дані на підставі загально визнаних літературних джерел [97, 127, 128].

Таблиця 2.1.

Абсолютні та відносні логарифмічні залежності зменшення енергії звукової хвилі з відстанню

Тип хвиль (в залежності від типу джерела)	Щільність енергії (згідно [97])	Рівень звукового тиску згідно [127, 128]
Сферичні хвилі (точкове джерело звуку)	$\varepsilon \sim I / r^2$, Дж/м ³	$L = L_0 - 20 \lg \frac{r}{r_0}$, дБ
Кругові хвилі (лінійне джерело звуку)	$\varepsilon \sim I / r$, Дж/м ³	$L = L_0 - 10 \lg \frac{r}{r_0}$, дБ

Тут r - відстань від місця порушення хвилі, м; L - шуканий рівень звукового тиску, дБ на відстані r , м від ДШ; L_0 - відомий рівень звукового тиску, дБ на відстані r_0 , м від того ж ДШ.

Аналогові моделі процесів розповсюдження звуку за рахунок заміни його світлом, що застосовують еквівалентність звуку і світла, основані на визнанні відомого факту, що при збільшенні відстані від точкового джерела оптичного випромінювання освітленість E , лк убуває пропорційно квадрату відстані [129]: (тобто має місця аналогічні залежності спаду інтенсивності):

$$E = \frac{I \cdot \cos \varphi}{r^2}, \text{ лк,}$$

де I і φ - відповідно сила світла, кд і кут падіння; r - відстань, м.

2.5.23. *Суперпозиції принцип*, принцип накладення: допущення, відповідно до якого, якщо складові складного

процесу впливу взаємно не впливають одне на одного, те результуючий ефект буде являти собою суму ефектів, викликуваних кожним впливом окремо. Цей принцип строго застосовувався до систем, поведження яких описується лінійними співвідношеннями (так називані лінійні системи). Наприклад, якщо середовище, у якому поширюється хвиля, лінійне, (тобто його властивості не міняються під дією збурювань, створюваних хвилею), те всі ефекти, викликувані негармонійною хвилею, можуть бути визначені як сума ефектів, створюваних кожною з її гармонійних складових: $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$

Із принципу суперпозиції випливає, що будь-яка хвильова функція може бути розкладена в (загалом кажучи, нескінченну) суму власних функцій оператора будь-якої фізичної величини; при цьому квадрати модулів коефіцієнтів при розкладанні мають сенс ймовірностей виявити на досвіді відповідні значення цієї величини. Суперпозиція станів ψ_i визначається, однак, не тільки модулями коефіцієнтів c_i , але і їхніми відносними фазами (при різних відносних фазах чисел c_i , результуючі стани виявляються різними). Тому суперпозиція $\psi = \sum_i c_i \psi_i$ є результатом інтерференції станів ψ_i .

2.5.24. *Ферма принцип*: (вперше сформульований для світла, але діє стосовно усіх інших типів хвиль, у т.ч. звукових) – звук поширюється з однієї точки середовища в іншу за шляхом, задля проходження якого затрачається найменший час. Цей принцип впливає із принципу Гюйгенса в граничному випадку нескінченно малої довжини хвилі звуку. Він є найбільш загальним принципом геометричної акустики. Всі її закони можуть бути отримані із принципу Ферма.

Математичне вираження принципу Ферма має вигляд:

$$\delta \int_A^B ds = 0,$$

де A та B — точки, між якими поширюється звук, величина $ds = n dl$ називається елементом акустичної довжини шляху s , dl — елемент (геометричної) довжини шляху між точками A та B , $n = n(x, y, z)$ - абсолютний показник переломлення середовища, символ δ означає варіацію інтеграла. Якщо показник переломлення середовища n змінюється в просторі безупинно, тоді акустична довжина шляху, пройденого світлом від точки A до точки B , буде менше будь-якої іншої кривої, що з'єднує ці точки.

2.5.25. *Фокусування звукових хвиль* – перетворення плоских чи розбіжних звукових хвиль [130] у такі, у що сходяться: (при цьому відбувається концентрація звукових хвиль за допомогою акустичних лінз, концентраторів, і ін.) Прикладом таких пристроїв може служити, зокрема, [131];

2.5.26. *Хвилевід в середовищі розповсюдження*. Канал, що має різкі границі, уздовж якого поширюються звукові хвилі. Приклади – переговорна труба на судах, шари повітря в атмосфері чи води в океані, що відрізняються за температурою.

2.6. Врахування особливостей розповсюдження звуку трьома принципово різними теоріями акустики

Як говориться в роботі [133], «...*В настоящее время не существует единой теории, объясняющей все акустические процессы в помещениях...*». Все різноманіття акустичних теорій, що надають математичний опис явищам, притаманним процесам генерації та розповсюдження звуку, можна звести до трьох груп: (рис. 2.23)

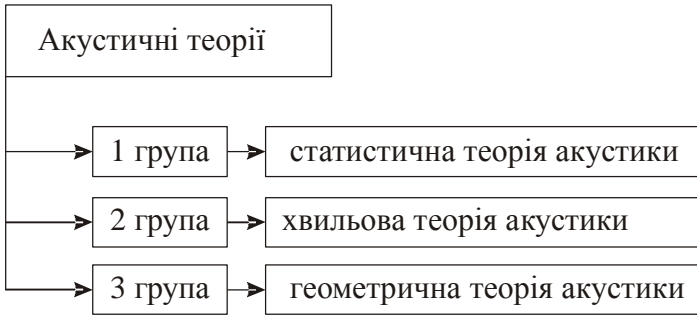


Рис. 2.23. «Три основні теорії акустики» згідно за [133]. Усіляка локальна акустична теорія будь-якого автора (при спробі її класифікації) незмінно попадає в одну з перелічених груп.

Кожна з них має свою галузь застосування, кожна придатна для вирішення свого кола питань та має свою галузь застосування.

2.6.1. Статистична теорія акустики

У статистичній теорії акустичні процеси в приміщенні розглядаються як поступовий спад енергії багаторазово відбитих перешкодами приміщення хвиль. Цей спад відбувається після припинення дії джерела звуку. Ідеалізуючи, вважають цей процес у першому наближенні безперервним. Тоді його можна зобразити в лінійному масштабі експонентою (рис. 2.24.а), а в напівлогарифмічному масштабі - прямою (рис 2.24.б). Тут, тобто на обидва графіках рис. 2.24: T – тривалість цього процесу (тривалість часу реверберації), s ; t – час, s ; N – кількість багаторазових відбиттів звуку.

Передумовою до такого розгляду є виконання двох умов: всі напрямки руху хвиль мають рівну імовірність, а щільність звукової енергії у кожній точці простору приміщення однакова.

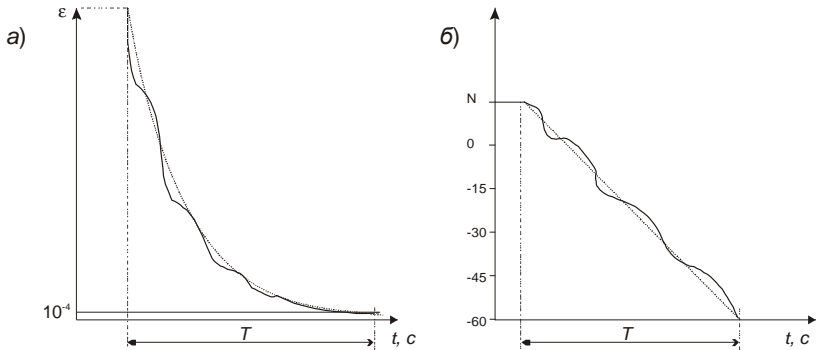


Рис. 2.24. Процес спаду звукової енергії в лінійному (а) та в напівлогарифмічному (б) масштабі.

В архітектурній акустиці, наприклад, більша увага приділяється не стаціонарному процесу (процесу сталих коливань), а перехідному (нестаціонарному). Такий нестаціонарний процес починається після припинення дії ДШ, та полягає в поступовому спаді звучання внаслідок втрат звукової енергії й називається відзвуком, або реверберацією. (Про реверберацію докладніше – в гл. 5).

Статистична теорія займається саме цією частиною відзвуку імпульсів у часі із щільністю, що підвищується, й зменшенням їхньої енергії. Прямий звук і початкові (порівняно рідкі відбиття) статистичною теорією не приймаються в увагу.

Обмеження на використання розрахунків, заснованих на статистичній теорії, надаються по діапазону частот й обсягам приміщень. Звичайно акустичні розрахунки проводяться для інтервалу, обмеженого частотами 100-4000 Гц. Причина обмеження по верхніх частотах викладена далі та стосується істотного впливу атмосферних явищ на акустичні розрахунки (поглинання звуку в повітрі в залежності от вологості повітря). На частотах більше 4 кГц у приміщеннях великого обсягу важко розділити складові поглинання, обумовлені

матеріалами й повітрям. Тому достовірні дані про коефіцієнти поглинання матеріалів на більш високих частотах відсутні. Так само важко, якщо не неможливо зовсім, одержати достовірні дані про коефіцієнти поглинання на частотах нижче 100 Гц. Лінійні розміри зразків матеріалів повинні бути, принаймні, порівнянні з довжиною хвилі. Для частоти 100 Гц це 3,4 м. Очевидно, що зразки настільки значних розмірів не можна розмістити у звукомірних камерах, і про їхні властивості на нижніх частотах можна судити лише приблизно. Нижня межа застосування статистичних методів по обсягу приміщення обумовлена тим, що при розмірах перешкод, порівнянних з довжиною хвиль, неможливо користуватися поняттям «відбиття хвиль».

Задля оцінки нижньої границі по обсягу користуються співвідношенням

$$\sqrt[3]{V} \geq N \lambda,$$

де V – обсяг приміщення, м^3 ; λ – довжина хвилі, м.

Має місце обмеження застосовності статистичних методів у приміщеннях великого обсягу. Передумови статистичної теорії тим ближче до дійсності, чим більша кількість відбиттів перетерплює звукова енергія в міру загасання. Звідси треба, що положення статистичної теорії були не застосовні до великих приміщень і до приміщень із більшим середнім коефіцієнтом поглинання. В обох випадках кількість відбиттів виявляється занадто малою. Статистична теорія не розглядає співвідношення між енергією прямого й дифузійного звуку, енергію початкових, порівняно рідких відбиттів, спрямовані потоки енергії, фокусування звуку. Сфера її розгляду – досить щільний часовий ряд відбиттів, що створює зливу послідовність запізнілих звуків. Її висновки тим точніше, ніж далі перебуває точка спостереження від точки

розташування джерела звуку. Статистична теорія має ряд уразливих місць. Деякі її положення не знаходять підтвердження в повсякденній практиці, розходяться з нею. Вона не пояснює акустичних процесів на дуже низьких й дуже високих звукових частотах, у невеликих і дуже більших приміщеннях, у приміщеннях з різкою перевагою якогось лінійного розміру, з нерівномірним розподілом звуковбирних матеріалів. Але вона є потужним і діючим інструментом дослідження й проектування приміщень, оскільки дає числові значення параметрів, що характеризують акустику тих приміщень. Важливо знати її сильні й слабкі сторони, з розумінням й обережністю застосовувати розрахункові формули й на цій основі усвідомлено користуватися її досягненнями.

2.6.2. Хвильова теорія акустики

У статистичній теорії відзвук розглядається як загасання послідовного ряду відбитих звукових імпульсів, випромєнених джерелом звуку. Мається на увазі, що форма імпульсів, отже, і їхній спектр, задані ДШ, при відбиттях залишаються незмінними. Таке подання викликало сумніви принципового характеру: адже замкнутий повітряний обсяг приміщення, якщо його розміри порівнянні з λ і або більше неї, варто розглядати як коливальну систему з розподіленими параметрами, що має спектр власних (резонансних) частот. Після припинення дії джерела звуку, що підтримує змушені коливання повітря в приміщенні, у системі відбуваються тільки власні коливання, вони загасають у міру поглинання енергії. У явищі реверберації немає місця залишковому коливальному процесу, нав'язаному раніше дією зовнішньої сили, що змушує; відзвук є власне загасаюче коливання повітряного обсягу із частотами, що залежать від розмірів і форми приміщення. Значить, суттю реверберації є не багаторазові відбиття, а поступово

загасаючі власні коливання об'ємного резонатора, що не залежать від зовнішніх впливів?

Такий погляд покладений в основу хвильової теорії акустичних процесів в приміщенні. Хвильова теорія заснована на аналізі дії об'ємних електромагнітних резонаторів. Дійсно, в обох теоріях є багато загального, включаючи розрахункові співвідношення. Однак хвильову теорію почали розробляти ще в середині минулого століття, значно раніше статистичної. Але в її розробці просунулися менше, ніж в статистичній. Лорд Релей створив основи хвильової теорії (1877 р.), привів необхідний математичний апарат, причому з посиланням на рішення хвильового рівняння для тривимірного простору, даного Дюамелем (Duhamel) у 1849 р. Дюамель вивів вираження для власного періоду $1/f_0$ об'ємного резонатора у формі прямокутного паралелепіпеда, у якому довжина хвилі

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0} = 2\sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2},$$

звідки

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}.$$

У наведених вираженнях l, b, h - лінійні розміри, p, q, n - будь-які цілі числа (рис. 2.25).

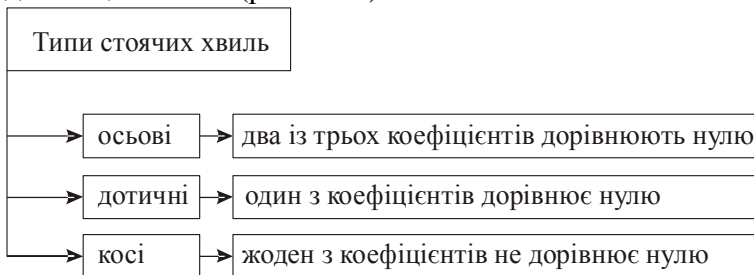


Рис. 2.25. Класифікація типів стоячих хвиль залежно від значень

коефіцієнтів p , q , n .

Осьові хвилі відбиваються тільки від однієї пари протилежних паралельних перешкод (стін), дотичні - від двох пар (тобто встановлюються в площині, паралельній третій парі перешкод), косі - від всіх пар перешкод. Для багатьох матеріалів коефіцієнти поглинання залежать від кута падіння хвилі на перешкоду. У зв'язку із цим хвилі різних типів загасають із різною швидкістю. Загасання виходить найбільшим для косих хвиль і найменшим для осьових. Тому, коли джерело звуку збуджує коливання різних типів, те різні власні коливання, навіть із близькими частотами, будуть загасати з неоднаковою швидкістю. У результаті крива спаду інтенсивності звуку не буде мати регулярного виду, що пропонується статистичною теорією. Крутість спаду рівня на різних стадіях відзвуку буде різною, (і тоді, наприклад, губиться певний зміст самого поняття часу реверберації). Процес спаду буде складатися з різних локальних процесів – і, значить, не буде зображуватися експонентною кривою (як це було зображено на рис. 2.24.а, а буде відповідати їй лише в середньому. На нього будуть накладатися невеликі флуктуації. Практика показує, що наявність малих флуктуацій сприятливо позначається на оцінці якості звучання. Тому значення статистичної теорії не тільки не знижується, а, навпаки, здобуває нову опору у висновках хвильової теорії. Отже, у статистичній теорії хід спаду інтенсивності розраховується методами теорії імовірності, "у середньому", а флуктуації фактичного спаду щодо усередненої форми визначаються методами хвильової теорії.

З хвильової теорії випливає, що приміщення простої правильної геометричної форми менш задовольняють умові дифузійності поля, аніж приміщення складної геометричної форми з непаралельними стінами, косо

поставленими площинами або опуклими поверхнями, поглибленнями у вигляді кесонів. Зрозуміло, лінійні розміри цих поверхонь повинні бути порівнянні з довжиною хвилі або бути більше її.

На нижніх частотах резонанси впливають через значні проміжки й повинні привести до помітної зміни спектра відзвуку в порівнянні зі спектром вихідного звучання, отже, до зміни тембру відзвуку. Тим часом, повсякденний досвід переконує нас у зворотному. Як пояснити це протиріччя? Пояснення зводиться до наступного. У тій області частот, де резонансні частоти розташовані рідко, відповідні частотні складові в спектрі мовних і музичних сигналів майже не зустрічаються. Реальне значення могли б мати, наприклад, 13 й 14 частоти, але інтенсивність резонансних коливань настільки більших номерів невелика, тому помітної зміни тембру відзвуку не відбудеться. Зі збільшенням частоти щільність резонансних частот швидко зростає. Так, в області октавної смуги із середньгеометричною частотою $f = 500$ Гц на 1 Гц смуги частот мають приблизно 10 резонансних частот. У зв'язку із цим у приміщеннях великого обсягу, якими є концертні й театральні зали, погіршення звучання не відбувається. Але інше положення складається в приміщеннях невеликого обсягу, наприклад у мовних (дикторських) студіях і житлових кімнатах. Відомі скарги дикторів, що їхній голос у мовних студіях звучить зовсім незвичайно, неприємно, відчувається "бубніння". Порозумівається це тим, що в приміщеннях невеликого обсягу основна резонансна частота попадає в область добре чутних звуків. Для боротьби із цим неприємним явищем доводиться або значно зменшувати час реверберації шляхом використання в студії ефективно поглинаючих матеріалів, або обмежувати смугу пропущення електричного тракту звукосприймальних

(звуковідтворюючих) пристроїв нижче 250-300 Гц. "Бубніння" властиво й багатьом житловим кімнатам. Усунути цей недолік майже неможливо, тому що немає дешевих матеріалів, які ефективно поглинають звукову енергію в області 100 Гц і нижче. Особливо виражені резонанси в приміщеннях зі співпадаючими лінійними розмірами. У цьому випадку збігаються резонансні частоти, обумовлені стоячими хвилями в різних площинах. Найгіршим в акустичному відношенні є приміщення кубічної форми, найкращим - приміщення, пропорції якого наближаються до "золотого перетину". Висновок, зроблений акустиками стародавності, знайшов підтвердження у висновках хвильової теорії.

Хвильова теорія дала відповідь на питання, що має практичне значення при спорудженні різних залів й аудиторій: чому звуковбирні матеріали, коефіцієнти поглинання яких визначені у звукомірній камері, поведуться в приміщенні іншим способом, начебто їхні коефіцієнти поглинання відрізняються від обмірюваних і зазначених в довідниках. Справа в тому, що звукомірній камері матеріал, як правило, досліджують у дифузійному полі. Коефіцієнт поглинання визначається усередненням по всіх кутах падіння звукових хвиль, інтегрально. Але коефіцієнт поглинання багатьох матеріалів залежить від кута падіння хвилі. Тому поглинання матеріалу в залі навіть на близьких частотах буде залежати від типу хвилі - осьового, дотичного, косоного. А від типу хвилі, що утворюється, залежать кути, під якими хвилі падають на перешкоду. Для більшості пористих матеріалів коефіцієнт поглинання росте зі збільшенням кута падіння за законом $\alpha(\theta) = \alpha(0)/\cos(\theta)$, де $\alpha(0)$ - коефіцієнт поглинання при нормальному (перпендикулярному) падінні, а θ - кут між нормаллю й напрямком падаючої на перешкоду хвилі. Але при наближенні θ до 90° α різко зменшується в результаті

ковзання хвилі уздовж перешкоди (рис. 2.26). Тому в приміщенні матеріал поводить інакше, чим у звукомірній камері.

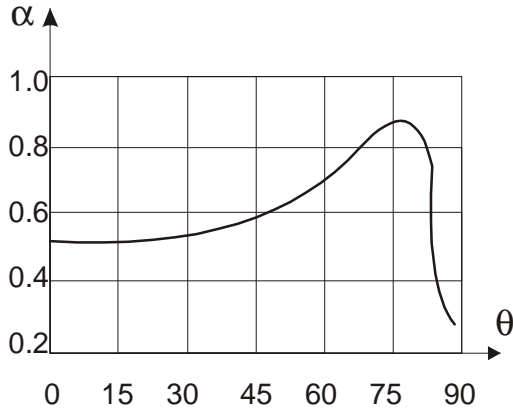


Рис. 2.26. Залежність коефіцієнта поглинання α пористого матеріалу від кута падіння звукової хвилі

Крім того, через нестаціонарність звукового поля α залежить не тільки від властивостей матеріалу перешкоди, але й від загального поглинання приміщення $A = \alpha_{\theta}S$. Тому коефіцієнт поглинання того самого матеріалу в різних приміщеннях може відрізнитися в 1,5-2 рази. Правда, з огляду на, що оптимум часу реверберації - поняття не зовсім визначене й що розрахунки часу реверберації в силу висловлених раніше причин носять наближений характер, з такими тонкостями поводження звуковбирних матеріалів найчастіше не вважаються

При всій різниці в підходах до пояснення акустичних процесів у приміщеннях статистична й хвильова теорії доповнюють одна одну й тому у відомій мері працюють на практику спільно. Принципове розходження підходів до пояснення акустичних процесів полягає в тім, що в одному випадку процес відзвуку розглядається за допомогою теорії ймовірностей усереднено, а в іншому із хвильових

позицій визначаються відхилення фактичного ходу з від "середнього".

2.6.3. Геометрична теорія акустики

Відомо, що при зменшенні довжини хвилі хвильові закони наближаються до законів геометричної оптики. Так само в приміщеннях, розміри яких досить великі в порівнянні з довжиною хвилі, можна користуватися законами геометричної оптики, трасувати шляхи звукових променів, знаходити точки фокусів, визначати запізнювання початкових відбиттів, тобто використати весь арсенал геометричної теорії.

Геометрична (інакше названа - променева) теорія акустичних процесів у приміщеннях заснована на законах геометричної оптики. Рух звукових хвиль розглядають подібно руху світлових променів. Відповідно до законів геометричної оптики при відбитті від дзеркальних поверхонь кут відбиття дорівнює куту падіння; той, що падає, й відбитий промені лежать в одній площині. Це справедливо, якщо розміри поверхонь, що відбивають, багато більше λ , а розміри нерівностей поверхонь багато менше λ .

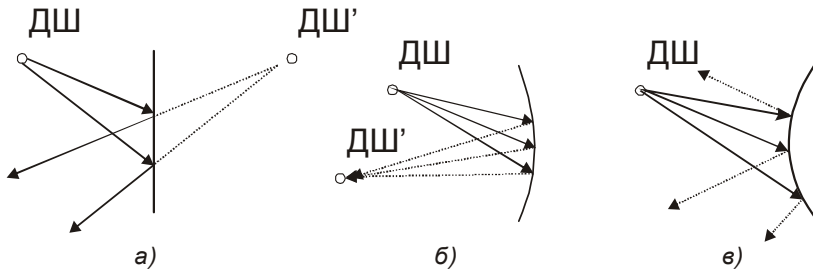


Рис. 2.27. Три випадки відбиття звуку від поверхонь різної конфігурації.

Характер відбиття залежить від форми поверхні, що відбиває. При відбитті від плоскої поверхні (рис. 2.27.а) виникає мнине джерело ДШ', місце якого відчувається на слух подібно тому, як око бачить мнине джерело світла в

дзеркалі. Відбиття від увігнутої поверхні (рис. 2.27.б) приводить до фокусування променів у точці ДШ'. Опуклі поверхні (колони, пілястри, великі ліпні прикраси, люстри в приміщенні) розсіюють звук (рис. 2.27.в).

Три розглянуті теорії з різних сторін пояснюють акустичні процеси, що відбуваються в приміщеннях. З них тільки одна - статистична - дозволяє визначити чисельно важливу величину, що характеризує акустичні властивості приміщення - час реверберації. Треба лише свідомо, критично ставитися до одержуваної числової оцінки, розуміти, що в більшості випадків, особливо при розгляді великих приміщень, вона носить орієнтовний характер.

По сучасних поглядах прийнято розділяти процес відзвуку, реверберації на дві частини: початкові, порівняно рідкі запізнілі імпульси, і більшу послідовність імпульсів, що ущільнюються в часі. Першу частину відзвуку оцінюють із позицій геометричної (променевої) теорії, другу - з позицій статистичної теорії.

Геометрична теорія більше застосовна до аналізу акустичних процесів у приміщеннях більших розмірів - концертних і театральних залах, великих студіях. Оптимальні розміри залу (студії) визначають на основі аналізу початкових відбиттів. При проектуванні більших приміщень розрахунок часу реверберації може дати результат, що значно відрізняється від реального, і головне - ця величина не дозволяє повністю оцінити акустичну якість приміщення. У такій оцінці головну роль грають початкові відбиття. Правильне тимчасове співвідношення початкових відбиттів забезпечує високу якість звучання навіть тоді, коли час реверберації відрізняється від оптимального.

Статистична й хвильова теорії особливо застосовні до приміщень порівняно малих розмірів, наприклад до студій звукового віщання й аудиторій різного призначення.

Результати цих теорій як би доповнюють один одного. Перша дає можливість оцінити час реверберації, друга - розрахувати спектр власних (резонансних) частот, скорегувати розміри приміщення так, щоб спектр власних частот в області нижніх частот був більше рівномірним.

Було б дуже цікаво й важливо об'єднати положення акустичних теорій, створити єдину теорію, що пояснює із загальних позицій складні акустичні процеси, що протікають у приміщеннях різного призначення, різної форми й різних розмірів. Але поки це не досягнуто, залишається свідомо використати існуючі теорії й домагатися з їхньою допомогою найкращих рішень.

ЧАСТИНА 3. ЗАХОДИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РІВНІВ ШУМУ

Загальна класифікація методів і засобів захисту від шуму, застосовуваних при рішенні задач охорони праці, відповідно до якої вони підрозділяються на активні і пасивні, (що, відповідно, потребують (або не потребують) додаткових витрат енергії); колективні й індивідуальні; на методи боротьби із шумом на шляху його поширення і в джерелі його виникнення, - приведена в [15].

Захист від шуму повинен досягатися шляхом створення шумобезпечної техніки (ГОСТ 12.1.003-83), застосування методів і засобів колективного захисту (ГОСТ 12.1.029-80), індивідуального захисту, використання архітектурно-планувальних методів.

Розробка заходів щодо боротьби з шумом повинна починатися на стадії проектування технологічних процесів і машин, оптимізації планувальних схем розміщення ДШ в селитьбі та промислових зонах; опрацювання генерального плану міста.

Методи і засоби захисту від шуму поділяються на методи і засоби колективного та індивідуального захисту.

Методи і засоби колективного захисту, в свою чергу, розподіляються на такі, що знижують шум у джерелі його виникнення, і такі, що сприяють зниженню шуму під час його поширення. Перші з них найбільш ефективні та економічні. Вони спрямовані на зменшення шуму вібраційного (механічного), аеродинамічного та електромагнітного походження. Другі залежно від способу реалізації поділяються на організаційно-технічні, архітектурно-планувальні і акустичні. Останні засоби, в свою чергу, поділяються на засоби звукоізоляції, звукопоглинання, віброізоляції, демпфування і глушителя шуму.

Згідно з ГОСТ 12.1.029-80 засоби індивідуального

захисту залежно від конструктивного виконання поділяються на протишумні навушники, протишумні вкладиші, шоломи та каски, костюми.

3.1. Колективні засоби боротьби з шумом

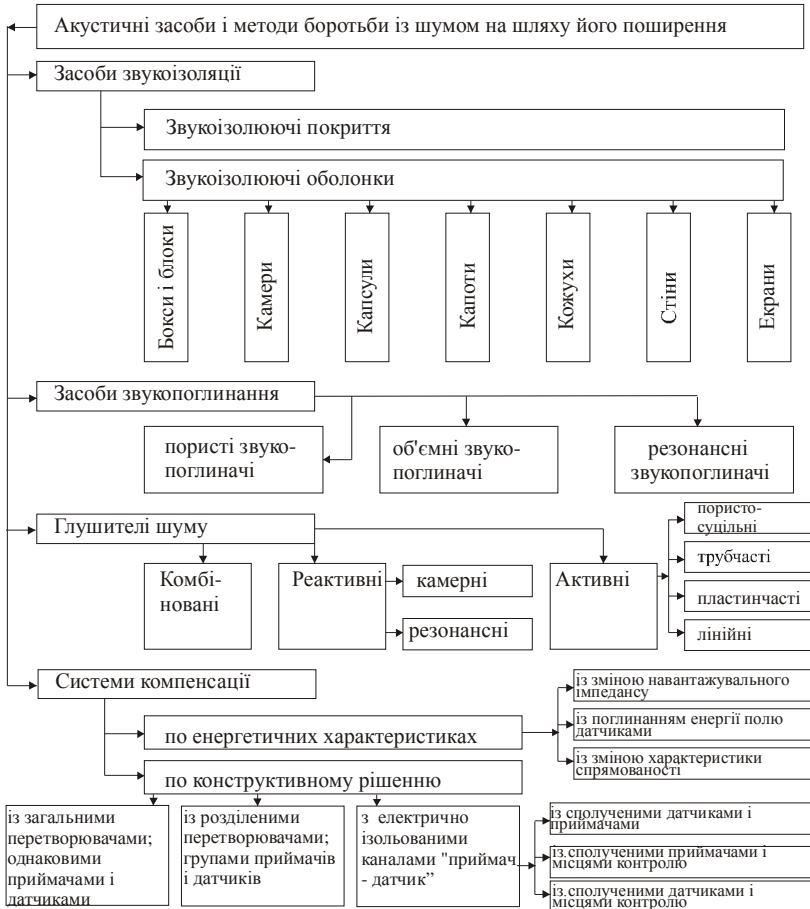


Рис. 3.1. Класифікація акустичних засобів колективного захисту від шуму на шляху його поширення в залежності від способу реалізації відповідно до класифікації ГОСТ 12.1.029-80

Зменшення шуму в джерелі його виникнення можливе завдяки якісному монтажу технологічного устаткування і машин, їх правильній експлуатації [134]. Зокрема, планово-запобіжні ремонти повинні включати усунення розбалансування деталей, перекосів у частинах, які пересуваються. Зниження шуму у джерелі можна досягти, застосувавши технологічні процеси та устаткування, які не створюють надмірного шуму. Зокрема, ефективні: електрофізичні методи металообробки; створення нероз'ємних з'єднань за допомогою зварювання, склеювання, а також з використанням безударних спеціальних заклепок; профільне шліфування; застосування гідравлічного приводу замість пневматичного. Відомо, що зменшити шум на 5-10 дБ можливо, усунувши зазори у зубчатих з'єднаннях та з'єднаннях деталей з підшипниками, використавши пластмасові деталі замість металевих. Однак не завжди можливо зменшити шум у джерелі його виникнення, і тоді застосовують інші заходи боротьби з ним.

Докладно питання принципової обмеженості застосування заходів зменшення шуму в джерелі його виникнення розглянуто на с. 47-48 [135].

Організаційно-технічні методи колективного захисту від шуму згідно з ГОСТ 12.1.029-80 включають застосування малошумних технологічних процесів, оснащення машин засобами дистанційного управління та автоматичного контролю, використання малошумних машин, зміни конструктивних елементів машин, своєчасне проведення ремонту та обслуговування машин й обладнання, а в шумних цехах - організацію раціональних режимів праці й відпочинку робітників.

На підприємствах зони випромінювання звуку з рівнями вище 85 дБА повинні позначатися знаками безпеки й працюючі в цих зонах повинні бути забезпечені засобами

індивідуального захисту. Забороняється навіть короткочасне перебування в зонах зі звуковим тиском більше 135 дБ у будь-якій смузі частот.

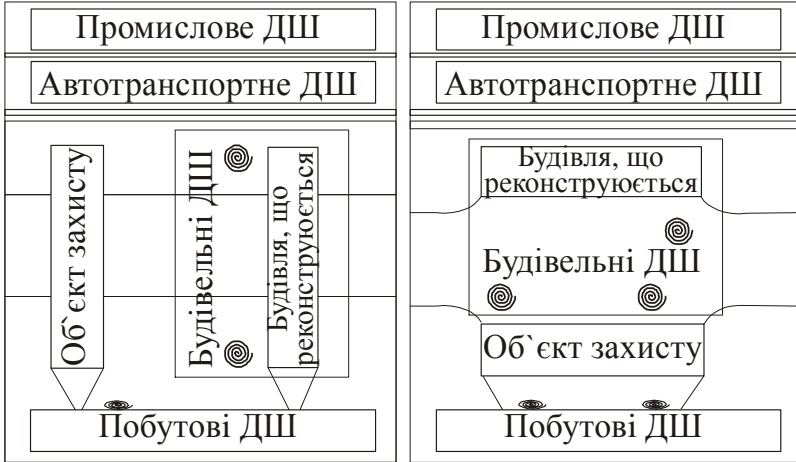
Архітектурно-планувальні методи базуються на реалізації раціональних акустичних рішень щодо: планування будівель і опрацювання генеральних планів; розміщення технологічного устаткування, машин та механізмів, а також робочих місць на промислових підприємствах; планування зон і режиму руху транспорту.

Всі джерела шуму в містах можна умовно розділити на промислові, транспортні, побутові й будівельні [137 - 141].

Складаючи генеральний план, слід уникати розміщення об'єктів, які потребують захисту від шуму (адміністративні приміщення, лабораторії, конструкторські бюро, медпункти), у безпосередній близькості від джерел шуму. При розміщенні заводу в межах міста найбільш шумні цехи повинні перебувати в глибині підприємства, по можливості якомога далі від селитьби. Відстань у 100 м між шумними й тихими цехами, як правило, забезпечує потрібне зниження шуму [136]. Причиною шуму в цехах є як внутрішні, так і зовнішні джерела. Внутрішніми джерелами шуму можна вважати інженерне, технологічне та санітарно-технічне обладнання, зовнішніми - обладнання сусіднього цеху, рух транспорту тощо.

На рис. 3.1, згідно за [40], наведені деякі з можливих варіантів взаємного розташування ДШ й об'єктів захисту. Вони виникають у реальних міських умовах при будівництві, реконструкції, ремонті й демонтажі будинків й споруд в умовах сформованої міської забудови. Тут же представлені варіанти взаємного розташування позначеного ДШ стосовно інших ДШ (транспортних, промислових, побутових й будівельних), зроблена спроба простежити внесок у загальну складову шумового режиму на прилягаючих територіях у залежності до планувальних

рішень.




Умовні позначення:  Будівельні ДШ  Побутові ДШ



Рис. 3.2. Варіанти взаємного розміщення джерел шуму й об'єктів захисту, що виникають у реальних міських умовах при реконструкції, ремонті й демонтажі будинків і споруд (власні авторські пропозиції відповідно [40]).

Шляхи передавання шуму в ізольовані приміщення можуть бути розподілені на прямі й непрямі. Повітряний або ударний шум поширюється в конструкціях всього будинку. Звукова хвиля, що падає, - яка створюється повітряним шумом, - змушує загородження коливатися, в результаті чого вже саме загородження стає джерелом шуму в сусідньому приміщенні. Ефективність шумозменшення в даному випадку залежить від звукоізолюючої здатності загороджень - властивості конструкції, що відбиває, ослаблювати звукову енергію, що проходить крізь загородження у приміщення, яке захищається від шуму [142].

Звукоізоляція конструкцій будинків, що обгороджують, являє собою ослаблення звуку при його проникненні через огороження будинків; у більш широкому змісті це - сукупність заходів щодо зниження рівня шуму, що проникає в приміщення ззовні. Кількісна міра звукоізоляції конструкцій, що обгороджують, що виражається в децибелах, називається звукоізолюючою здатністю.

«Всякое ограждение характеризуется величиной звукоизолирующей способности R » [118, с. 58], що зв'язується з коефіцієнтом пропускання τ таким чином:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}, \text{ дБ.} \quad (3.1)$$

Якщо, наприклад, перешкода послабляє проникаючий через неї звук у 100 разів ($I_{\text{пропущення}} / I_{\text{надійня}} = 1/100$), то її $\tau = 0,01$; а звукоізолююча здатність $R = 10 \lg 100 = 20$ дБ.

Розрізняють звукоізоляцію від повітряного й ударного звуків [143].

Вивчає закономірності зменшення шуму в будівлях

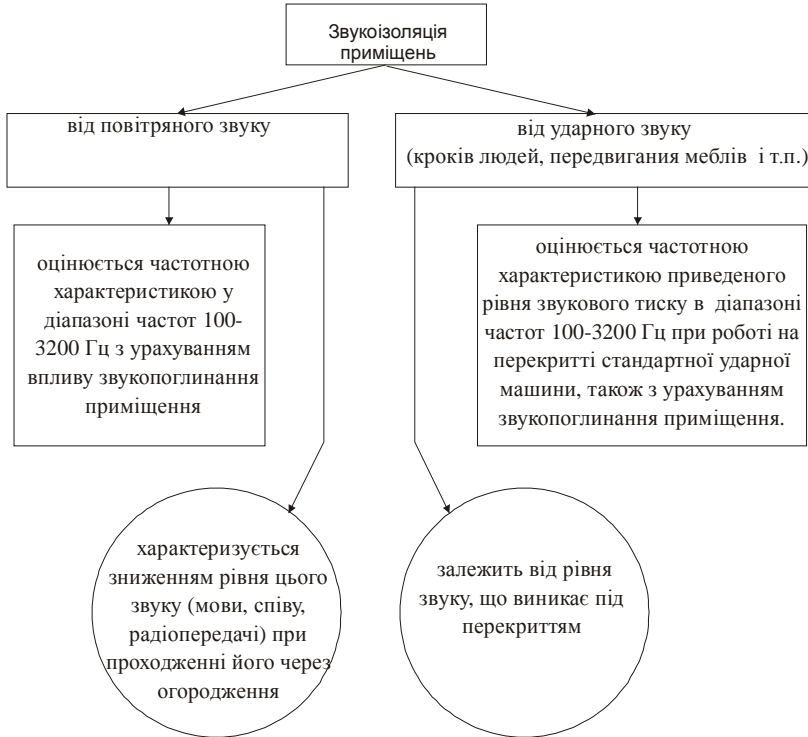
така наука, як будівельна акустика² (В виносці надається дещо скорочена цитата з [144] на мові оригіналу).

Внутрішні стіни і перегородки будинків повинні володіти нормативною звукоізолюючою здатністю від повітряного звуку; міжповерхові перекриття – як від повітряного так й від ударного звуків.

² «Строительная акустика, научная дисциплина, изучающая вопросы защиты помещений, зданий и территорий населённых мест от шума архитектурно-планировочными и строительно-акустическими (конструктивными) методами. С. а. рассматривают и как отрасль прикладной акустики, и как раздел строительной физики. К архитектурно-планировочным методам С. а. относятся: рациональные (с точки зрения защиты от шума) объёмно-планировочные решения зданий и помещений; удаление источников шума от защищаемых объектов; оптимальная планировка микрорайонов, жилых районов, а также территорий промышленных предприятий. Строительно-акустические методы включают применение конструкций и устройств, обеспечивающих эффективное снижение уровня шума ..., они тесно связаны с проблемой снижения шума от технологического, санитарно-технического и инженерного оборудования, средств транспорта, механизированного инструмента и бытовых приборов ... К задачам С. а. относят и вопросы исследований и разработки акустических материалов...

С. а. как самостоятельная научная область возникла в начале 30-х гг. 20 в. и получила интенсивное развитие с 50-х гг. в связи со значительным ростом числа и мощности источников шума внутри зданий ... и на территориях населённых мест (средства ... транспорта), а также в связи с расширением масштабов применения ... ограждающих конструкций, обладающих сравнительно низкой звукоизолирующей способностью. Научные исследования по С. а. проводились ... в направлении разработки теории звукоизоляции ограждающих конструкций и соответствующих методов их расчёта и проектирования. Основные тенденции ... в области С. а. — изыскание наиболее эффективных шумоглушащих и звукоизолирующих конструкций и устройств, совершенствование методов их расчёта, разработка облегчённых ограждающих конструкций с повышенной звукоизоляционной способностью и новых градостроительных принципов, способствующих защите жилой застройки от транспортного шума.

С. а. базируется на теоретических положениях общей акустики, в ней используются экспериментальные методы исследований в лабораторных и природных условиях (например, метод моделирования при исследовании звукоизолирующей способности ограждающих конструкций и изучении распространения шума в помещениях, инженерных коммуникациях, а также на территориях городской застройки)...»



3.3. Різні види звукоізоляції приміщень.

Для підвищення звукоізолюючої здатності міжквартирних стін, а також зниження їхньої маси замість однорідних конструкцій, що складаються з одного матеріалу чи з декількох шарів різнорідних матеріалів, жорстко зв'язаних між собою (наприклад, оштукатурена цегельна стіна і т.п.), застосовуються роздільні конструкції із суцільним повітряним прошарком чи шаруваті конструкції, виконані з окремих шарів матеріалів, що різко відрізняються по своїх фізичних властивостях. Звукоізоляція стін, що мають вікна чи двері, практично визначається звукоізоляцією прорізів, звичайно більш низкою, чим звукоізоляція глухої частини огороження. Для підвищення звукоізоляційних якостей перекриттів чи

для зменшення їхньої маси без погіршення звукоізоляції доцільно влаштовувати перекриття роздільного типу із суцільним повітряним прошарком чи перекриття з підвісними стелями. Для підвищення звукоізоляції від ударного шуму суцільних однорідних перекриттів застосовують підлоги на пружній основі чи на окремих прокладках із пружних матеріалів. Рекомендується також настилати м'які рулонні підлоги (наприклад, на тепло- і звукоізоляційній основі). Як пружні прокладки під підлоги використовують мати з мінеральної чи скляної вати, деревинно-волокнисті плити і т.п. [145].

Для забезпечення необхідної звукоізоляції дуже важлива якість будівельно-монтажних робіт; навіть самі незначні щілини, отвори, тріщини в конструкціях різко погіршують звукоізоляційні властивості останніх. При проектуванні будинків варто враховувати, що ізоляція приміщень від внутрішніх і зовнішніх шумів повинна забезпечуватися також правильним плануванням будинку, зниженням рівня шуму від санітарно-технічного й інженерного устаткування і раціональних конструкцій огорожень. Найбільший технічний і економічний ефект досягається при комплексному захисті будинків від шумів.

Звукоізолюючі якості загородження в основному залежать від властивостей поверхні, її геометричних розмірів, кількості прошарків ізолюючого матеріалу [146, 147]. Наприклад, застосування триміліметрового сталевго листа дає змогу зменшити рівень шуму на 3 дБ, а застосування силікатного скла такої ж товщини — лише на 18 дБ. Використання двошарової конструкції, яка складається з мінераловатної плити (80 мм) та сталевго листа (5 мм), дає змогу зменшити рівень шуму на 49 дБ.

Одним із засобів боротьби з шумом на шляху його розповсюдження на виробництві може стати локалізація джерела інтенсивного шуму (рис. 3.3, а).

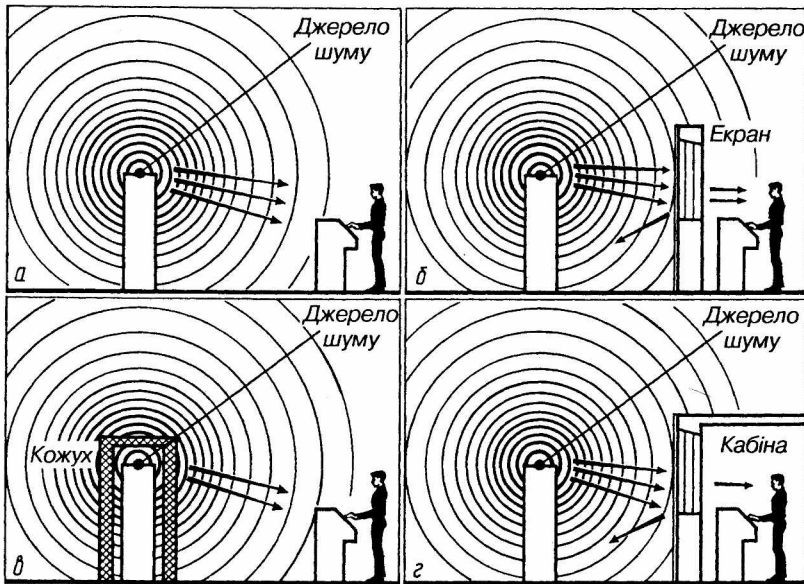


Рис. 3.4. Зменшення шуму завдяки звукоізоляції.

Від впливу прямого звуку операторів машин можна захистити за допомогою акустичних екранів, які встановлюються між робочим місцем і шумним устаткуванням. Ослаблення шуму в цьому випадку залежить від розмірів екрану, від співвідношення тисків прямого і відбитого звуків. Застосувати екран доцільно, коли на робочому місці тиск прямого звуку набагато перевищує тиск відбитого звуку. Екрани виготовляють зі сталевих або алюмінієвих листів завтовшки 1,5—2 мм, які з обох боків облицюють звукопоглинаючим матеріалом завтовшки не менше 50 мм (рис. 3.4, б).

Найбільш поширена й найчастіше використовується конструкція звукоізолюючого кожуха (рис. 3.4, в), яка складається із зовнішньої важкої обшивки з металу, дерева, пластмаси, з нанесеною на неї (для підвищення коефіцієнта поглинання облицювання) вібропоглинаючою

мастикою. Внутрішні прошарування конструкції - звукопоглинаюче облицювання, що включає звукопоглинач 2 та перфоровану оболонку 1. Зібрану конструкцію кожуха монтують на пружинних прокладках б, не допускаючи жорсткого зв'язку елементів кожуха з устаткуванням, яке ізолюється, та його фундаментом. Щоб забезпечити циркуляцію повітря, кожухи роблять негерметичними (але таке рішення, в свою чергу, зменшує їхню ефективність). Вони надають змогу зменшити рівень звуку на 15—20 дБА.

Ефективним засобом захисту людей від шуму, який створює устаткування, є звукоізолюючі кабінки. Звукоізолюючий кожух відрізняється від кабінки дистанційного спостереження або відпочинку в основному розмірами (різні між собою і способи монтажу). Крім того, простір кабінки призначений для перебування людей, тому особливі вимоги пред'являються до систем, що забезпечують повітрообмін та освітлення. Ефективність захисту звукоізолюючої кабінки (рис. 3.4, з) становить від 40 до 55 дБА.

Під звукопоглинанням мається на увазі властивість акустично оброблених поверхонь зменшувати інтенсивність відбитих ними хвиль завдяки перетворенню звукової енергії на теплову [148]. Звукопоглинання матеріалу характеризується коефіцієнтом звукопоглинання, який докладно описаний раніше (2.5).

Рівень зниження шуму залежить від багатьох факторів, головними з яких є акустичні характеристики самого приміщення, геометричні його параметри (довжина, висота, ширина) і акустичні характеристики матеріалів та конструкцій, застосовуваних для поглинання звуку

Звукопоглинаючі облицювання звичайно розміщують на стелі та верхніх частинах стін. Максимальне поглинання звуку можна одержати, облицювавши не менше 60 % загальної площі поверхонь.

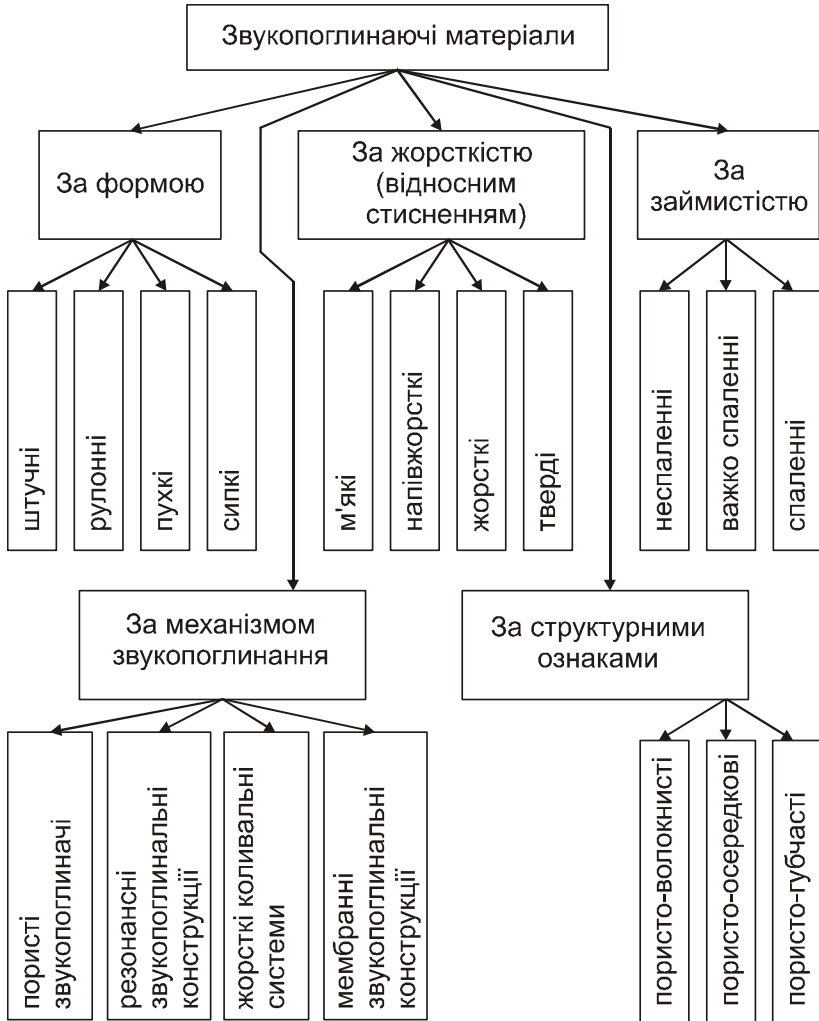


Рис. 3.5. Класифікація звукопоглинаючих матеріалів (згідно [142]).

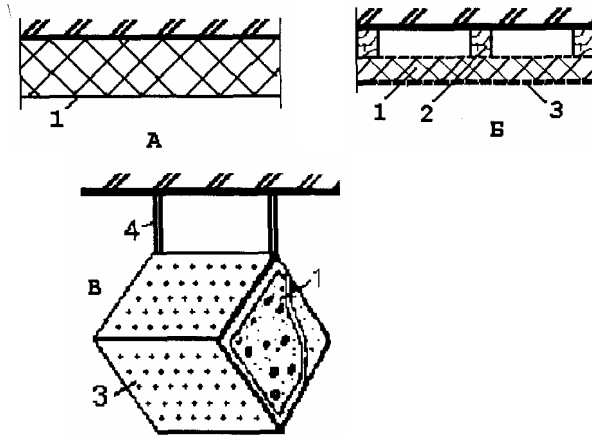


Рис. 3.6. Звукопоглинаючі конструкції: 1 - звукопоглинаючий пористий матеріал; 2 - дерев'яний каркас; 3 - перфорована стінка; 4 – підвіска.

Звукопоглинаюча конструкція може бути виконана з використанням звукопоглинаючих пористих матеріалів (рис. 3.6, а) у вигляді облицювання з перфорованим покриттям, і в захисних оболонках з ткани або плівки (рис. 3.6, б), об'ємних елементів різних форм [149] (рис. 3.6, в). Зменшення рівнів звукового тиску на робочому місці при раціональному використанні звукопоглинання може становити 6—8 дБ.

Нами також внесений деякий вклад в конструювання звуковбирних конструкцій. Про це детально можна дізнатися, наприклад, в [150 - 153] або в монографії [58].

Є й інші цікаві розробки в цій галузі, наприклад, [154, 155].

Слід сказати декілька слів про новий напрямок в боротьбі з шумом - утилізацію звукової енергії. Розробки в цій галузі [156 - 164] вирішують питання не тільки зменшення шуму, а й перетворення безкорисної енергії

звукової хвилі (тобто того самого шуму, що поглинається), у інші види енергії (наприклад, у електричну), за рахунок чого шумозахисні заходи перестають бути суто витратними, та починають приносити економічну користь. Вважаючи на те, що зараз людство приділяє велику увагу створенню так званих альтернативних джерел енергії, можна казати, що за цим напрямком - майбутнє.

Глушители шуму застосовуються для зменшення шуму аеродинамічного походження на шляху його поширення у повітро- та газопроводах, а також на шляхах всмоктування і вихлопу. За принципом зниження звукової енергії глушители поділяються на активні, реактивні, комбіновані та екранні.

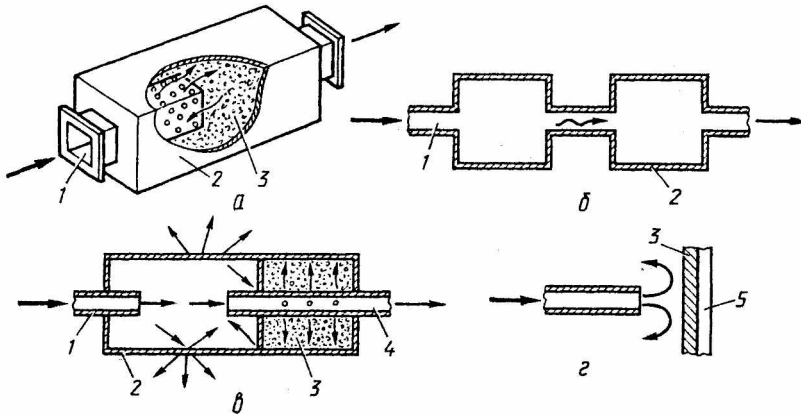


Рис. 3.7. Глушители шуму: 1- повітропровід; 2- корпус; 3 - звукопоглинач, 4 - випускна труба; 5 - екран-глушитель.

У активних глушителях ефективність поглинання шуму досягається завдяки переходу звукової енергії у теплову в результаті тертя частинок повітря у порах звукопоглинаючих матеріалів.

Найпростіший глушитель такого типу - канал, облицьований звукопоглинаючим матеріалом, так званий

трубчастий глушитель (рис. 3.7.а).

Волокнистий звукопоглинаючий матеріал застосовують у вигляді набивки або матів, якими обгортають внутрішню перфоровану трубу. Зменшення шуму на облицьованих поворотах може досягти 15 дБ. У реактивних глушителях звукопоглинання забезпечується утворенням "хвильової пробки", яка утруднює проходження звуку на деяких частотах завдяки впливу маси і пружності повітря в звукоуловлювачах глушителю (рис. 3.7, б). Ці глушители зменшують шум на 25-30 дБ.

Глушители реактивного типу виконуються у вигляді камер розширення та звуження, частина з них має перегородки, екрани, резонаторні пелюстки, настроєні на певну частоту і з'єднані із внутрішнім об'ємом повітропроводу завдяки щілинам тощо. Щоб підвищити їхню ефективність, всередині цей тип глушительів облицьовують звукопоглинаючим матеріалом. Такі пристрої (рис 3.7, в) називають комбінованими глушителями.

Екранні глушители звичайно встановлюються на виході повітропроводів (рис. 3.7, г) в атмосферу. Вони знижують рівень високочастотного шуму на 20 дБ.

Системи компенсації в наших власних дослідженнях представлені [165]. Про це докладно можна довідатися із [58].

3.2. Власні авторські розробки в галузі розробки тимчасових колективних акустичних засобів боротьби із шумом на шляху його розповсюдження

Багато місця в наших особистих дослідженнях приділялося розробці шумозахисних заходів [166]. Про деякі з них треба доповісти докладніше.

Оригінальність завдання, що ставилося нами в роботі [40], полягає в тому, що ніколи в історії містобудівної акустики шумозахисні рішення, спорудження і їхні

елементи не використалися тимчасово, тобто багато з них можуть і повинні нести функціональне навантаження постійно, залежно від конкретики поставленого завдання.

Тимчасовий характер такі рішення можуть носити в тому, наприклад, випадку, коли об'єкт шумозахисту (житловий будинок, лікувальний заклад, навчальна установа, ..., ін.) знаходиться в (первісно) акустично сприятливому районі. Тут порушниками тиші можуть виявитися тимчасові джерела (будівництво або реставрація сусіднього будинку, геологорозвідка, зведення дамб, проходка тунелів, риття каналів, будівництво станцій метрополітену, рекультивація земель, тимчасові водозабори, посилення зсувних ґрунтів і багато інших об'єктів господарської діяльності людини із застосуванням спеціальної техніки [41].

Нами запропоновано альтернативний напрямок шумозахисту в містобудуванні, перевага якого полягає у відносній дешевині його елементів і можливості багаторазового їхнього використання на різних об'єктах. Мова йде про розробку й застосування інвентарних елементів малих розмірів модульного типу. Авторами [40] (у т.ч. Абракітовим В.Е.) розроблені й опубліковані [42] рекомендації з використання різних інвентарних пристосувань, для зменшення шуму на територіях, що прилягають до об'єктів будівництва, реконструкції й ремонту будівель і споруд. До них відносяться, наприклад, екран-пастка; локальний екран; розтруб для зниження аеродинамічного шуму машин.

Екран-пастка (рис. 3.8). являє собою збірно-розбірний пристрій модульного типу - двогранний гострий кут, утворений поверхнею землі 1 (перекриття будівлі) і похилою стінкою 2 з полімерного матеріалу.

Використання такого пристрою ефективно для високих і середніх частот чутного діапазону (рис. 3.8, б), які характерні для аеродинамічного шуму (двигунів внутрішнього згоряння та компресорів, насосів, копрів й ін).

Локальний екран. Найбільш ефективними, серед тимчасових засобів шумозахисту на будівельних майданчиках при реконструкції будинків і споруджень, є локальні екрани модульного типу. Можливість варіювання їхніми розмірами й конфігурацією, залежно від параметрів джерела й особливостей розв'язуваних завдань, ставить ці інвентарні пристосування на перше місце серед використовуваних на будівельному майданчику шумозахисних засобів. Такі екрани, можуть бути виготовлені з полімерних матеріалів, маючи невелику масу, швидко монтуються й демонтуються.

Розтруб для зниження аеродинамічного шуму машин являє собою розширення на закінченні вихлопної труби, двигунів внутрішнього згоряння конічної або циліндричної форми. Пристрій виконується у вигляді знімної насадки, що надягають на кінець вихлопної труби 1. Насадка має більший діаметр, ніж вихлопна труба, та фіксується на ній за рахунок кільцевих сегментів 2. Насадка має отвори 3 для проходження газів, осі симетрії яких розташовані перпендикулярно осі симетрії вихлопної труби 1. Також отвори виконані на дні 4, розташовані з ексцентриситетом відносно осі симетрії вихлопної труби 1. Потрапляючи в розширений обсяг внутрішнього простору 5 між насадкою та вихідним отвором вихлопної труби, газу, що відробили, знижують швидкість свого руху при виході з неї, що спричиняє істотне зниження супроводжуваного вихлопу шуму. Теоретичні дослідження показали, що збільшення площі поперечного перерізу вихлопної труби всього на 20% дозволяє знизити рівень шуму, що генерується

вихлопними газами, на 3 дБА, тобто в 2 рази по енергії.

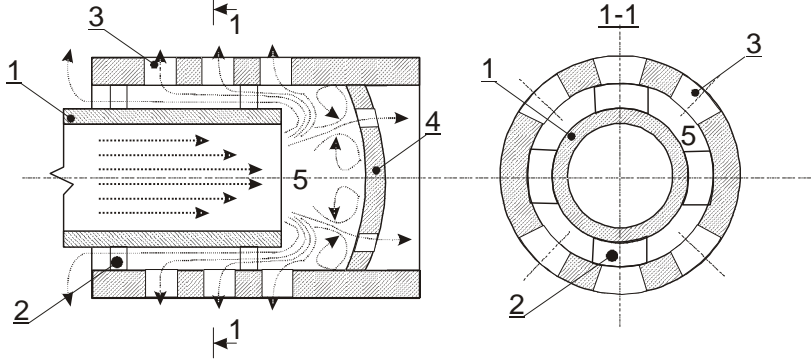


Рис. 3.9. Розтруб для зниження аеродинамічного шуму машин за [42].

3.3. Власні авторські розробки в галузі розробки стаціонарних акустичних засобів боротьби із шумом, а саме – засобів звукоізоляції

3.3.1. Постановка завдання. Відомо, ([167]), що звукові хвилі у визначених умовах здатні до поляризації. Відповідно до хвильової теорії фізики, поляризація хвиль являє собою порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Поляризація світла добре відома, і широко використовується в техніці. По нашим даним [168], у визначених умовах можлива також й поляризація звуку у твердому середовищі [169].

Нами було запропоновано використовувати той же принцип поляризації, (відомий для світла), стосовно до звукових хвиль у твердих тілах [170 - 172]. Ця пропозиція може бути застосована, наприклад, для створення шумозахисних екранів, звукоізолюючих панелей і інших будівельних конструкцій з високими звукоізолюючими властивостями .

Основне завдання при дослідженнях у даному напрямку полягає в тому, щоб виявити такі умови, а саме - підібрати відповідні сполучення матеріалів, щоб згідно [167],

забезпечити поляризацію звуку. Для кількісної оцінки явища треба було дати опис фізичних процесів, що відбуваються в товщі багат шарових звукоізолюючих матеріалів при проходженні через них звуку, і вивести формули, що зв'язують деякі акустичні величини з такими величинами, як модуль зрушення матеріалу шарів і щільність середовища поширення. У результаті створеної (у подальший розвиток [167]) фізичної теорії [170] практична реалізація наших пропозицій здійснюється за рахунок простого підбора будівельних матеріалів (точніше, ряду їхніх фізико-хімічних характеристик) для проєктованої багат шарової звукоізолюючої конструкції.

3. 3.2. Фізичні основи поляризації звуку згідно [106]

Спосіб ослаблення інтенсивності звукових хвиль, відповідно до формули нашого найбільш суттєвого винаходу [106], полягає в ослабленні інтенсивності при їхньому проходженні через багат шарову тверду перешкоду, і відрізняється тим, що подовжню звукову хвилю перетворюють у неполяризовану поперечну, пропускаючи її через перший шар твердого матеріалу, що характеризується довільним напрямком волокон; потім поляризують, пропускаючи її через другий шар твердого матеріалу - поляризатора, який характеризується визначеним напрямком волокон; потім повторно поляризують, пропускаючи її через третій шар твердого матеріалу - аналізатора, який характеризується перпендикулярним напрямком волокон стосовно попереднього шару. При цьому здійснюють багаторазову поляризацію за рахунок збільшення числа пар поляризатор - аналізатор, тобто за рахунок збільшення шарів твердого матеріалу, що розрізняються між собою за орієнтацією волокон, причому загальна кількість шарів дорівнює:

$$N = 1 + n, \quad (3.2)$$

де n - число, кратне 2 ; $N \geq 3$.

При цьому наявність кожного шару забезпечує свою, специфічну, властиву йому функцію.

Наявність першого шару твердого матеріалу з довільним напрямком волокон на шляху поширення звуку забезпечує виникнення в його товщі поперечної складової звукової хвилі. Таким чином, у ньому відбувається перетворення повітряної звукової хвилі, що є подовжньою, у поперечну хвилю. Ця поперечна хвиля потім може бути піддана поляризації. Таким чином, наявність першого шару матеріалу з довільним напрямком волокон забезпечує виникнення неполяризованої поперечної хвилі. Орієнтація волокон матеріалу при цьому може бути довільною.

Наявність другого шару з визначеним (і при тому рівнобіжним) напрямком волокон забезпечує умови для здійснення хвильового явища поляризації звуку, тобто одержання поляризованої хвилі з неполяризованої. Цей шар, називаний "поляризатор", пропускає компоненту хвилі 2 з визначеним напрямком коливань вектора зсуву \bar{S}_2 , (який еквівалентний вектору напруженості \bar{E} світла). Цей компонент виділяється їм з неполяризованої вихідної хвилі 1 у першому шарі. Далі, проходячи через другу границю розподілу середовищ (середовище 2 / середовище 3), хвиля надходить на третій шар, (відповідно з загальноприйнятою у фізиці термінологією називаний нами "аналізатор"). У залежності від орієнтації волокон матеріалу третього шару цей поляризований компонент або проходить, або не проходить через нього. Це обумовлено збігом (чи розбіжністю) напрямків коливань вектора зсуву \bar{S}_2 (у шарі поляризатора) з напрямком коливань \bar{S}_3 (у шарі аналізатора). Якщо вісь аналізатора (напрямок волокон шару 3) складає кут θ с напрямком коливань вектора \bar{S}_2 , у кожному з волокон шару 3

(аналізатору) виникає звукова хвиля, що характеризується вектором $\Delta \bar{S}_3$:

$$\Delta \bar{S}_3 = - \bar{S}_2.$$

Оскільки напрямки коливань у шарах 2 і 3 різні (з огляду на вищезгаданий кут θ), $\Delta \bar{S}_3$ компенсує складову вектора \bar{S}_2 у цьому напрямку, а результуючий вектор \bar{S}_3 буде являти собою тільки складову вектора \bar{S}_2 , рівнобіжну осі.

Результуюче поле за шаром 3 (шаром аналізатора) у векторному вигляді:

$$\bar{S}_3 = \bar{S}_2 + \Delta \bar{S}_3 = 0,$$

чи, то ж саме:

$$\bar{S}_3 = \bar{S}_2 * \cos\theta.$$

Інтенсивність поперечної звукової хвилі в шарі 3 може бути розрахована як:

$$I_3 = I_2 * \cos^2\theta, \text{ Вт/м}^2,$$

де I_2 - інтенсивність звукової хвилі в шарі поляризатора, Вт/м^2 ; I_3 - інтенсивність звукової хвилі в шарі аналізатора, Вт/м^2 ; θ - кут між напрямком волокон шару аналізатора 3 і напрямком коливань вектора \bar{S}_2 (тобто площиною поляризації).

Для збільшення ефективності може бути здійснена багаторазова поляризація за рахунок збільшення числа пар "поляризатор-аналізатор", кожна з яких відрізняється від попередньої по взаємній орієнтації волокон.

При цьому твердження в нашому вищенаведеному тексті, що стосуються шарів 2 і 3, справедливі для кожної їх пари.

Загальну кількість шарів можна підрахувати за формулою (3.2):

$$N = 1 + n \geq 3,$$

де n - число пар "поляризатор-аналізатор" (чисто

3.3.3. Суть винаходу [106]

Сутність винаходу полягає в наступному. З основного рівняння теорії пружності випливає, що кожний хвильовий рух у твердих тілах можна представити у виді суми чистих подовжніх (вільна від обертання складова) і чистих поперечних (вільна від розширення складова) хвиль. Одне з характерних хвильових явищ для поперечної хвилі - її поляризація [106], що відбувається в багат шаровому матеріалі.

Поляризація звуку (див. рис. 3.10) відбувається при його відбитті і переломленні на переході границі розподілу твердих тіл, що характеризуються різними швидкостями поширення поперечної звукової хвилі. Вихідна звукова хвиля O у повітрі, що падає на будівельну конструкцію, яка є подовжньою, частково відбивається від її O^I і частково попадає в товщу твердого тіла, де поширюється по його шару 1 у виді поперечної неполяризованої хвилі, яка характеризується різноспрямованими векторами зсуву \overline{S}_I , і коливальної швидкості \overline{v}_I часток пружного середовища, тобто в кожній крапці простору (шар 1) по всіляких напрямках у площині, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі I , ці вектори \overline{S}_I , і \overline{v}_I , швидко і безладно переміняють один одного, так що жодний з цих напрямків не є переважним.

У роботах [106, 168] ми говорили, що c – швидкість поширення поперечної звукової хвилі в пружному середовищі, - у загальному випадку може бути обчислена зі співвідношення:

$$c = \sqrt{G/\rho} \text{ , м/с,} \quad (3.3)$$

де ρ – щільність середовища, кг/м^3 ; G – модуль зсуву середовища.

Однак, по нашим уточненим даним, у даному

випадку (поширення структурного шуму в товщі багат шарової перешкоди, кожен шар якої являє собою плоску пластину) ми маємо справу з згинаючими хвилями, швидкість поширення яких може бути обчислена по трохі інших формулах, уперше приведеним нижче.

Продовжимо розгляд фізики процесу при проходженні звукової хвилі через товщу багат шарового твердого тіла відповідно до нашого винаходу [106].

Переборюючи (першу) границю розподілу між шарами 1 і 2 твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями поширення поперечної звукової хвилі c_1 , і c_2 відповідно, хвиля поляризується, причому через границю розподілу шарів 1 і 2 пропускається компонент хвилі - промінь 2, що характеризується переважно визначеним напрямком вектора зсуву часток \bar{S}_2 . У цьому випадку виконується закон Брюстера - умова, при якій хвиля 1 у шарі 1, відбита від границі розподілу шарів 1 і 2, цілком поляризована (вектор зсуву \bar{S}_1 коливається перпендикулярно до площини падіння), відбитий I^1 і переломлений 2 її промені взаємно перпендикулярні, пропущена компонент хвилі - промінь 2 - частково поляризований (вектор \bar{S}_2 коливається переважно в площині падіння).

Тангенс кута падіння $\theta_{1,2}$ при цьому може бути обчислений як відношення швидкостей поширення згинаючих звукових хвиль у шарах 1 і 2:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta_{1,2} = c_1 / c_2 &= \sqrt[4]{\frac{D_1\omega_1^2}{m_1} \cdot \frac{m_2}{D_2\omega_2^2}} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{E_1 d_1^3 \omega_1^2}{12(1-\mu_1^2)m_1} / \frac{E_2 d_2^3 \omega_2^2}{12(1-\mu_2^2)m_2}} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{E_1 d_1^3 \omega_1^2 12(1-\mu_2^2)m_2}{12(1-\mu_1^2)m_1 E_2 d_2^3 \omega_2^2}} = \sqrt[4]{\frac{(1-\mu_2^2)\rho_2 E_1 d_1^2 \omega_1^2}{(1-\mu_1^2)\rho_1 E_2 d_2^2 \omega_2^2}} \end{aligned}$$

де $\theta_{1;2}; \theta_{2;3}; \theta_{3;4}; \dots$ - кут Брюстера задля межи розподілу шарів 1 та 2; 2 та 3; ... відповідно; $D_1; D_2; D_3; \dots$ - циліндрична твердість пластин (шарів 1; 2; 3; ... відповідно), Н·м, що обчислюється за формулою:

$$D_i = E_i d_i^3 / (12(1 - \mu_i^2)), \text{ Н·м,}$$

$E_1; E_2; E_3; \dots$ - модуль пружності середовища (шарів 1; 2; 3; ...), Па; i - номер шарів ($i = 1; 2; 3$); $\mu_1; \mu_2; \mu_3; \dots$ - коефіцієнт Пуассона тих же шарів; $\omega_1; \omega_2; \omega_3; \dots$ - кутова частота:

$$\omega = 2\pi f,$$

$f_1; f_2; f_3; \dots$ - частота коливань у звуковій хвилі, Гц; $m_1; m_2; m_3; \dots$ - поверхнева щільність шарів 1; 2; 3; ... відповідно, (тобто маса пластин 1; 2; 3; ... відповідно на одиницю їхньої площі), кг/м^2 , що обчислюється за формулою:

$$m = \rho \cdot d,$$

де $d_1; d_2; d_3; \dots$ - товщини матеріалу шарів 1; 2; 3; ... відповідно, м; $\rho_1; \rho_2; \rho_3; \dots$ - щільності тих же шарів, кг/м^3 .

Переборюючи (другу) границю розподілу шарів 2 і 3 між наступними шарами твердого тіла, що характеризуються різними швидкостями поперечної хвилі c_2 , і c_3 , хвиля 3 повторно поляризується, причому через границю розподілу шарів 2 і 3 пропускається компонент хвилі - промінь 3, частково поляризований (вектор зсуву \vec{S}_3 коливається переважно в площині падіння), а відбитий від границі розподілу компонент - промінь 2¹ цілком поляризований і перпендикулярний до променю 3. У цьому випадку кут Брюстера дорівнює:

$$\text{tg}\theta_{2;3} = c_2/c_3 = \sqrt[4]{\frac{(1 - \mu_3^2)\rho_3 E_2 d_2^2 \omega_2^2}{(1 - \mu_2^2)\rho_2 E_3 d_3^2 \omega_3^2}}$$

$$\operatorname{tg}\theta_{1;2} \neq \operatorname{tg}\theta_{2;3}$$

Тому вектор зсуву \bar{S}_3 коливається в іншій площині, аніж вектор \bar{S}_2 , відповідно границя розподілу шарів 2 і 3 відбиває значну частину інакше поляризованої звукової хвилі 2. Крім того, відбувається також поглинання звукової енергії, тобто вона переходить у теплову.

Вищевказані залежності можуть бути застосовані тільки для поперечних хвиль у середовищах багатошарового твердого тіла, - але ніяк не для подовжніх хвиль.

Виходячи з цього, якщо розглядається звукоізоляція від повітряного шуму, перший шар твердої перешкоди 1 служить тільки для утворення поперечних хвиль у ньому, і повне внутрішнє відбиття можливе лише при переході поперечної звукової хвилі з нього в шар 2, що є в нашому прикладі другим по рахунку. У такому випадку також повинне виконуватися обговорене в описі явища поляризації звуку умова обов'язкової наявності в ньому не менш 3-х шарів. При цьому перший з них служить тільки для утворення поперечних звукових хвиль. Влаштування великої кількості таких шарів, виконання їх зі спеціальних звуковбирних матеріалів (щоб ефективно гасилася подовжня складова хвилі) таким чином, щоб для кожної границі розподілу виконувалася умова $\operatorname{tg}\theta_i \rightarrow 1$, дозволяють різко підвищити загальну звукоізолюючу здатність будівельної конструкції. Якщо матеріали всіх трьох шарів різні, то, відповідно, величини, що входять у формули, відрізняються між собою; і за рахунок належного підбора їхніх необхідних сполучень ми маємо можливість підібрати таке їхнє співвідношення, щоб забезпечити зниження інтенсивності звукової енергії при її поширенні в будівельній конструкції. При цьому (у залежності від співвідношення швидкостей звуку) можливі 2 варіанти:

$$1) \begin{cases} c_1 \geq c_2; \\ \frac{c_1}{c_2} = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \geq 1; \\ \theta_{1,2} > 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 90^\circ. \end{cases}$$

У такому випадку найбільше доцільно застосовувати поляризацію звукових хвиль, описану вище.

$$2) \begin{cases} c_1 \leq c_2; \\ \frac{c_1}{c_2} = \operatorname{tg} \theta_{1,2} \leq 1; \\ \theta_{1,2} < 45^\circ, \text{ аж до } \theta_{1,2} = 90^\circ. \end{cases}$$

При вищевказаних граничних умовах другого варіанту відбувається перехід подовжньої звукової хвилі із середовища 1 у середовище 2 товщі тіла [173 - 174].

Таке влаштування шарів матеріалу з успіхом було застосоване при конструюванні пристроїв, що являються іншими винаходами автора, зокрема карбюраторний електроагрегат Абракітова [175 - 177] та ін.

3.3.4. Додатково до поляризації звуку – ще і повне внутрішнє відбиття!

Явище поляризації звуку може сполучатися з іншим відомим фізичним явищем: повним внутрішнім відбиттям. Фізичні основи й умови, необхідні для повного внутрішнього відображення, розглянуті вище. Правда, дослідження більшості авторів лежать саме в області опису повного внутрішнього відбиття світла. Очевидно, з огляду на єдину хвильову природу, ті ж самі фізичні процеси можуть відбуватися і при повному внутрішньому відбитті звуку.

Повертаючись до фізики процесів, що відбуваються в товщі багатшарового звукоізолюючого матеріалу, можна помітити наступне. Якщо розглядається звукоізоляція від

повітряного шуму, перший шар твердої перешкоди 1 служить тільки для утворення поперечних хвиль у ньому, і повне внутрішнє відбиття можливе лише при переході поперечної звукової хвилі з нього в шар 2, що є в нашому прикладі другим по рахунку. У такому випадку також повинна виконуватися обговорена в описі явища поляризації звуку умова обов'язкової наявності в ньому не менш 2-х шарів. При цьому перший з них служить тільки для утворення поперечних звукових хвиль. З вищевказаного випливає, що для забезпечення явища повного внутрішнього відбиття поперечної складової звукової хвилі при переході із шару 1 у шар 2 швидкості поширення поперечної звукової хвилі c_1 і c_2 у них повинні співвідноситися, відповідно до (3.3). При цьому бажано, щоб $\theta_{\text{граничне}} \rightarrow 0^\circ$; але $\theta_{\text{граничне}} \neq 0^\circ$:

У випадку поляризації звуку, а також для врахування явища повного внутрішнього відбиття необхідно також врахувати і товщину кожного із шарів d_i (за винятком лише зовнішнього, найпершого шару, що безпосередньо контактує з повітрям, і який служить, як показано вище, винятково для утворення поперечної звукової хвилі). Згідно [97, с. - 291], *"падая на тонкую пленку, световой луч частично отражается от верхней, а частично - от нижней поверхностей пленки. Разность фаз отраженных волн зависит от разности хода лучей, которая в свою очередь определяется различием путей, и дополнительной разностью хода $\lambda/2$, вызванной изменением фазы на 180° при отражении от передней поверхности пленки"*. Зіставивши це з [97, с. - 243], зробимо висновок, що для поперечних звукових хвиль характерно аналогічне явище, як і для світла. Тільки в цьому випадку поняття *"тонкая пленка"* замінюється поняттям *i-й*, (але не менш, ніж 2-й) шар твердої речовини товщиною d_i , м. Різниця ходу променів при нормальному падінні:

$$\delta = 2d_i \operatorname{tg} \alpha_{i-1,1} - \lambda/2 = 2d_i \frac{c_{i-1}}{c_i} - \lambda/2.$$

З умови $\delta = k\lambda$, м ($k = 0; 1; 2; \dots$ - ціле число), випливає вираження для довжини хвилі λ , що відповідає:

- посиленню інтенсивності відбитих компонентів $(i-1)^I$ и $(i-1)^{II}$:

$$\lambda = \frac{d_i \cdot c_{i-1}}{c_i \cdot (2k + 1)}, \text{ м } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}). \quad (3.4)$$

- ослабленню інтенсивності відбитих компонентів $(i-1)^I$ и $(i-1)^{II}$:

$$\lambda = \frac{d_i \cdot c_{i-1}}{c_i \cdot k}, \text{ м } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}). \quad (3.5)$$

Практична цінність цих співвідношень наступна. Якщо відома товщина шару d_i , при $k = 1$ можна визначити довжину хвилі λ , при якій за рахунок інтерференційних явищ її компоненти гасять один одного; чи, навпаки, виходячи з максимальної інтенсивності на дискретній довжині хвилі λ підібрати товщину шару d_i , таким чином, щоб погасити її. Можливо і збільшення здатності шару i до відбиття звуку з дискретною довжиною хвилі λ (3.4), наприклад, в акустичних дзеркалах. Тим більш, що (3.5) являє собою:

$$k\lambda = 2d_i \frac{c_{i-1}}{c_i}, \text{ м; } (k = 0; 1; 2; \dots - \text{ціле число}).$$

Тобто гасінню підлягають усі хвилі з дискретними значеннями довжини хвилі, кратні λ , і обумовлені шляхом обчислення λ при $k=1$, і множення цього числа λ на цілі числа ($k = 2; 3; 4; \dots$)... Наприклад, якщо $\lambda = 0,02$ м, -

гасінню підлягають, крім її, також хвилі з довжинами 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; ... м, і т.д.)

3.3.5. Алгоритм розрахунку конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «Сандвіч» з використанням явища поляризації звуку

Таким чином, слід відзначити, що в рамках досліджень автора був винайдений принципово новий спосіб боротьби із шумом, авторські права якого захищені документом [106]. Він реалізує явище поляризації поперечної звукової хвилі в товщі багатошаровій звукоізолюючій панелі, можливість використання якого з метою зниження шуму показана в роботах [168, 167]. Однак безпосередньо для створення такої панелі принципової ідеї [106] недостатньо – необхідно визначити її основні технічні параметри, виконати її конструктивний розрахунок. Мова йде про багатошарову звукоізолюючу панель типу «сандвіч» [178]. Ця конструкція має ряд позитивних якостей: сучасний дизайн; необхідну звуко- і теплоізоляцію; водо- і паронепроникнення; пожежостійкість; екологічну безпечність; стійкість до погодних впливів і агресивних середовищ; безпеку транспортування і швидку, незалежну від часу року інсталяцію монтажних елементів; можливість повторного застосування; малу вагу порівняно з іншими конструктивними елементами аналогічного призначення; необхідну несучу здатність.

Панель типу «сандвіч» складається з 2-х тонких плит (шари 1 і 3), зв'язаних пружним проміжним шаром – серцевиною (шар 2). (Далі в тексті використовуються позначення 1, 2, 3, що вказують на приналежність даної характеристики матеріалу тому чи іншому шару). Для зовнішніх шарів таких елементів конструкцій, як правило, використовують металеві профільовані листи з полімерним покриттям або інші міцні матеріали. У якості середнього

шару застосовують менш жорсткі та більш легкі матеріали. Різні типи пінопластів, пластмас та інших типи синтетичних полімерних матеріалів не відповідають вимогам протипожежної безпеки та екології, тому зараз найширше застосовують матеріали природного походження, зокрема, на основі базальтових порід. Відмітна риса «сандвіча» - можливість сполучення достатньої твердості і необхідної величини звукоізоляції, що досягається правильним підбором їхніх конструктивних параметрів [168, 106, 167]. Потрібно забезпечити одночасне виконання двох взаємне суперечливих умов: забезпечення твердості при зрушенні серцевини, і (по можливості) більш високої граничної частоти.

Значення граничної частоти «сандвіча» потрібно задавати можливо найбільшим, щоб перекривався діапазон частот, необхідний для ізоляції шуму. Зокрема, при використанні таких конструкцій у житлових і суспільних будинках бажано, щоб $f_{загальн} \geq 6500$ Гц. Однак це приводить до зменшення твердості серцевини при зрушенні (що грозить деформаціями, і навіть повним руйнуванням панелі). Гранична частота «сандвіча» $f_{загальн}$, Гц зв'язується з комплексним безрозмірним параметром x , що враховує твердість, залежністю

$$f_{загальн} = f_1 \sqrt{1 - x^2}, \text{ Гц} \quad (3.6)$$

де f_1 – гранична частота однієї з зовнішніх плит «сандвіча», Гц.

Найменша частота, при якій стає можливим явище хвильового збігу (тобто рівність швидкостей поширення звуку в хвилі згинання, і в повітрі), називається граничною, і визначається по формулі:

$$f_1 = \frac{c_6^2}{2\pi} \cdot \sqrt{m_1 D_1}, \text{ Гц} \quad (3.7)$$

де c_6 – швидкість поширення звукової хвилі в повітрі, м/с; m_1 – поверхнева щільність шару 1, кг/м²; D_1 – циліндрична твердість шару 1, Н·м; c_{n1} – швидкість подовжньої хвилі в шарі 1, м/с.

Для суцільного огороження товщиною d_1 , м, однак, ця формула (3.7) може бути трохи спрощена з урахуванням переходу від швидкості поширення поперечних хвиль у товщі твердого тіла до швидкості поширення подовжніх хвиль (довідкові дані):

$$f_1 = \frac{c_6^2}{1,8c_{n1}d_1}, \text{ Гц.} \quad (3.8)$$

При підвищенні граничної частоти панелі «сандвіч» $f_{\text{загальн}}$ безрозмірний параметр x у формулі (3.6) прагне до зменшення. Доцільно задавати співвідношення:

$$x^2 \geq 0,1, \quad (3.9)$$

оскільки при його менших значеннях гранична частота $f_{\text{загальн}}$ не підвищується. Що ж таке x в (3.9)?

$$x = \frac{c_2(d_1/2 + d_2 + d_3/2)}{c_6 d_2} \quad (3.10)$$

де $(d_1/2 + d_2 + d_3/2)$ – відстань між серединними площинами зовнішніх шарів 1 і 3, розділених між собою шаром серцевини 2, м; d_1 ; d_2 ; d_3 – товщини шарів 1; 2; 3 відповідно, м; c_2 – швидкість поширення зсувної хвилі в 2-му шарі (серцевині). Вона може бути обчислена по формулі:

$$c_2 = \sqrt{G_2 d_2 / m_2}, \text{ м/с} \quad (3.11)$$

де G_2 – динамічний модуль матеріалу шару 2 при зрушенні, Па; m_2 – поверхнева щільність шару 2, кг/м².

У забезпечення належних техніко-експлуатаційних характеристик потрібно дотриматися умови обмеження деформації конструкції:

$$w/l \leq 1/200 \quad (3.12)$$

де w - статичний прогин середини конструкції під дією власної ваги; l - проліт конструкції «сандвіча», м.

Практика показує, що найбільш слабе місце «сандвіча» - його серцевина, виконувана з матеріалів, що демпфірують, пінопластів, - на відміну від зовнішніх плит, що виготовляються, як правило, з металу, гіпсу, азбестоцементу й ін. Тому нас, у першу чергу, цікавить оптимальна товщина 2-го шару, м. Вона може бути знайдена, як:

$$d_2^2 \geq \frac{Pl^2}{E_2 d_2 [0,192 - 4,8\beta_2 gl(xc_a)^{-2}]}, \quad (3.13)$$

де P – вага конструкції панелі «сандвіч» шириною 1 м, Н/м:

$$P = mgl, \text{ Н/м};$$

m – поверхнева щільність, кг/м²; $g = 9,81 \text{ м/с}^2 = \text{const}$ – прискорення вільного падіння;

$$\beta = G_2 / G_{2c},$$

G_2 ; G_{2c} – відповідно, динамічний і статичний модулі

матеріалу шару 2, Па;

$$E' = E(1 - \mu^2);$$

E і μ – відповідно, модуль Юнга, Па; і коефіцієнт Пуассона «сандвіча».

Підбор оптимальних параметрів конструкції проектованої плити виконують у наступному порядку. Задавши значеннями x^2 і $f_{загальн}$, знаходять граничну частоту зовнішньої панелі f_1 відповідно до формули (3.6). (Звичайно 1-й і 3-й шари багатошарової панелі «сандвіч» виконані з однакових одношарових панелей рівної товщини; автоматично $f_1 = f_3$). За формулою (3.8) визначають товщини зовнішніх (1-го і 3-го) шарів панелі d_1 ; d_3 . З умови (3.13) визначають товщину серцевини d_2 . З рівняння

$$x_2 = G_2 d_2 \cdot g \cdot l / (P c_6^2)$$

визначають необхідне значення динамічного модуля пружності матеріалу G_2 матеріалу серцевини при зрушенні. Це дозволяє установити (підібрати відповідно до необхідного значення) найбільш придатний матеріал серцевини. У нормованому діапазоні частот повинна бути відсутня власна частота симетричних коливань плит «сандвіча», тобто повинна виконуватися умова:

$$f_{власна} = 1 / (2\pi \sqrt{G_2 / (d_1 d_2 \rho_1)}) > 3200 \text{ Гц.}$$

При виконанні цієї умови запроектована звукоізолююча панель типу «сандвіч» вважається такою, що задовольняє обом конструктивним вимогам: вона забезпечує достатню твердість при зрушенні серцевини, витримуючи умову обмеження деформації (3.12) і досить високу граничну частоту $f_{загальн}$, дотримуючи необхідну звукоізолюючу

здатність [179].

Конструктивний розрахунок панелі на цьому можна було б закінчити; однак акустичний розрахунок був би не повним, - оскільки цікаво знати конкретну величину звукоізоляції запроєктованої конструкції R'_w , виражену в дБ. З обліком наших попередніх досліджень, нами (вперше в дійсній роботі) пропонується наступна методика її визначення.

1. Обчислюємо середню щільність «сандвічу» $\rho_{сер}$, кг/м³. Середня щільність фізичного тіла, відповідно до визначення, це сума мас його складових частин $\sum M_i$, кг, - (для нашого випадку сума мас шарів $\sum M_i = (M_1 + M_2 + M_3)$), ділена на загальний обсяг фізичного тіла $V_{загальн} = \sum V_i$, м³. У нашому випадку відомі геометричні параметри (стало бути, і обсяги) для кожного шару V_1 ; V_2 ; V_3 багатошарової звукоізолюючої панелі типу «сандвіч»; і тип матеріалу (отже, щільності) кожного шару ρ_1 ; ρ_2 ; ρ_3 , кг/м³.

$$\begin{aligned} \rho_{сер} &= (\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \rho_3 \cdot V_3) / V_{загальн} = \\ &= (d_1 l \cdot b \cdot \rho_1 + d_2 \cdot l \cdot b \cdot \rho_2 + d_3 \cdot l \cdot b \cdot \rho_3) / ((d_1 + d_2 + d_3) l \cdot b) = \\ &= (d_1 \rho_1 + d_2 \rho_2 + d_3 \rho_3) / (d_1 + d_2 + d_3), \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Величини l і b , м в (3.14) – відповідно, довжина і ширина звукоізолюючої панелі.

2. Знаючи $\rho_{сер}$, можна знайти середню поверхневу щільність матеріалу панелі «сандвіч» m , кг/м²

$$m = \rho_{сер} / (d_1 + d_2 + d_3), \text{ кг/м}^2$$

3. Середня власна звукоізоляція R'_w , дБ, багатошарової звукоізолюючої панелі типу «сандвіча» у нормованому діапазоні частот $f_n \div f_6$, Гц буде визначатися як середнє значення значень звукоізолюючої здатності на її граничних частотах цього діапазону $R'_w = (R_n + R_6) / 2$, дБ; чи (при $k = 1 \text{ м}^2 / (\text{кг} \cdot \text{Гц})$):

$$R'_w = ((20 \lg k \cdot m \cdot f_n - 47,5) + (20 \lg k \cdot m \cdot f_6 - 47,5)) / 2, \text{ дБ}; \quad (3.15)$$

При підстановці чисельних значень нижньої граничної частоти f_n ($=100$ Гц) і верхньої граничної частоти f_s ($=3200$ Гц) нормованого діапазону (3.15) здобуває вид:

$$R'_w = (20 \lg m^2 + 15,1)/2, \text{ дБ.} \quad (3.16)$$

Розрахунок конструктивних параметрів панелі «сандвіч» згідно з вище вказаними положеннями] - порівняно складна математична задача, тому у подальший розвиток нами була розроблена комп'ютерна програма [180]. В якості засобу програмування обрано “Visual Basic”. Програма може бути реалізована в рамках “Microsoft Excel”, що входить до складу відомого пакету “Microsoft Office” (настільні ПК або ноутбуки), або “Pocket Excel”, що застосується на кишенькових ПК. Ілюстративний матеріал, що представляє інтерфейс розробленої нами програми, наведений нижче.

3.3.6. Програма для обчислення конструктивних параметрів багат шарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку

Microsoft Excel - Сэндвич.xls

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Справка

Введите вопрос

Г5 Результат розрахунку

1 **Програма для обчислення конструктивних параметрів багат шарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з викорис**

2

3 Середня власна звукоізоляція $R_{w, dB}$ багат шарової звукоізолюючої панелі типу «сандвіч» у нормованому діапазоні частот

4 визначається як середнє значення значень звукоізолюючої здатності на її граничних частотах:

5 $R_{w, dB} = ((20 \lg k \cdot m \cdot f_n - 47.5) + (20 \lg k \cdot m \cdot f_h - 47.5)) / 2$ Результат розрахунку **$R_w = 73.066 \text{ dB}$**

6 де: $k = 1 \text{ м}^2 / (\text{кг} \cdot \text{Гц})$

7 нижня гранична частота f_n (=100 Гц) **100 Гц**

8 верхня гранична частота f_h (=3200 Гц) **3200 Гц**

9 середня поверхнева щільність матеріалу панелі «сандвіч» m , кг/м^2 **$m = 1866.79 \text{ кг/м}^2$**

10

11 $m = \rho_{\text{серед}} \cdot (d_1 + d_2 + d_3)$, кг/м^2

12

13 середня щільність «сандвічу» $\rho_{\text{серед}}$, кг/м^3

14 $\rho_{\text{серед}} = (\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \rho_3 \cdot V_3) / V_{\text{всього}} = (d_1 \cdot b \cdot \rho_1 + d_2 \cdot b \cdot \rho_2 + d_3 \cdot b \cdot \rho_3) / ((d_1 + d_2 + d_3) \cdot b) =$ **200**, кг/м^3

15 $(d_1 \cdot \rho_1 + d_2 \cdot \rho_2 + d_3 \cdot \rho_3) / (d_1 + d_2 + d_3)$, кг/м^3

16

17 **Вихідні дані для розрахунку**

18 (введіть Ваші вихідні дані в комірки, що обведені рамкою)

19

20 товщини 1-го, 2-го і 3-го шарів панелі

21 $d_1 =$ 0,003, м

22 $d_2 =$ 0,1, м

23 $d_3 =$ 0,003, м

24

25 l і b , м – відповідно, довжина і ширина звукоізолюючої панелі

26 $l =$ 6, м

27 $b =$ 3, м

28

29 щільності кожного шару $\rho_1; \rho_2; \rho_3$, кг/м^3

30 $\rho_1 =$ 2700, кг/м^3

31 $\rho_2 =$ 50, кг/м^3

32 $\rho_3 =$ 2700, кг/м^3

33

Матеріал	Щільність, кг/м^3	Швидкість подовжки
Алюміній	2700	5200
Сталь	7800	5500
Стекло силікатне	2600	5400
Стекло органічне	1200	2800
Бетон важкий	2200-2600	3700
Залізобетон	2200-2600	3700
Шлакобетон	1600-1800	4000
Бетон легкий	600-1300	1700
Гіпс	1200	2500
Гіпсобетон	1900	4000
Цегельна кладка	1600-1800	2500
Фанера	600-700	2700
Древесностружечні плити	600-700	1700
Пенополистирол	25	
Твердий піноплауретан	50	

Готово

Лист1

NUM

Рис. 3.11. Інтерфейс розробленої програми (версія задля ноутбуків та настільних комп'ютерів).

Як можливо бачити на рис. 3.11, представлена версія задля звичайної “Microsoft Excel” для користувачів із середньою технічною, або неповною вищою освітою. Для виконання комплексу складних і взаємопов’язаних розрахунків згідно з вищенаведеним алгоритмом потребується тільки ввести вихідні дані в комірки, що обведені рамкою.

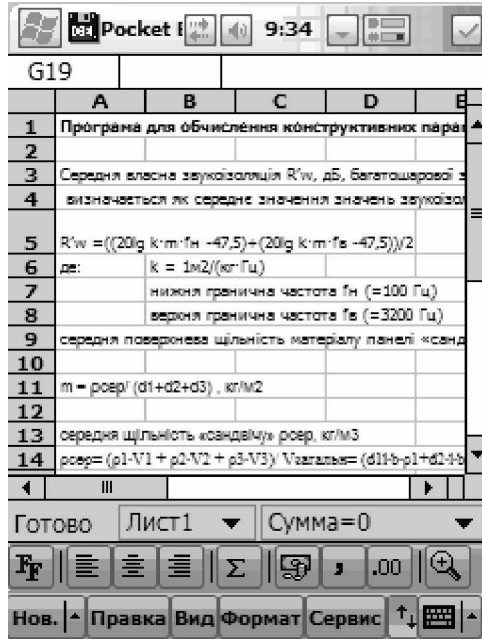


Рис. 3.12. Інтерфейс розробленої програми (версія задля кишенькових ПК (типу “Pocket PC”)).

Програмування задля кишенькових ПК, (що використовують ОС “Microsoft Pocket PC Windows 2003”), суттєво відрізняється від створення програм задля «звичайних» настільних комп’ютерів та ноутбуків. Як можливо бачити на рис. 3.12, представлена версія задля “Pocket Excel” для користувачів із середньою технічною, або неповною вищою освітою. Для виконання комплексу складних і взаємопов’язаних розрахунків згідно з вищенаведеним алгоритмом потребується тільки ввести вихідні дані в комірки, що обведені рамкою.

3.4. Індивідуальні засоби боротьби із шумом

У випадку неможливості зниження шуму до нормативного вищевказаними методами застосовуються

засоби індивідуального захисту - протишуми.



Рис. 3.13. Індивідуальні засоби боротьби із шумом за ГОСТ 12.4.051-87 підрозділяються на три типи.

Наушники й вкладиші також діляться за ГОСТ 12.4.051-87 на групи А,Б,В по їхній ефективності, в дБ в октавних смугах частот.

Деякі з них показано на рис. 3.14.

Найпростіший засіб захисту від шуму - ватний тампон, а найефективніший - так звані беруші ("бережи вуха"; "береги уши"- російською). Останні знижують сприйняття зовнішнього шуму у 4—6 разів. Але ці ЗІЗ мають подразнюючий вплив на слуховий апарат.

Засобом захисту можуть також стати заглушки у вигляді антифонів, які виконуються з гуми, пластмаси та інших матеріалів. Але вони малозручні, бо щільне (з натиском)

прилягання їх до вуха викликає почуття болю.

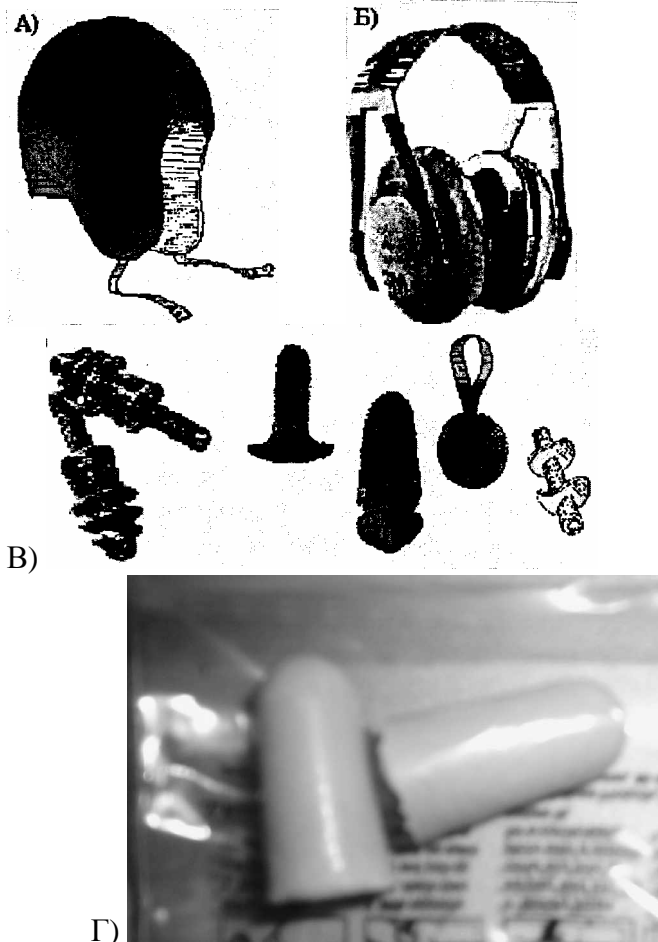


Рис. 3.14. Засоби індивідуального захисту: А – шолом; Б – навушники; В – беруші; Г – беруші (фотографія в упаковці).

Найширше застосовуються протишумні навушники, які зручні в експлуатації і добре ослаблюють шум у високочастотній частині спектру, а також шоломи, що закривають більшу частину голови і, як правило, попутно

захищають її не тільки від шуму, а й від холоду, ударів.

Їх доцільно використовувати для захисту людини від особливо інтенсивного шуму, коли він сприймається не тільки безпосередньо органом слуху, але й всім організмом у цілому. Орієнтовні дані про ефективність ЗІЗ наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Ефективність ЗІЗ різних видів

ЗІЗ	Зниження рівня шуму, дБ, у діапазоні, Гц			
	20-100	100-800	800-8000	Вище 8000
Вкладиші	5-20	20-35	30-40	30-40
Навушники	5-15	15-35	30-40	35-45
Навушники разом з вкладишами	15-25	25-45	30-60	40-60
Шоломи	2-7	7-20	20-55	30-55

3.5. Власні авторські розробки в галузі розробки індивідуальних засобів захисту від шуму

3.5.1. Головний телефон Абракітова згідно [182 - 184].

Пропонований прилад відноситься до області конструювання головних телефонів з підвищеними звукоізолюючими властивостями [185]. Він вирішує первісну проблему концентрації звукової енергії. Прилад може бути застосований в галузі охорони праці як високоефективний засіб індивідуального захисту органів слуху людини, що забезпечує значне зменшення виробничого або транспортного шуму на робочому місці. Навушники в ньому комбіновані з головним телефоном, що надає можливість не тільки зменшувати шум, що приходить ззовні, - але й прослуховувати музику та ін.

Відомий, наприклад, головний телефон, що містить два заповнених звукопоглинаючим матеріалом і вкладених один

в інший корпуси чашеобразної форми, випромінювач і амбушюр, закріплені на внутрішньому корпусі; вони з'єднані між собою по краях еластичним звуковбирним гофром і розташовані соосно один щодо іншого [181]. Недоліком його є низька якість звучання відтворених фонограм, обумовлена поганою звукоізоляцією такого телефону від сторонніх звуків, що проникають через його подвійний корпус, незважаючи на наявність шару звуковбирного матеріалу. Достатньою ефективністю звукоізоляції, що може стати пружної перешкоди на шляху поширення звуку, виконаної у виді твердого тіла, (у ролі який, наприклад, може виступати звуковбирний матеріал, що наповняє чашеобразні корпуси прототипу), у принципі, навіть бути створено не може; і зазначена деталь конструкції устрою-прототипу на практиці виявляється здатної лише трохи послабити енергію звукової хвилі. Вона лише зовсім незначним образом зменшує енергію звукової хвилі в корпусах телефону і не вирішує в корені вкрай насущну для даного виду пристроїв проблему звукоізоляції.

Задачу створення нашого винаходу [182] є підвищення звукоізоляції від сторонніх звуків, що проникають через подвійний корпус усередину телефону, за рахунок чого досягається підвищення якості звучання та ін.

Поставлена задача здійснюється за рахунок того, що головний телефон Абракітова, який містить два вкладених один в інший корпуси чашеобразної форми, причому внутрішній корпус заповнений звуковбирним матеріалом, має закріплені на ньому випромінювач і амбушюр; корпуси з'єднані між собою по краях пружною прокладкою і розташовані соосно з зазором один щодо іншого, згідно формули винаходу [182], передбачає, що в просторі між корпусами підтримується середній вакуум з умовою невеликого (на 1 - 2 мм) перевищення довжини вільного

пробігу молекул над найменшою відстанню між корпусами, а пружна прокладка при цьому є герметичною.

3.5.2. Конструктивне влаштування пристрою. Така конструкція забезпечує явище повного внутрішнього відбиття звуку, який попадає ззовні телефону на його зовнішній корпус, за рахунок чого забезпечується звукоізолююча здатність $R = +\infty$ дБ, і різко зростає якість звучання. Крім того, звук усередині головних телефонів також випробує повне внутрішнє відбиття і не виходить зсередини їх назовні, за рахунок чого забезпечується збільшення голосності відтвореної фонограми.

Варто помітити, що еластичний гофр прототипу [181] еквівалентний пружній прокладці пропонованого винаходу [182]. Заміна зазначеного звуковбирного гофра прототипу пружною герметичною прокладкою винаходу дозволяє здійснити вакуумування внутрішнього простору між корпусами, і підтримувати в ньому вакуум протягом усього періоду експлуатації телефону. Заміна звуковбирного матеріалу прототипу в зазначеному просторі між двома корпусами телефону середнім вакуумом з невеликим (на 1 - 2 мм) перевищенням довжини вільного пробігу молекул над найменшою відстанню (зазором) між корпусами дозволяє різко підвищити звукоізолюючу здатність телефону до гранично можливого значення $R = +\infty$ дБ, фактично домігшись у ньому здійснення фізичного явища повного внутрішнього відбиття.

На кресленні представлено конструктивне влаштування головного телефону Абракітова. Телефон конструктивно складається з зовнішнього корпусу 1, чашеобразної форми, і внутрішнього корпусу 2, також чашеобразної форми, вкладених один в інший і з'єднаних між собою пружною прокладкою 3, що герметизує.

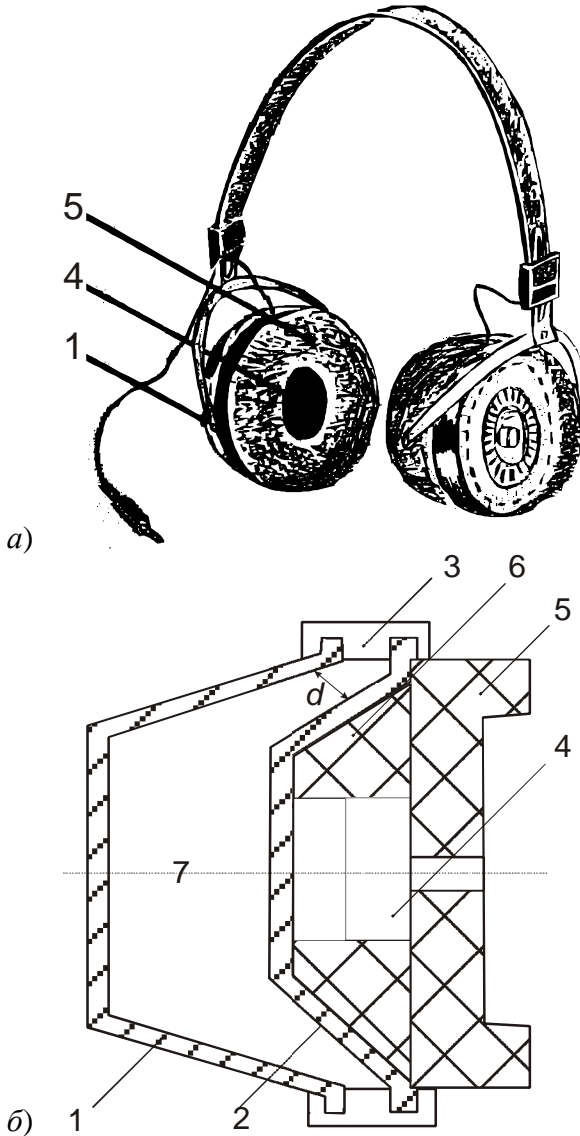


Рис. 3.15. Головний телефон Абракітова [182]: *a* - зовнішній вигляд (дизайн) стереотелефонів; *б* - переріз: 1 - зовнішній корпус чашеобразної форми; 2 - внутрішній корпус чашеобразної форми; 3 - пружна прокладка, що герметизує; 4 - випромінювач акустичного

сигналу; 5 - амбушюр; 6 - звуковбирний матеріал; 7 - вакуумований простір (з дотриманням умови $l > d$).

Простір між дном внутрішнього чашеобразного корпусу 2 та закріпленим на ньому випромінювачем 4 і амбушюром 5 з м'якого матеріалу, що формується, заповнений звуковбирним матеріалом 6. Простір між зовнішнім корпусом 1 і внутрішнім корпусом 2, обмежений по краях пружною прокладкою, яка герметизує 3, являє собою вакуумований обсяг 7, де створений і підтримується середній вакуум з умовою невеликого (на 1 - 2 мм) перевищення довжини вільного пробігу молекул над найменшою відстанню між корпусами 1 і 2.

3.5.3. Принцип дії пристрою. Для високоякісного відтворення, - чи, краще сказати, сприйняття відтвореної фонограми сторонні звуки (шуми) не мають ніякого значення, оскільки в пропонованому пристрої відбувається їхнє повне внутрішнє відбиття, і, таким чином, вони "відкидаються" від зовнішнього корпусу 1 назад у навколишнє середовище, відкіля вони і прийшли. За рахунок цього позитивного ефекту різко поліпшується якість звучання. Крім того, аналогічним образом відбувається відбиття звуків відтвореної фонограми і від внутрішнього корпусу 2, за рахунок чого збільшується їхня голосність; а стороннім слухачам почути відтворену в ньому фонограму ззовні головного телефону Абракітова, надягнутого на слухові аналізатори людини, не представляється можливим, тобто носіння таких стереофонічних телефонів (у т.ч. і молоддю) не викликає шумового забруднення навколишнього середовища, і не заважає навколишнім, ніяк не створюючи для них небажаних проблем акустичного, психологічного, педагогічного чи етичного характеру.

3.5.4. Додаткові відомості. Корпуси 1 і 2 і пружна прокладка 3, що герметизує, зроблені з урахуванням

вимог, пропорованих до пристроїв вакуумної техніки. Таким чином, конструктивне виконання зазначених елементів забезпечує за рахунок підбору необхідної товщини стінок довгострокову механічну міцність, і герметичність, що є достатньою для підтримки в просторі 7 середнього вакууму протягом усього періоду експлуатації головного телефону, – причому пружна прокладка, що герметизує, 3 може бути виготовлена з вакуумної гуми, застосовуваної для ущільнення з'єднань у відомих пристроях вакуумної техніки, чи ж іншого матеріалу (лавсан, пластик і т.п.). Інші ж елементи конструкції адекватні застосовуваним у відомих конструкціях головних телефонів.

Головний телефон може бути застосований в галузі охорони праці в якості високоефективного засобу індивідуального захисту слуху людини від негативної дії виробничого шуму (у відповідності до вимог [186]). Застосування головних телефонів Абракітова, особливо в стереофонічному варіанті (тобто два телефони закріплені на оголовку) дозволяє забезпечити незрівнянно найвищу якість звучання відтворених фонограм, і здатне внести свою посильну лепту в загальний відсоток зниження акустичного забруднення довкілля.

Таблиця 3.2

Технічні характеристики дослідного зразку

Назва характеристики	Значення	Одиниця
Номінальний діапазон частот	20-20000	Гц
Номінальний електричний опір	100	Ом
Номінальна вихідна потужність	0,1	мВт
Максимальна вихідна потужність	150	мВт
Коефіцієнт гармонічних викривлень, не більш	1	%

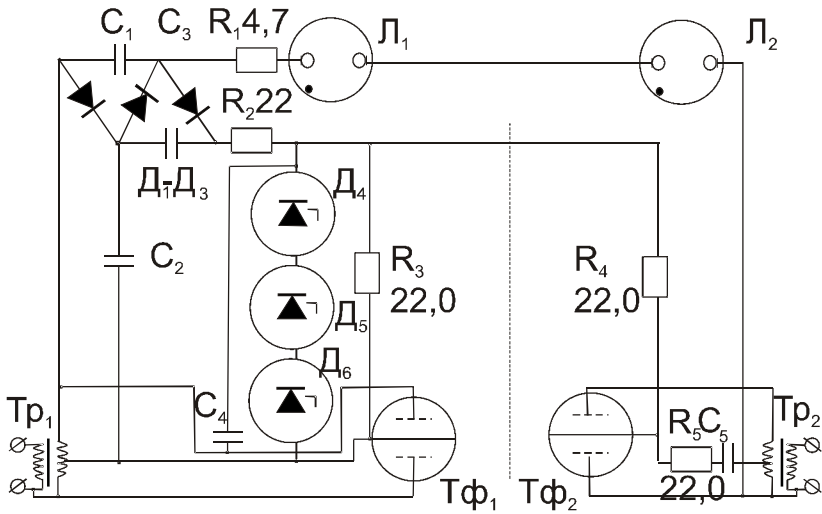


Рис. 3.16. Схема включення головного телефону (стерео).

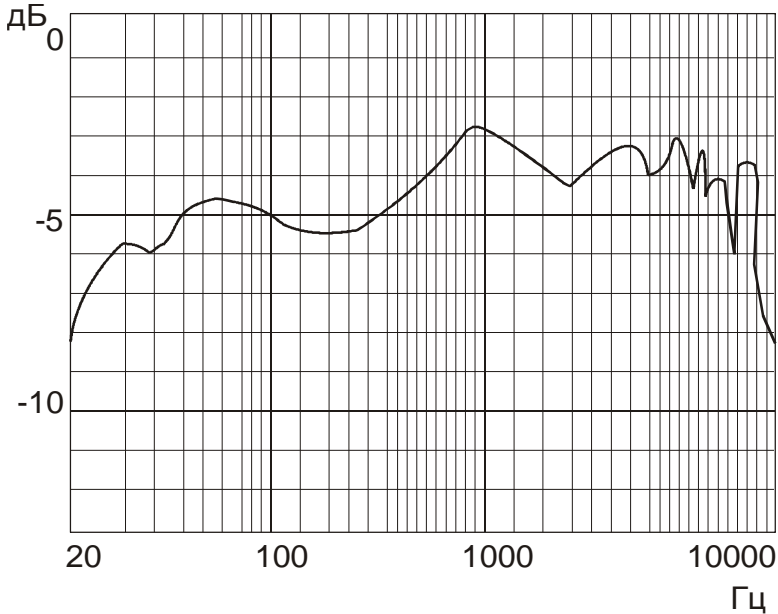


Рис. 3.17. Частотні характеристики дослідного зразку нашого винаходу.

ЧАСТИНА 4. МОДЕЛЮВАННЯ В АКУСТИЦІ

4.1. Загальна уява про різновиди моделей та роль моделювання

4.1.1. *Стисла історія моделювання.* Моделювання як пізнавальний прийом невіддільно від розвитку знання. Власне кажучи, моделювання як форма відбиття дійсності зароджується в античну епоху одночасно з виникненням наукового пізнання. Однак у виразній формі (хоча без уживання самого терміна) моделювання починає широко використовуватися в епоху Відродження. Брунеллески, Мікеланджело й інші італійські архітектори й скульптори користувалися моделями проєктованих ними споруджень; у теоретичних роботах Г. Галілея й Леонардо да Вінчі не тільки використовуються моделі, але й з'ясовуються межі застосовності методу моделювання. І. Ньютон користується цим методом уже цілком усвідомлено, а в 19-20 ст. важко назвати галузь науки або її додатків, де моделювання не мало б істотного значення; винятково більшу методологічну роль зіграли щодо цього роботи Кельвіна, Дж. Максвелла, Ф. А. Кекуле, А. М. Бутлерова й інших фізиків і хіміків - саме ці науки стали, можна сказати, класичними "полігонами" методів моделювання. Поява ж перших електронних обчислювальних машин (Дж. Нейман, 1947) і формулювання основних принципів кібернетики (Н. Вінер, 1948) привели до воістину універсальної значимості нових методів - як в абстрактних областях знання, так й у їхніх додатках. Моделювання нині придбало загальнонауковий характер і застосовується в дослідженнях живої й неживої природи, у науках про людину й суспільство. Моделювання глибоко проникає в теоретичне мислення. Більше того, розвиток будь-якої науки в цілому можна трактувати - у досить загальному, але цілком розумному змісті, - як "теоретичне моделювання". Важлива пізнавальна функція моделювання

полягає в тому, щоб служити імпульсом, джерелом нових теорій. Нерідко буває так, що теорія спочатку виникає у вигляді моделі, що дає наближене, спрощене пояснення явища, і виступає як первинна робоча гіпотеза, яка може перерости в попередню теорію - попередницю розвинутої в подальшому теорії. При цьому в процесі моделювання виникають нові ідеї й форми експерименту, відбувається відкриття раніше невідомих фактів. Таке "переплетення" теоретичного й експериментального моделювання особливо характерно для розвитку фізичних теорій.

4.1.2. *Моделювання – як спосіб пізнання навколишнього світу.* Моделлю називається спеціально створений об'єкт, що відображає деякі властивості досліджуваного об'єкта. Поняття моделювання є гносеологічною категорією, яка характеризує один з важливих шляхів пізнання. Можливість моделювання, тобто переносу результатів, отриманих у ході побудови й дослідження моделей, на оригінал, заснована на тій обставині, що модель у певному змісті відображає (відтворює, моделює) які-небудь його риси; при цьому таке відображення (і пов'язана з ним ідея подібності) засновано, (явно або неявно), на точних поняттях ізоморфізму або гомоморфізму (або їхніх узагальненнях) між досліджуваним об'єктом і деяким іншим об'єктом "оригіналом" і часто здійснюється шляхом попереднього дослідження (теоретичного або експериментального) того й іншого.

Таким чином, моделювання – одна з основних категорій пізнання: на ідеї моделювання, власне кажучи, базується будь-який метод наукового дослідження – як теоретичний (при який використовуються різного роду знакові, абстрактні моделі), так і експериментальний (що застосує предметні моделі). У вузькому, загальноживаному змісті під цим поняттям мається дослідження яких-небудь явищ, процесів, систем чи об'єктів шляхом побудови і вивчення

їхніх моделей; використання моделей для визначення чи уточнення характеру і раціоналізації способів побудови об'єктів; а під моделлю, відповідно, розуміється, модель-пристрій, що відтворює якусь конструкцію, що вона імітує, або саме дію цієї конструкції. У широкому змісті модель – будь-який образ чи аналог (уявний чи умовний: зображення, опис, схеми, креслення, графік, план, карта) об'єкта, процесу чи явища (“оригіналу” даної моделі) в якості його заміни, використовуваний на початку.

Моделювання при тому являє собою не формалізовану процедуру, а пошук з елементами евристики [187 - 188].

Тому для успішного моделювання корисна наявність уже сформованих теорій досліджуваних явищ, або хоча б задовільно обґрунтованих теорій і гіпотез, що вказують гранично припустимі при побудові моделей спрощення. Результативність моделювання значно зростає, якщо при побудові моделі й переносі результатів з моделі на оригінал можна скористатися деякою такою теорією, що уточнює ідею подібності, пов'язану з використовуваною процедурою моделювання. Для явищ однієї й тієї ж фізичної природи така теорія, заснована на використанні поняття розмірності фізичних величин, добре розроблена. Але для моделювання складних систем і процесів, аналогічна теорія, звичайно, ще не розроблена, чим й обумовлений інтенсивний розвиток теорії великих систем - загальної теорії побудови моделей складних динамічних систем живої природи, техніки й соціально-економічної сфери.

4.1.3. Подібність явищ, процесів, об'єктів при моделюванні. Згідно [116], моделювання є метод дослідження складних процесів на моделях із застосуванням методів теорії подібності (що вивчає умови подоби фізичних явищ) при постановці й обробці експерименту. Відповідно до неї [116] два явища

називаються подібними, якщо всі кількісні характеристики одного з них виходять з відповідних їхніх кількісних характеристик іншого шляхом множення їх на постійні числа (константи подібності, називані також «масштабами моделювання»), однакові для всіх однорідних величин, якщо вони якісно однакові і характеризуються рівним значеннями деяких безрозмірних параметрів (визначальних критеріїв подібності), складених з фізичних і геометричних величин, що характеризують ці явища.

Основною умовою вірогідності при цьому виступає так називаний ідентифікатор подібності натурних явищ, і явищ, що моделюються: фізичні явища, процеси чи системи подібні, якщо в подібних точках простору, у подібні моменти часу окремі величини, що характеризують стан системи, пропорційні відповідним величинам іншої системи. При побудові моделей використовують критерії подібності, чи безрозмірні числа, складені з розмірних фізичних параметрів, що визначають розглянуті фізичні явища (див. вище). Найпростішим, відомим усім прикладом критерію подібності є, зокрема, масштаб географічної карти чи плану - дріб, чисельник якого дорівнює одиниці, а знаменник – числу, що показує зменшення зображення (моделі) відносно його ж натурним розмірам. Вимоги теорії подібності повинні бути належним чином враховані при побудові будь-якої модельної системи.

4.1.4. *Різновиди моделей, що існують.* Вивчення якогось процесу методом аналогії здійснюється шляхом експериментального дослідження якісного іншого фізичного процесу, описуваного таким же за формою математичними рівняннями (так називане "математичне моделювання", на відміну від "фізичного", при якому фізичні процеси однакові). При цьому передбачається, що всі процеси (повна подібність) чи найбільш істотні

(локальна подібність) у будь-який момент часу дослідження й у будь-якій точці відрізняються від відповідних параметрів натурального явища у визначене число раз. Як видно з прикладеної схеми, існує три способи досліджень:

- 1) теоретичні;
- 2) модельні;
- 3) експериментальні.

Моделі займають проміжне положення між діаметрально протилежними один одному експериментальними і теоретичними способами досліджень, служачи свого роду «містком» між ними.

Моделювання завжди використовується разом з ін. загальнонауковими й спеціальними методами. Насамперед, моделювання тісно пов'язане з експериментом. Вивчення якого-небудь явища на його моделі (при предметному, знаковому моделюванні, моделюванні на ЕОМ) можна розглядати як особливий вид експерименту: "модельний експеримент", що відрізняється від звичайного ("прямого") експерименту тим, що в процес пізнання включається "проміжна ланка" - модель, що є одночасно й засобом, і об'єктом експериментального дослідження, що заміняє досліджуваний об'єкт. Модельний експеримент дозволяє вивчати такі об'єкти, прямий експеримент над якими утруднений, економічно не вигідний, або взагалі неможливий у силу тих або інших причин (моделювання унікальних споруджень, складних промислових комплексів, економічних систем, соціальних явищ, процесів, що відбуваються в космосі, конфліктів і бойових дій й ін.).

Дослідження знакових (зокрема, математичних) моделей також можна розглядати як деякі експерименти ("експерименти на папері", розумові експерименти). Це стає особливо очевидним у світлі можливості їхньої

реалізації засобами електронної обчислювальної техніки. Один з видів модельного експерименту - модельно-кібернетичний експеримент, у ході якого замість "реальних" експериментальних операцій з досліджуваним об'єктом знаходять алгоритм (програму) його функціонування, який (яка) і виявляється своєрідною моделлю поведінки об'єкта. Уводячи цей алгоритм у цифрову ЕОМ й, як говорять, "програючи" його, одержують інформацію про поведінку оригіналу в певній середовищі, про його функціональні зв'язки з мінливим "середовищем перебування", та ін.

Таким чином, можна насамперед розрізнити "матеріальне" (предметне) і "ідеальне" моделювання; перше можна трактувати як "експериментальне", друге - як "теоретичне" моделювання, хоча таке протиставлення, звичайно, досить умовне не тільки в силу взаємозв'язку й обопільного впливу цих видів моделювання, але й в силу наявності таких "гібридних" форм, як "уявний експеримент". "Матеріальне" моделювання підрозділяється, як було сказано вище, на фізичне й предметно-математичне моделювання, а частковим випадком останнього є аналогове моделювання. Далі, "ідеальне" моделювання може відбуватися як на рівні самих загальних, (може бути навіть не до кінця усвідомлених і фіксованих), "модельних подань", так і на рівні досить деталізованих знакових систем; у першому випадку говорять про уявне (інтуїтивне) моделювання, у другому - про знакове моделювання (найважливіший і найпоширеніший вид його - логіко-математичне моделювання). Нарешті, моделювання на ЕОМ (часто іменоване "кібернетичним") є "предметно-математичним за формою, знаковим по змісту".

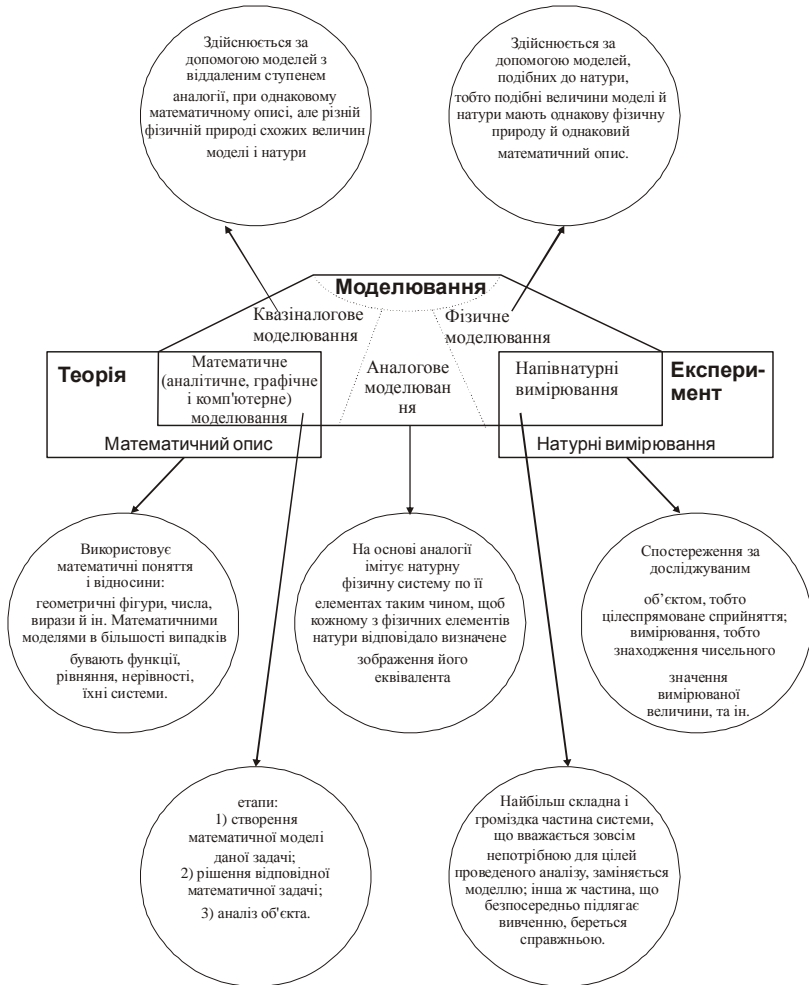


Рис. 4.1. Моделі, - як метод наукового пізнання, та їхні різновиди. Не всі з них знайшли застосування в акустиці. Класифікація методів моделювання, застосовуваних в акустиці, надана автором (первісно) в [189] та (вже сучасна) в монографії [58].

Предметним називається моделювання, в ході якого дослідження ведеться на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні й функціональні

характеристики "оригіналу". На таких моделях вивчаються процеси, що відбуваються в оригіналі - об'єкті дослідження або розробки (вивчення на моделях властивостей будівельних конструкцій, різних механізмів, транспортних засобів і т.п.). Якщо модель і об'єкт, що моделюється, мають ту саму фізичну природу, то говорять про фізичне моделювання. Явище (система, процес) може досліджуватися й шляхом експериментального вивчення яких-небудь явища іншої фізичної природи, але такого, що воно описується тими ж математичними співвідношеннями, що й явище, що моделюється. Наприклад, механічні й електричні коливання описуються тими самими диференціальними рівняннями; тому за допомогою механічних коливань можна моделювати електричні, й навпаки. Таке "предметно-математичне" моделювання широко застосовується для заміни вивчення одних явищ вивченням інших явищ, більше зручних для лабораторного дослідження, зокрема тому, що вони допускають вимір невідомих величин (аналогове моделювання). Так, електричне моделювання дозволяє вивчати на електричних моделях механічні, гідродинамічні, акустичні й інші явища. Електричне моделювання лежить в основі т.зв. аналогових обчислювальних машин.

При знаковому моделюванні моделями служать знакові утворення якого-небудь виду: схеми, графіки, креслення, формули, графи, слова й пропозиції в деякому алфавіті (природної або штучної мови).

Найважливішим видом знакового моделювання є математичне (логіко-математичне) моделювання, здійснюване засобами мови математики й логіки. Знакові утворення і їхні елементи завжди розглядаються разом з певними перетвореннями, операціями над ними, які виконує людина або машина (перетворення математичних,

логічних, хімічних формул, перетворення станів елементів цифрової машини, що відповідають знакам машинної мови, і ін.). Сучасна форма "матеріальної реалізації" знакового (насамперед, математичного) моделювання - це моделювання на цифрових електронних обчислювальних машинах, універсальних і спеціалізованих. Такі машини - це свого роду "чисті бланки", на яких у принципі можна зафіксувати опис будь-якого процесу (явища) у вигляді його програми, тобто системи правил, закодованої машинною мовою, впливаючи з якої машина може "відтворити" хід процесу, що підлягає моделюванню.

Дії зі знаками завжди тією чи іншою мірою пов'язані з розумінням знакових утворень й їхніх перетворень: формули, математичні рівняння й т.п. вираження наукової мови, застосовуваної при побудові моделі, певним чином інтерпретуються (витлумачуються) у поняттях тієї предметної області, до якої ставиться оригінал. Тому реальна побудова знакових моделей або їхніх фрагментів може замінятися уявно-наочним поданням знаків й (або) операцій над ними. Цей різновид знакового моделювання іноді називається «уявним моделюванням». Втім, цей термін часто застосовують для позначення "інтуїтивного" моделювання, що не використовує ніяких чітко фіксованих знакових систем. Таке моделювання є неодмінною умовою будь-якого пізнавального процесу на його початковій стадії.

За характером тієї сторони об'єкта, що піддається моделюванню, доречно розрізнити моделювання структури об'єкта й моделювання його поведження (функціонування процесів, що протікають у ньому, і т.п.). Це розрізнення суцього відносно для хімії або фізики, але воно набуває чіткого сенсу в науках про життя, де розрізнення структури й функції систем живого належить до числа фундаментальних методологічних принципів дослідження,

і в кібернетиці, яка робить акцент на моделюванні функціонування досліджуваних систем. При "кібернетичному" моделюванні звичайно абстрагуються від структури системи, розглядаючи її як "чорний ящик", опис (модель) якого будується в термінах співвідношення між станами його (її): (тобто опису або (моделі)) "входів" й "виходів" ("входи" відповідають зовнішнім впливам на досліджувану систему, "виходи" - реакціям на них, тобто поведженню).

Для ряду складних явищ (наприклад, турбулентності, пульсацій в областях відриву потоку й т.п.) користуються стохастичним моделюванням, заснованим на встановленні ймовірностей тих або інших подій. Такі моделі не відбивають весь хід окремих процесів у даному явищі, які носять випадковий характер, а визначають деякий середній, сумарний результат.

* * *

Моделювання - не тільки один із засобів відображення явищ і процесів реального миру, але й - незважаючи на описану вище його відносність - об'єктивний практичний критерій перевірки істинності наших знань, здійснюваної безпосередньо або за допомогою встановлення їхніх відносин до іншої теорії, що виступає як модель, адекватність якої вважається практично обґрунтованою. Застосовуючись в органічній єдності з іншими методами пізнання, моделювання виступає як процес поглиблення пізнання, його руху від відносно бідних інформацією моделей до моделей більше змістовних, що повніше розкриває сутність досліджуваних явищ дійсності.

Роль моделювання при вивченні шкідливого впливу об'єктів техніки на людину, принципи й варіанти побудови моделей таких об'єктів розглянуті в роботі [190, с.20], де прямо зазначено: *"Использование визуальных моделей позволяет представить разработчику эффективных"*

технических решений все факторы в их взаимосвязи, влияющие на экологическое равновесие ... В связи с этим требуется максимальный охват моделированием всех объектов, задач и проблем." Завдання аналізу та прогнозування шумового режиму практично на будь-якому об'єкті, у т.ч. завдання оцінки ефективності шумозахисних заходів та засобів, може бути зведене до побудови моделі, що відповідним чином відбиває поведінку натурального об'єкту (та натурних явищ та процесів, що характерні для нього).

4.2. Чи існує потреба в моделюванні звукових явищ в акустиці?

Краще всього буде відповісти на це питання прямою цитатою з [191]:

«Раздел проекта звукоизоляции и акустика

Раздел "Защита от шума и вибраций" или "Защита окружающей среды" или "Акустическое моделирование системы звукового обеспечения" устанавливается СНиПами как обязательный, для большого числа объектов нового строительства или реконструкции.

Акустические расчеты могут выполняться, как для отдельных систем, помещений или единиц оборудования, так и для всего сооружения в целом.

Проект защиты от шума и вибраций учитывает следующие источники шума:

- технологическое оборудование*
- оборудование вентиляции и кондиционирования и других инженерных систем*
- прочие внутренние источники шума*
- внешние источники шума*

Акустический расчет выполняется для всех нормируемых зон и помещений:

- жилые помещения*

- постоянные и непостоянные рабочие места
- селитебная территория (территория жилой застройки, учебных и медицинских учреждений и зон отдыха)

По технологии реализации расчеты выполняются по следующим разделам:

1. Акустический расчет требуемой звукоизоляции воздушного шума ограждающими конструкциями.
2. Акустический расчет требуемой звукоизоляции ударного шума перекрытиями.
3. Расчет акустической виброизоляции технологического и другого оборудования.
4. Акустический расчет шумов, проникающих по каналам систем вентиляции и кондиционирования.
5. Акустический расчет мероприятий по защите от шума на рабочих местах.
6. Расчет дополнительных мероприятий по защите селитебной территории.

В некоторых случаях в проекте даются рекомендации по замене предполагаемого оборудования на менее шумное

Акустическое моделирование заключается в разработке модели озвучиваемого объекта (в специальных компьютерных программах или в ручном графическом виде), учитывающей акустические свойства объекта и характеристики устанавливаемой аппаратуры.

Акустическое моделирование используется:

- в процессе разработки архитектурного проекта
- для выработки решений по оптимизации акустических свойств существующих объектов- как источник исходных данных для электроакустического проектирования.»

Додаємо до цього ще уривок з [192]: «...Решение трудноразрешимых проблем акустики. Достоверность и скорость расчета – это два крайне важных свойства для успешного применения акустического моделирования в разработке серийной продукции. Результаты

моделирования должны быть своевременно введены обратно в проект. Недельный срок, необходимый на расчеты, должен быть сокращен до одной ночи или даже до одного часа...»

Навіть морські акваторії підлягають акустичному моделюванню [193]: *«При проведении экспериментальных исследований по распространению звука в море практически всегда встает вопрос о модели акватории, в которой проводятся измерения. Модель необходима для интерпретации полученных результатов и для прогнозирования акустических полей каких-либо источников звука в этой акватории. Под термином "акустическое моделирование" понимается подбор адекватной району гидроакустических измерений математической модели. Математическая модель включает в себя два элемента: 1) метод расчета поля (лучевой, волновой или др.), воплощенный в конкретную вычислительную программу, и 2) собственно модель акватории, т.е. совокупность значений параметров, характеризующих дно, водную толщу и поверхность моря...»*

Існує навіть «Учебная программа курса "Физическое моделирование распространения и рассеяния акустических волн в неоднородных средах» [194].

В цілому слід вважати, що питання моделювання акустичних явищ в наш час вважаються дуже актуальними [195 - 198].

4.3. Фізичне моделювання акустичних процесів

Такий вид моделювання складається в заміні вивчення деякого об'єкта чи явища експериментальним дослідженням його моделі, що має ту ж фізичну природу. У науці будь-який експеримент, виконаний для виявлення тих чи інших закономірностей досліджуваного явища чи для перевірки правильності і границь застосовності

результатів, знайдених теоретичним шляхом, власне кажучи, представляє собою моделювання, тому що об'єктом експерименту є конкретна модель, яка володіє необхідними фізичними властивостями, а в ході експерименту повинні виконуватися основні вимоги, запропоновані до фізичного моделювання. У техніці фізичне моделювання використовується при проектуванні і спорудженні різних об'єктів для визначення на відповідних моделях тих чи інших властивостей (характеристик) як об'єкта в цілому, так і окремих його частин. До фізичного моделювання прибігають не тільки по економічних розуміннях, але і тому, що натурні експерименти дуже важко чи взагалі неможливо здійснити, коли занадто великі (малі) розміри натурального чи об'єкта значення інших його характеристик (тиску, температури, швидкості протікання процесу і т.п.).

В основі фізичного моделювання лежать теорія³

³ «...Подобия теория, учение об условиях подобия физических явлений. П. т. опирается на учение о размерностях физических величин (см. *Размерностей анализ*) и служит основой моделирования физического. Предметом П. т. является установление подобия критериев различных физических явлений и изучение с помощью этих критериев свойств самих явлений.

Физические явления, процессы или системы подобны, если в сходственные моменты времени в сходственных точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одной системы, пропорциональны соответствующим величинам другой системы. Коэффициенты пропорциональности для каждой из величин называется коэффициентом подобия.

Физическое подобие является обобщением элементарного и наглядного понятия геометрического подобия. При геометрическом подобии существует пропорциональность (подобие) сходственных геометрических элементов подобных фигур или тел. При физическом подобии поля соответствующих физических параметров двух систем подобны в пространстве и времени. Например, при кинематическом подобии существует подобие полей скорости для двух рассматриваемых движений; при динамическом подобии реализуется подобие систем действующих сил или силовых полей различной физической природы (силы тяжести, силы давления, силы вязкости и т.п.); механическое подобие (например, подобие двух потоков жидкости или газа, подобие двух упругих систем и т.п.) предполагает наличие геометрического, кинематического и динамического подобий; при подобии тепловых процессов подобны соответствующие поля температур и тепловых потоков; при электродинамическом подобии — поля токов, нагрузок, мощностей, поля электромагнитных сил. Все перечисленные виды подобия — частные случаи физического подобия.

подібності (в виносці надаємо цитату з [199] з дуже скороченими відомостями про це) і аналіз розмірностей [200].

Необхідними умовами фізичного моделювання є геометрична подібність (подібність форми) і фізична подібність моделі і природи: у еквівалентні моменти часу й у еквівалентних точках простору значення змінних величин, що характеризують явища для природи, повинні бути пропорційні значенням тих же величин для моделі [201]. Наявність такої пропорційності дозволяє робити перерахування експериментальних результатів, одержуваних для моделі, на природу шляхом множення кожної з обумовлених величин на постійний для усіх величин даної розмірності множник - коефіцієнт подоби [202].

Оскільки фізичні величини зв'язані визначеними співвідношеннями, які впливають із законів і рівнянь фізики, – то, вибравши деякі з них за основні, можна виразити коефіцієнти подібності для всіх інших похідних

С развитием исследованй сложных физических и физико-химических процессов, включающих механические, тепловые и химические явления, развиваются и методы П. т. для этих процессов, например, устанавливаются условия подобия процессов трения и износа деталей машин, кинетики физико-химических превращений и др. явлений. Пропорциональность для подобных явлений всех характеризующих их параметров приводит к тому, что все безразмерные комбинации, которые можно составить из этих параметров, имеют для подобных явлений одинаковые численные значения. Безразмерные комбинации, составленные из определяющих параметров рассматриваемых явлений, называются критериями подобия. Любая комбинация из критериев подобия также представляет собой критерий подобия рассматриваемых физических явлений.

Если в рассматриваемых физических явлениях или системах существует равенство не всех, а лишь некоторых независимых критериев подобия, то говорят о неполном, или частичном, подобии. Такой случай наиболее часто встречается на практике. При этом существенно, чтобы влияние на протекание рассматриваемых физических процессов критериев, равенство которых не соблюдается, было незначительным или малосущественным.

Размерные физические параметры, входящие в критерии подобия, могут принимать для подобных систем сильно различающиеся значения; одинаковыми должны быть лишь безразмерные критерии подобия. Это свойство подобных систем и составляет основу моделирования...»

величин через коефіцієнти подібності величин, прийнятих за основні. З наявності таких зв'язків випливає, що для даного фізичного явища деякі безрозмірні комбінації величин, які характеризують це явище, повинні мати для моделі і природи те саме значення. Ці безрозмірні комбінації фізичних величин називаються критеріями подоби. Рівність усіх критеріїв подоби для моделі і природи є необхідною умовою фізичного моделювання. Однак домогтися цієї рівності можна не завжди, тому що не завжди вдається одночасно задовольнити всім критеріям подібності.

Як про це сказано в [203]: *«...Когда при М. ф. необходимо обеспечить равенство нескольких критериев, возникают значительные трудности, часто непреодолимые, если только не делать модель тождественной натуре, что фактически означает переход от М. ф. к натурным испытаниям. Поэтому на практике нередко прибегают к приближённому моделированию, при котором часть процессов, играющих второстепенную роль, или совсем не моделируется, или моделируется приближённо. Такое М. ф. не позволяет найти прямым пересчётом значения тех характеристик, которые не отвечают условиям подобия, и их определение требует соответствующих дополнительных исследований.»* (В даній цитаті скорочення «М.ф.» згідно з розшифровкою в тексті самого джерела [203] означає «фізичне моделювання»).

Фізичне моделювання здійснюється за допомогою моделей, подібних до природи, тобто подібні величини моделі й природи мають однакову фізичну природу й однаковий математичний опис. При цьому зберігаються особливості натурального експерименту, але полегшується одержання результатів, тому що первісно обрані зручні діапазони виміру фізичного поля. Стосовно до акустичного

моделювання з метою боротьби із шумом здійснюються два різновиди моделювання:

– моделювання процесів випромінювання (або джерел шуму) [204 - 208],

– моделювання процесів поширення звуку [209].

Основну увагу при фізичному моделюванні слід звернути на дотримання вимог подібності між моделлю та натурою, оскільки модель в будь-якому разі являє собою будь-який спрощений еквівалент натурального об'єкту, процесу, явища [58, 210 - 212].

Відомий спосіб досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, відповідно до якого при цьому висуваються наступні вимоги подібності [128, 213]:

1. Геометрична подібність моделі натурі (що досягається шляхом виготовлення зменшеної чи збільшеної у c_L разів моделі, яка зберігає особливості, розташування, конфігурацію і т.п. ознаки елементів, подібних до натурних, (де $c_L = n:1; \dots; 2:1; 1:1; 1:2; \dots; 1:n$)- масштаб лінійних розмірів).

Лінійні розміри моделі L_M зв'язані з лінійними розмірами натурі L_N співвідношенням:

$$L_M = c_L \cdot L_N, \text{ м}, \quad (4.1)$$

де c_L - константа подібності (див. вище).

Площі моделі S_M і натурі S_N зв'язані співвідношенням:

$$S_M = c_L^2 S_N, \text{ м}^2, \quad (4.2)$$

Адекватні обсяги в моделі і натурі зв'язані як:

$$V_M = c_L^3 V_N, \text{ м}^3. \quad (4.3)$$

2. Дотримання рівності відносин лінійних розмірів L до довжини хвилі λ у моделі (індекс $_M$) і в натурі (індекс $_N$) (що досягається шляхом зміни довжини хвилі λ_M і частоти f_M звуку в моделі стосовно натурних λ_N і f_N) при рівності швидкості розповсюдження звуку в моделі c_M та натурі c_N . Тобто, при побудові такої моделі мислено вважаємо, що

звук в моделі розповсюджується з такою ж швидкістю, як і в природі. Вимоги подібності наведено згідно з [209]:

$$\begin{cases} \lambda_m = \lambda_n \cdot c_L, \text{ м,} \\ f_m = f_n / c_L, \text{ Гц,} \\ c_m = c_n, \text{ м/с.} \end{cases} \quad (4.4)$$

У загальному випадку умови (4.1) та (4.4) не зовсім коректні [214, 215]. Вони діють тільки при наявності останнього, третього пункту з вищезгаданої системи рівнянь (4.4). Покажемо, що в цієї триєдності має рацію, а що - ні. Насправді, для моделювання явища дифракції необхідно дотриматися подібності відносин лінійних розмірів досліджуваного об'єкта до довжини хвилі натурального випромінювання й аналогічного відношення відповідних параметрів моделі:

$$L_n / \lambda_n = L_m / \lambda_m, \quad (4.5)$$

де L_n і L_m - розміри моделі відповідно в природі й моделі, м, (див. вище); λ_n, λ_m - довжина хвилі відповідно в природі і моделі, м.

(4.5) своїм чином є вираженням якогось поєднання (4.1) та (4.4), оскільки зв'язує між собою вимоги подібності лінійних розмірів (4.1), довжин хвиль (4.4), швидкостей розповсюдження та частот (4.4).

Для дотримання цієї вимоги при умові основної залежності (4.1) при дотриманні умови рівності швидкості розповсюдження звуку в моделі c_m та природі c_n потрібно змінити довжину хвилі джерела випромінювання (на моделі). Це значить, що при зменшенні моделі щодо природи доводиться переходити в область короткохвильових випромінювань, а при збільшенні - у довгохвильову область. При недотриманні цієї немаловажної умови не дотримується подібність в явищах

дифракції.

3. Дотримання рівності імпедансів у моделі й у натурі. Як указується, наприклад, у [216], ця вимога практично нездійсненна і на практиці замінюється рівністю коефіцієнтів звукопоглинання $\alpha_m = \alpha_n$ (що досягається шляхом підбора при конструюванні моделі адекватних матеріалів задля виготовлення подібних натурним (за призначенням) поверхонь в моделі, що відбивають енергію, кутів падіння звуку і т.п.).

Відомими загальновизнаними недоліками фізичного моделювання є:

- за п. 1 - складність випромінювання й особливо прийому (реєстрації) випромінювання звуку, що моделюється (наприклад, у масштабі $c_L = 1:10$ обсяг мікрофонного капсуля повинен бути зменшений у 1000 разів стосовно натурального). Докладно це розглянуто автором в роботі [209].

- за п. 2 - як правило, під фізичним моделюванням в акустиці розуміють саме *“крупномасштабное моделирование на акустических полигонах и заглушенных камерах”* згідно з [209]; оскільки зменшення масштабу моделі менше $c_L = 1:20$ неможливо через перехід в область ультразвукових і гіперзвукових частот, де висока частота f_m і мала довжина хвилі λ_m визначають специфічні особливості поширення модельного випромінювання [216]. (Треба відзначити, що взагалі звук з $f > 2 \cdot 10^5$ Гц фізично нездатний поширюватися в повітрі). У такий спосіб істотно обмежений діапазон можливих масштабів моделювання.

- за п. 3 – невідповідність у моделі й у натурі акустичних і механічних властивостей матеріалів, причому згідно з [216] їхню подібність на сучасному рівні науки и техніки забезпечити неможливо з наступних причин:

1) необхідність витримувати строго визначені кути

падіння звуку; саме по собі поняття “імпеданс” утруднене задля врахування⁴ (визначення у вигляді прямої цитати за [217] див. в виносці);

2) вимогу рівності $\alpha_m = \alpha_n$ не так просто витримати, тому що зазначений коефіцієнт звукопоглинання залежить не тільки від різновиду, а також товщини матеріалу, тобто для одного й того ж самого матеріалу в моделі й в натурі коефіцієнти звукопоглинання будуть різні, якщо товщини шарів цього матеріалу в подібних елементах моделі й натурі різні (що впливає з п. 1);

3) неконкретизовані вимоги до енергетичних характеристик моделей ДШ стосовно натурних ДШ. Унаслідок цього область застосування фізичного моделювання обмежена.

4

«...Импеданс акустический, комплексное сопротивление, которое вводится при рассмотрении колебаний акустических систем (излучателей, рупоров, труб и т. п.). И. а. представляет собой отношение комплексных амплитуд звукового давления и объёмной колебательной скорости частиц среды (последняя равна произведению усреднённой по площади колебательной скорости на площадь, для которой определяется И. а.). Комплексное выражение И. а. имеет вид $Z_a = R_a + iX_a$, где $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица. Разделяя комплексный И. а. на вещественную и мнимую части, получают активную R_a и реактивную X_a составляющие И. а. — активное и реактивное акустические сопротивления. Первое связано с трением и потерями энергии на излучение звука акустической системой, а второе — с реакцией сил инерции (масс) или сил упругости (гибкости). Реактивное сопротивление в соответствии с этим бывает инерционное или упругое. Акустическое сопротивление в системе СИ измеряется в единицах $н \cdot сек/м^2$, в системе СГС — в $дин \cdot сек/см^2$ (в литературе для этой единицы встречается обозначение «акустический ом»). Понятие И. а. важно при рассмотрении распространения звука в трубах переменного сечения, рупорах и подобных системах или при рассмотрении акустических свойств излучателей и приёмников звука, их диффузоров, мембран и т. п. Для излучающих систем от И. а. зависят мощность излучения и условия согласования со средой. Кроме акустического Z_a , применяют также удельный акустический Z_1 и механический Z_m импедансы, которые связаны между собой зависимостью $Z_m = SZ_1 = S^2Z_a$, где S — рассматриваемая площадь в акустической системе. Удельный акустический импеданс выражается отношением звукового давления к колебательной скорости в данной точке или для единичной площади. В случае плоской волны удельный И. а. равен волновому сопротивлению среды. Механический импеданс (и соответственно механическое активное и реактивное сопротивления) определяется отношением силы (т. е. произведения звукового давления на рассматриваемую площадь) к средней колебательной скорости для этой площади. Единица механического сопротивления в системе СИ — $н \cdot сек/м$, в системе СГС — $дин \cdot сек/см$ (иногда называется «механический ом»)...

Фізичне моделювання акустичних процесів (та його болісні проблеми) докладно описані, наприклад, у [128].

Вищевказані п. 1, 2, 3 являють собою не що інше, як формулювання критеріїв подібності. Але це зроблено частково, що представляє значні незручності при практичній реалізації моделей, де бажано мати масштабні співвідношення в дохідливому вигляді, а критерії та індикатори подібності використовувати для їхньої перевірки.

4.4. Власні авторські розробки в галузі фізичного моделювання акустичних процесів – введення додаткового критерію подібності

Деякі недоліки фізичного моделювання виявлені персонально автором. Ніким дотепер майже не зверталася увага на необхідність зміни параметрів газоподібного середовища поширення звукових хвиль, а особливо таких з них, як атмосферний тиск (у неявному вигляді ця вимога впливає з п.3 вищевказаного відомого способу досягнення подібності). Це питання у відомих літературних джерелах пояснюється дуже незрозуміло. Наприклад, в [79] в підрозділі *«Моделирование механического шума»* на с. 35 фігурує: *«Условия возбуждения звука должны быть одинаковыми. Воздух, окружающий модель, должен иметь те же плотность и температуру, что и в натуральных условиях»*. Але в тому ж самому довіднику [79] на с. 31 в іншому підрозділі *«Моделирование распространения шума в помещениях»* його автори собі ж суперечать, пишучи протилежне: *«Не обязательно иметь одну и ту же среду в модели и в натуре – иногда в модели удобнее применить фреон или водород, скорости звука в которых существенно отличаются от скорости звука в воздухе»*. Вважаючи, що моделювання розповсюдження шуму в приміщеннях включає в себе моделювання механічного шуму як свою

невід'ємну складову частину - (шум від моделі механічних джерел розповсюджується в моделі приміщення), та вони співвідносяться між собою як загальне і часткове, - складається враження, що автори [79] самі достовірно не знають, потрібно змінювати параметри газоподібного середовища поширення звукових хвиль при моделюванні, чи ні? – (або ж деякі автори в чисельному колективі розробників довідника [79] просто не знайшли необхідної єдності й взаємопогодженості з іншими?!)

У більшості випадків ця вимога просто замовчується, за винятком роботи [216], де прямо вказується, що тиски в моделі й в натурі повинні бути рівними. Те, що це не так, можна показати різними способами, наприклад, записавши загальновідоме рівняння стану ідеального газу, що зв'язує початковий 1 і кінцевий 2 стани того самого газу через його тиск P , температуру Q і обсяг V для кожного із станів:

$$P_1 V_1 / Q_1 = P_2 V_2 / Q_2 = \text{const} \quad (4.6)$$

і замінивши індекси станів $_1$ і $_2$ індексами станів відповідно індексами $_н$ (натура) і $_м$ (модель). З огляду на те, що при моделюванні $c_L \neq 1:1$, ізобаричний процес виключений, тобто адекватні обсяги газу в моделі $V_м = V_2$ і в натурі $V_н = V_1$ різні і має місце (4.3). Рівність тисків у моделі й в натурі грубо порушує подібність, - а особливо саме при акустичному моделюванні, де мова йде про передачу звуку саме за рахунок звукового тиску, тобто в різниці тисків в збуреному й незбуреному місцях середовища.

Наприклад, запишемо те саме рівняння стану ідеального газу (4.6), ввівши в усі вхідні в нього величини індекси ($_м$ - модель, $_н$ - натура):

$$P_м V_м / T_м = P_н V_н / T_н \quad (4.7)$$

де $P_н$, $P_м$ - тиск відповідно в натурі і моделі, Па; $T_н$, $T_м$ - температура відповідно природи і моделі, К.

Використовуючи залежність взаємозв'язку адекватних

обсягів у моделі і в натурі, перепишемо (4.7) у вигляді:

$$P_M c_L^3 V_H / T_H = P_H V_H / T_H \quad (4.8)$$

З цього випливає, що при $T_M = P_H V_H / T_H = const$ величини тиску в моделі й натурі взаємозалежні:

$$P_H = P_M c_L^3 \quad (4.9)$$

При однаковому тиску $P_H = P_M = const$ у моделі й натурі взаємозалежні температури:

$$T_M = T_H c_L^3 \quad (4.10)$$

Це означає, що, зменшуючи модель, ми повинні або збільшувати тиск, або зменшувати температуру в моделі порівняно з натурою для дотримання теорії подібності.

Таким чином, з двох взаємовиключних положень роботи [79] більш правильним є вищенаведений вираз на с. 31 [79], що побічно стверджує наші висновки з цього питання.

Тоді (4.4) потрібно переписати без рівняння в останньому пункті:

$$\begin{cases} \lambda_M = \lambda_H \cdot c_L, \text{ м,} \\ f_M = f_H / c_L, \text{ Гц,} \\ c_M \neq c_H, \text{ м/с.} \end{cases}$$

а взаємозв'язок швидкостей розповсюдження

$$c_M \neq c_H$$

доцільно виразити за рахунок більш складних залежностей (наведених в [58, 210-212, 219]).

З урахуванням вищесказаного, нами були запропоновані скориговані відомі вимоги подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, що призвело до створення невідомого раніше способу досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, захищеного патентом України [218]. Таким чином, у рамках наших власних досліджень, створений (і апробований) спосіб досягнення подоби при фізичному

моделюванні акустичних процесів [218], що включає дотримання геометричної подоби моделі і природи, дотримання рівності відношенні лінійних розмірів до довжини хвилі в моделі й у природі, дотримання рівності імпедансів чи коефіцієнтів звукопоглинання в моделі й у природі, - який, відповідно до запатентованої формули винаходу, відрізняється тим, що моделювання проводять у реальному масштабі часу, дотримуючи рівності адекватних проміжків часу в моделі і у природі, за рахунок того, що забезпечують у моделі швидкість поширення звуку, рівну добутку швидкості поширення звуку в природі на масштаб лінійних розмірів.

Передбачено також, що у визначених формах використання (чи конкретних видах реалізації) відповідно до запатентованої нами формули винаходу запропоновані такі варіанти:

– при рівності газових постійних у моделі й у природі і рівності в них постійних адіабати, тобто при використанні як середовище поширення звукових хвиль того самого газу як у моделі, так і в природі, (наприклад, повітря), забезпечують температуру цього газу в моделі, рівну добутку температури цього газу в природі на масштаб лінійних розмірів, зведений у другий ступінь, при однакових тисках газу в них.

– при рівності газових постійних у моделі й у природі і рівності в них постійних адіабати, тобто при використанні як середовище поширення звукових хвиль того самого газу як у моделі, так і в природі, наприклад, повітря, забезпечують тиск цього газу в моделі, рівний відношенню тиску цього газу в природі до масштабу лінійних розмірів, зведеному в другий ступінь, при однакових значеннях температур у них.

– як середовище поширення звукових хвиль у моделі використовують газ з хімічним складом, відмінним від

хімічного складу газу, що є середовищем поширення звукових хвиль у природі, наприклад, повітря.

Альтернативне (а не спільне) дотримання одних (і, відповідно, недотримання інших) форм його реалізації (тобто коли всі 4 вищевказані формулювання розглядаються не в комплексі, а як взаємно несумісні альтернативні варіанти) є частковим випадком загальної закономірності і базується на свідомо ідеалізованому представленні про ізобаричний плин процесів, - (припускає рівняння одиниці комплексу значень $c_m \cdot c^{-2} \cdot T \cdot c^{-1} \cdot L$ при величині P_n у виведеній автором формулі, що зв'язує адекватні величини тисків у моделі P_m і природі P_n):

$$P_m = c_m \cdot c^{-2} \cdot T \cdot c^{-1} \cdot L \cdot P_n.$$

Хоча, звичайно ж, це значно полегшує життя експериментаторам, які на практиці будують фізичні моделі. (позначення індексів m, T, L див. в табл. 4.1)

З врахуванням вищевказаного, треба доповнити систему відомих вимог подоби при аналоговому і фізичному моделюванні, що сформульовані вище. Згідно з системою вимог подоби при аналоговому і фізичному моделюванні, описаною там, додається ще один пункт (додаткові критерій і індикатор подоби згідно [218]):

«Проведення моделювання у реальному масштабі часу, дотримуючи рівності адекватних проміжків часу в моделі і у природі, за рахунок того, що забезпечують у моделі швидкість поширення звуку, рівну добутку швидкості поширення звуку в природі на масштаб лінійних розмірів.»

Додаткові критерій і індикатор подібності за [218]:
Критерій подібності

$$\frac{P_M \cdot V_M}{Q_M} = \frac{c_L^{-1} c_m c_T^{-2} P_H c_L^3 \cdot V_H}{c_Q Q_H} =$$

$$= \frac{c_L^2 c_m c_T^{-2} P_i \cdot V_H}{c_Q Q_H}$$

Індикатор подібності

$$\frac{P_i \cdot V_i \cdot Q_i}{Q_i \cdot P_i \cdot V_i} = 1 \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(P_H \cdot V_H)(c_Q \cdot Q_H)}{Q_H \cdot (c_m c_L^2 c_T^{-2} P_H \cdot V_H)} = 1 \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{c_Q}{c_m c_L^2 c_T^{-2}} = 1$$

де позначення констант подоби c_L , c_m , c_Q відповідно впливають із загальної системи констант подоби, створеної автором [58, 219, 220, 210, 211, 212, 221]:

Таблиця 4.1

Константи подібності до основних одиниць СІ

Найменування	Позначення	Одиниця	Константа подібності	Взаємозв'язок між параметрами моделі (м) і натур (н)
Довжина	L	м	c_L	$L_M = c_L \cdot L_H$
Маса	M	кг	c_m	$M_M = c_m \cdot M_H$
Час	T	с	c_T	$T_M = c_T \cdot T_H$
Сила струму	I	А	c_I	$I_M = c_I \cdot I_H$
Температура	Q	К	c_Q	$Q_M = c_Q \cdot Q_H$
Кількість речовини	N	Моль	c_N	$M_M = c_N \cdot N_H$
Сила світла	J	кд	c_j	$J_M = c_j \cdot J_H$

4.5. Аналогове моделювання акустичних процесів

Це є один з найважливіших видів моделювання, заснований на аналогії (у більш точних термінах - ізоморфізмі) явищ, що мають різну фізичну природу, але описуваних однаковими математичними (диференціальними, алгебраїчними чи якими-небудь іншими) рівняннями [222]. Поняття ізоморфізму відноситься до систем об'єктів із заданими в них операціями чи відношеннями.

Вивчення властивостей однієї з ізоморфних систем значною мірою (а з абстрактно-математичної точки зору - цілком) зводиться до вивчення властивостей іншої системи. Будь-яку систему об'єктів S' , ізоморфну системі S , можна розглядати як "модель" системи S ("моделювати систему S за допомогою системи S' ") і зводити вивчення найрізноманітніших властивостей системи S до вивчення властивостей "моделі" S' .

Загальне визначення ізоморфності систем об'єктів із заданими в них у кінцевому числі відносинами між постійним для кожного відношення числом об'єктів таке. Нехай є дві системи об'єктів S і S' , причому в першій визначені відношення

$$F_k(x_1, x_2, \dots), k = 1, 2, \dots, n,$$

а в другий – відношення

$$F'_k(x'_1, x'_2, \dots), k = 1, 2, \dots, n,$$

Системи S та S' є зазначеними в них відношеннями називаються ізоморфними, якщо їх можна поставити в таку взаємно однозначну відповідність

$$x' = \varphi(x), x = \psi(x')$$

(де x — довільний елемент S , а x' — довільний елемент S'), що з наявності $F_k(x_1, x_2, \dots)$ випливає $F'_k(x'_1, x'_2, \dots)$, і навпаки. Сама зазначена відповідність називається при цьому ізоморфним відображенням, чи ізоморфізмом.

Поняття ізоморфізму виникло в теорії груп, де вперше був встановлений той факт, що вивчення внутрішньої структури двох ізоморфних систем об'єктів являє собою ту саму задачу. Аксиоми будь-якої математичної теорії визначають систему об'єктів, досліджувану цією теорією, завжди тільки з точністю до ізоморфізму: аксіоматично побудована математична теорія, застосовна до якій-небудь одній системі об'єктів, завжди цілком застосовна і до іншої. Тому кожна аксіоматично викладена математична теорія допускає не одну, а багато "інтерпретацій", чи "моделей". Поняття ізоморфізму містить у собі як окремих випадок поняття гомеоморфізму, що грає основну роль у топології. Частковим випадком ізоморфізму є автоморфізм - взаємно однозначне відображення

$$x' = \varphi(x), x = \psi(x')$$

системи об'єктів із заданими залежностями $F_k(x_1, x_2, \dots)$ саме на себе, при якому з $F_k(x_1, x_2, \dots)$ впливає $F'_k(x'_1, x'_2, \dots)$, і навпаки. Це поняття теж виникло в теорії груп, але потім виявилось істотним у всіляких розділах математики. Ізоморфізм являє собою теоретичну основу аналогового моделювання.

Аналогове моделювання стосовно до акустики означає заміну звуку іншим середовищем моделювання; при цьому також повинні дотримуватися вимоги подібності. Найбільш старим з такого роду способів є моделювання на плоских водяних моделях за допомогою поверхневих хвиль – так званий метод "хвильових брижі" [223]. Щоб забезпечити досить близьку аналогію між простими гармонійними брижами, глибина моделі (у вигляді водойми) повинна бути більше $\frac{1}{2}$ довжини брижі. Недолік методу – швидке загасання брижі, можливість одержати тільки плоске зображення, ні про яку кількісну оцінку не може бути й мови.

Інша спроба замінити розповсюдження звуку

витіканням якоїсь речовини пропонує застосувати дим як хвильове середовище [223]. Тут можливо одержати не тільки плоске, а й просторове розповсюдження випромінювання, що моделюється, дим добре візуалізується, - але аналогія між звуком та димом в повітрі дуже мала, розповсюдження диму більш статичне, і така аналогова модель просто не витримує критики.

Такі оригінальні, але практично не застосовані спроби пошуку аналогії між звуком та якимось іншим середовищем ми наводимо для того, щоб показати, що пошук такої аналогії проводився з давніх часів, та займав розум багатьох вчених.

Робота [224] є фундаментальною працею по створенню так званих моделей прямої аналогії (розрізняють пряму аналогію та квазіаналогове моделювання). Автори [224], однак, під прямою аналогією між середовищем, що моделюється, та його умовним відображенням розуміють саме різного роду електричні моделі. Такі пристрої моделювання застосовуються і в акустиці.

Ось як говорить про ту електроакустичну аналогію, наприклад, [225]:

«...Электроакустические и электромеханические аналогии, аналогии в законах движения (колебаний) механических колебательных систем и электрических контуров. Главное достоинство Э. и э. а. — возможность применения методов расчёта и анализа электрических колебательных систем при рассмотрении свойств механических и акустических систем (рис.), основанная на сходстве дифференциальных уравнений, описывающих состояние этих систем. На основании сопоставления сходных уравнений составляется таблица соответствия электрических, механических и акустических аналогов, причём в зависимости от того, выбрано ли уравнение последовательного или параллельного электрического

контура для сопоставления, различают 1-ю (прямую) и 2-ю (инверсионную) системы аналогий (см. табл.).

Электрические величины	Механические величины		Акустические величины
	1-я система	2-я система	1-я система
Напряжение (эдс) U	Сила F	Скорость v	Звуковое давление p
Ток i	Скорость v	Сила F	Объёмная скорость $S v$
Индуктивность L	Масса m	Податливость (гибкость) C_m	Акустическая масса $M_a = \rho l/S$
Ёмкость C	Податливость (гибкость) C_m	Масса M	Акустическая податливость $C_a = V/\rho c^2$
Активное сопротивление R	Сопротивление механических потерь r_m	Активная механическая приводимость $1/r_m$	Сопротивление акустических потерь r_a

Примечание. S — площадь, ρ — плотность среды, c — скорость звука в среде, V — объём.

При рассмотрении акустических систем наибольшее распространение получила 1-я система аналогий.

Э. и э. а. особенно полезны при определении свойств сложных механических систем с несколькими степенями свободы, аналитическое исследование которых решением дифференциальных уравнений весьма трудоёмко. Такие системы представляют в виде совокупности электрических контуров и полученную электрическую схему (эквивалентную схему) анализируют приёмами электротехники. Метод Э. и э. а. применяется для расчёта электромеханических и электроакустических преобразователей...»

Наші власні дослідження в цій галузі описані в роботах [58, 210, 212, 221, 226]

Відомі спроби моделювання звукових хвиль електромагнітним способом (розподіл часток металевого

порошку в магнітному полі, що відповідає звуковому полю), але практичного застосування цей спосіб не одержав через його технічну складність при здійсненні [209].

Моделювання оптичними методами засновано на імітації джерела звуку джерелом світла і заміні виміру рівня звуку виміром освітленості в контрольних точках моделі досліджуваного об'єкта. Перевагою такого роду моделювання є те, що розподіл світла на моделі значно легше зафіксувати, аніж розподіл звуку.

Первісні відомості про можливість такого моделювання містяться в роботі [227]. Робота [216], що датована ще 1964 р., містить строгу критику [227], і прямо вказує, що таких ненадійних методів моделювання треба уникати. В роботі наших попередників [228] відзначається, що застосування світлових моделей для дослідження характеристик випромінюючих систем базується на тотожності законів переносу енергії видимого спектра та інших видів випромінювання, що математично полягає в ідентичності рівнянь, які описують процес у тому і іншому випадку. Проблема моделювання звукового випромінювання світловим випромінюванням (попередньо нашим дослідженням) невдалим чином була вирішена у [229]. Таким чином, є відомим спосіб аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль усередині приміщення, який включає моделювання процесу поширення звукової енергії на моделі і вимір її величини в контрольованих точках моделі, реалізований у вищевказаному пристрої по [229], що містить імітатор звукового випромінювання, що складається з точкового і мнимого джерел світла (ДС), і засіб реєстрації з блоків фотодіодів зі світлодіодами для установки на точковому і мнимому ДС, а також поверхні, що відбивають світло. З формули й опису прототипу наших подальших власних

досліджень явно впливає, що моделювання процесу поширення звукової енергії здійснюється поширенням світлової енергії, причому у видимому діапазоні довжин світлових хвиль, а вимір її величини в контрольованих точках моделі приміщення відбувається шляхом реєстрації освітленості.

Іншим чином, слід казати, що існують аналогові моделі, в яких розповсюдження звуку в натурі замінюється розповсюдженням світла на моделі.

Найбільш вичерпно й докладно ця проблема розглядалася в власній кандидатській дисертації автора [100, 101, 102, 103], але стан запропонованих технічних засобів її реалізації (на рівні початку 90-х років, без застосування комп'ютерної техніки і матеріалів сучасних наукових досліджень) свідчить про те, що цю проблему треба вирішувати заново, із залученням сучасних підходів. Тому кандидатська дисертація автора [100], як найбільш докладна і повна наукова праця, присвячена проблемам такого роду моделювання, є фундаментальною основою подальших досліджень. Підставою наших подальших досліджень є теоретичне обґрунтування аналогії процесів розповсюдження звуку та світла, надане, наприклад, в [230 -236]. Роботи [58, 210, 212, 221, 236, 237] надають взаємозв'язок між модельним та натурними параметрами (тобто звуком та світлом).

Між процесами розповсюдження звукового та оптичного випромінювання існує певна аналогія [231, 235] Аналогія між світлом та звуком розглядається також в роботах інших авторів, наприклад, в фундаментальній роботі [230].

Так, наприклад, у [96] на с. 292 указується: *«Геометрическая акустика – раздел акустики, в котором изучается распространение звука на основе представлений о звуковых лучах. Законы геометрической*

акустики аналогічні законам геометрической оптики». Геометрична оптика, у свою чергу - «это раздел оптики, в котором распространение света рассматривается на основе представлений о световом луче как линии, вдоль которой распространяется световая энергия. Законы геометрической оптики применяются для расчетов построения изображений при прохождении света через оптические системы».

Більш докладно ці питання розглянуті в [210]. Варто зробити висновок про еквівалентність хвильових характеристик звукового й оптичного випромінювань [234]. Оскільки історично склалося так, що акустичні, променисті і світлові величини можуть мати різні між собою найменування, аналогія між ними показана нижче, і є важливим положенням, що затверджує ідентичність математичних описів зазначених випромінювань.

Таблиця 4.2

Зіставлення хвильових характеристик звукового та оптичного випромінювань (згідно за [58, 210, 212, 234])

Звукове випромінювання			Оптичне випромінювання					
Абсолютні акустичні величини			Променеві величини			Світлові величини		
Назва	Розмірність	Позначення	Назва	Розмірність	Позначення	Назва	Розмірність	Позначення
Звукова енергія	L^2MT^{-2}	Дж	Променева енергія	L^2MT^{-2}	Дж	Світлова енергія	ТJ	лм с
Щільність звукової енергії	$L^{-1}MT^{-2}$	Дж/м ³	Щільність променевої енергії	$L^{-1}MT^{-2}$	Дж/м ³	-	-	-
Швидкість звуку	LT^{-1}	м/с	Швидкість світла	LT^{-1}	м/с	Швидкість світла	LT^{-1}	м/с
Звуковий тиск	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	-	-	-	-	-	-
Потік	L^2MT^{-3}	Вт	Промен	L^2MT^{-3}	Вт	Світло-	J	лм

Звукове випромінювання			Оптичне випромінювання					
Абсолютні акустичні величини			Променеві величини			Світлові величини		
Назва	Розмірність	Позначення	Назва	Розмірність	Позначення	Назва	Розмірність	Позначення
звукової енергії			евий потік			вий потік		
-	-	-	Енергетична сила світла	L^2MT^{-3}	Вт/ср	Сила світла	J	кд
-	-	-	-	-	-	Світловий еквівалент променевого потоку	$L^{-2}M^1T^3J$	лм/Вт
Інтенсивність звуку	MT^{-3}	Вт/м ²	Обпромінованість	MT^{-3}	Вт/м ²	Освітленість	$L^{-2}J$	лк
-	-	-	Поверхнева щільність променевого потоку	MT^{-3}	Вт/м ²	Поверхнева щільність світлового потоку	$L^{-2}J$	лм/м ²
-	-	-	Променевість	MT^{-3}	Вт/ср/м ²	Яскравість	$L^{-2}J$	кд/м ²
Експозиція звуку	$L^{-2}M^2T^{-3}$	Па ² /с	Променева експозиція	MT^{-2}	Дж/м ²	Світлова експозиція	$L^{-2}TJ$	лк·с
Акустичний опір	L^4MT^{-1}	Па·с/м ³	-	-	-	-	-	-
Механічний опір	MT^{-1}	Н·с/м	-	-	-	-	-	-
Питомий акустичний опір	L^2MT^{-1}	Па·с/м	-	-	-	-	-	-

Примітка: Розмірності величин надані згідно системи СІ: довжина L (м), маса M(кг), час T (с), сила світла J (кд).

Окрім нас, цією ж проблемою займалися також інші вчені [238 - 240].

Реальним зразком апробованих, налагоджених, впорядкованих пристроїв щодо моделювання процесів розповсюдження звуку оптичними методами на сучасному етапі є наш власний винахід – так званий пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови [241].

На аркушах цієї книги ми не станемо надавати опис [241] (який відомий серед фахівців), описаний в чисельних інших роботах [210, 212, 221, 242, 243, 244] та знайшов своє застосування. Наступна глава присвячена його сучасній, набагато удосконаленій модифікації, побудованій із врахуванням особливостей сучасної комп'ютерної техніки.

4.6. Власні авторські розробки в галузі аналогового моделювання акустичних процесів: Пристрій для візуалізації зашумованості міської забудови (електронно-оптичний недискретний спосіб реєстрації [245])

4.6.1. Опис дослідної установки на базі сканера "Mustek Scanexpress 1200 UB Plus". Основний критерій науки – повторюваність; і з погляду об'єктивності треба було, наприклад, трохи змінити і модернізувати (дещо застарілий) пристрій візуалізації зашумованості міської забудови [241] за рахунок зміни засобу реєстрації розподілу енергії, що моделюється, по поверхні моделі. Зокрема, замість засобу реєстрації світлового випромінювання на поверхні моделі (що є еквівалентом шумового випромінювання в натурі), який в [246, 247] являв собою фото платівку, був узятий комп'ютерний планшетний сканер: наприклад, «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus».

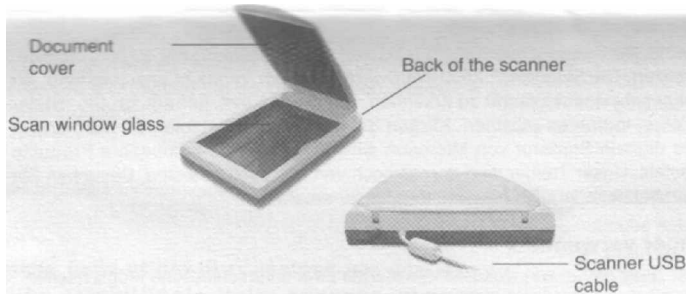


Рис. 4.2. Влаштування і призначення функціональних частин «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Фотографія узята (з його ж допомогою!) із власної інструкції з експлуатації, прикладеної до серійного зразка.

Він має діалогове вікно, у якому є кнопки "Scan"; "Copy"; "Fax" і "Email" (див. рис. 4.3; рис. 4.4.a-г; рис. 4.5; 4.6). Усі необхідні налаштування по всіх режимах сканування винесені на єдину панель "Setting" (рис. 4.7).

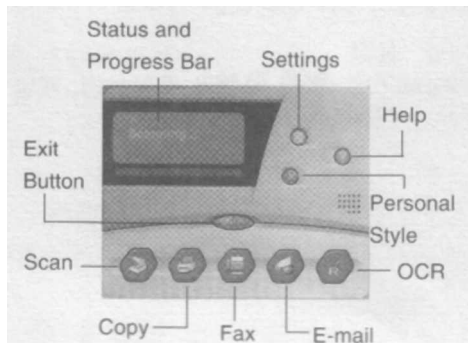


Рис. 4.3. Елемент управління "Panel" ПС «Mustek SCANEXPRESS 1200UB Plus». На схемі, сканованій з інструкції, показано призначення його основних кнопок.

Далі на наступних рис. 4.4.a-г; 4.5; 4.6; 4.7, (узятих з екрана комп'ютера в процесі виконання маніпуляцій) показані варіації "Panel" у залежності від роду виконуваних дій у ході різних стадій експериментів візуалізації ступеня зашумованості міської забудови.

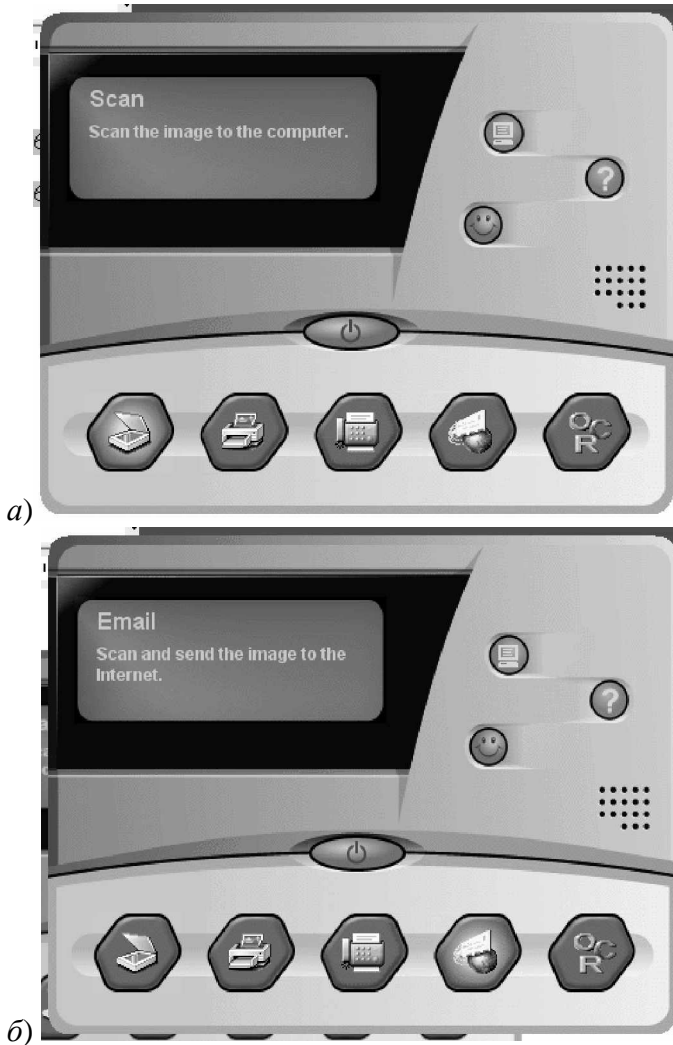


Рис. 4.4. Інтерфейс сканера «Mustek SCANEXPRESS 1200UB Plus»): *a)* - у нього мається режим «Scan», що приводиться в дію крайньої лівий кнопкою в нижньому ряді; *б)* - режим "Email". Викликається натисканням другої праворуч кнопки в нижньому ряді;



Рис. 4.4. Інтерфейс сканера «Mustek SCANEXPRESS 1200UB Plus»: – (продовження): 6) - режим “Fax”; 2) - Діалогове вікно «Copy» – (пряме копіювання інформації зі сканера на принтер, тільки зі специфічним, своєрідним інтерфейсом: (розгортання якого див. далі на рис. 4.5 та 4.6).

Докладніше хотілося зупинитися лише на режимі "Сору", викликуваному щигликом другої ліворуч кнопки в нижньому ряді. При її натисканні розкривається діалогове вікно з незвичайним дизайном і оригінальним інтерфейсом, у якому можна задати досить велику кількість додаткових параметрів опціонально (рис. 4.5) Можливо викликати розширений набір параметрів (рис. 4.6).



Рис. 4.5. У діалоговому вікні "Сору" (подальший розвиток попереднього вікна, викликуваний натисканням другої кнопки ліворуч, що має умовну позначку – значок принтера) – включений режим *пряме копіювання інформації зі сканера на принтер* для моделі сканера «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus».

Варто звернути увагу на кнопку ▶ (розгортання додаткової панелі).

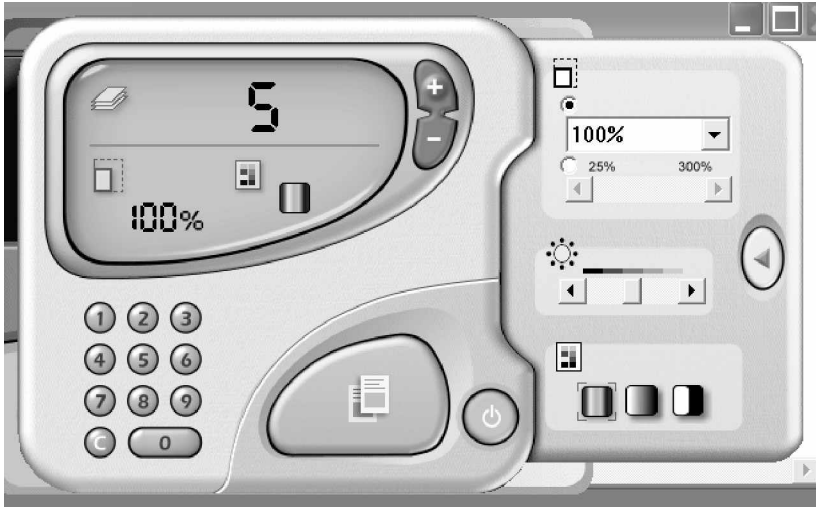


Рис. 4.6. Діалогове вікно "Сору", виявляється, може бути ще і розширено?!

Праворуч її (при натисканні на кнопку зі значком трикутника ◀) висувається/зарухається додаткова панель, за допомогою якої здійснюють вибір режиму копіювання; кількості копій; яскравості; контрасту; корекції колірної гама; і масштабування. Можливостей набагато більше - сканер «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus» достатньо досконалий. На рис. 4.6. показано, як за допомогою панелі цифрових кнопок (у лівій частині) обраний режим друку, при якому відповідно до вимог замовника буде виготовлено 5 однакових копій результатів того самого експерименту (що фізично неможливо в пристрої-прототипі за [241]). «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus» єдині налаштування – загальні.

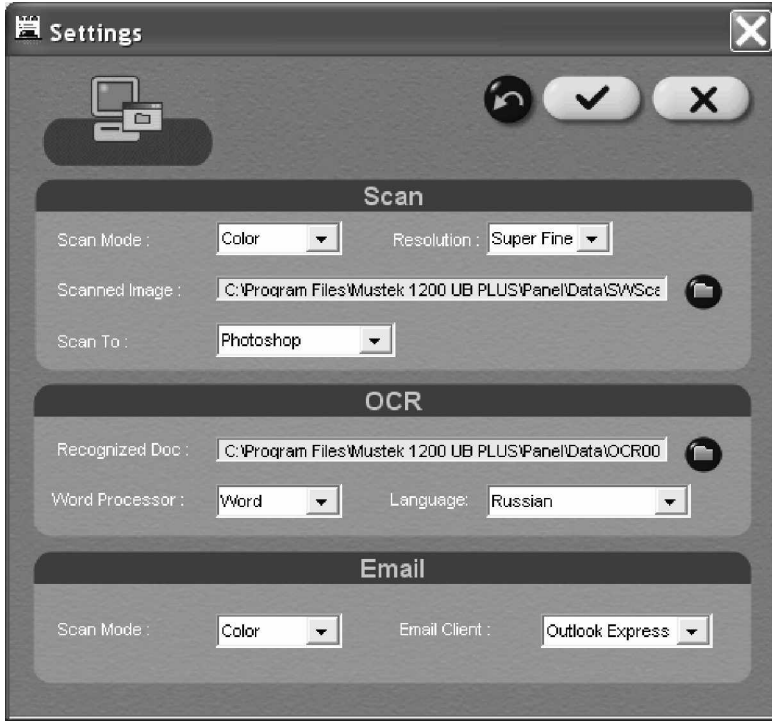
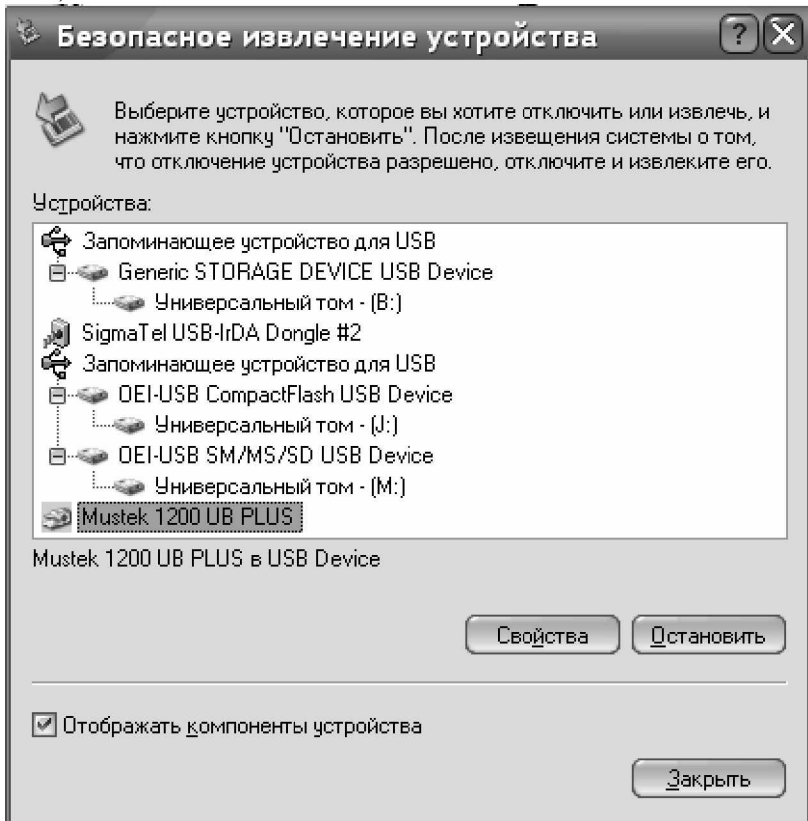


Рис. 4.7. Діалогове вікно “Setting” (настроювання), що відкриває доступ до всіх основних настроювань сканера «Mustek 1200 UB Plus».

Перевагою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus» є унікальна можливість його безпечного відключення безпосередньо під час сеансу роботи операційної системи: (без припинення роботи і знеструмлення комп'ютера). Цей момент представлений на рис. 4.8. Експеримент по візуалізації зашумованості міської забудови з використанням аналогового моделювання закінчений; не закінчуючи роботи і не припиняючи сеанс поточного користування операційною системою, можна знеструмити і відключити лабораторну установку від комп'ютера. Для того, щоб продовжити роботу, не потрібно навіть припиняти сеанс поточного користувача, не потрібно

виходити із системи; не потрібно і перезавантажувати комп'ютер. Програмно відключивши, і фізично роз'єднуючи потім непотрібну більш аналогову модель від комп'ютера, продовжують сеанс поточного користувача, вирішуючи відтепер сторонні (не зв'язані з аналоговим моделюванням завдання). Таким чином, досягається максимальна зручність користування пропонованою конструкцією.

а)



б)

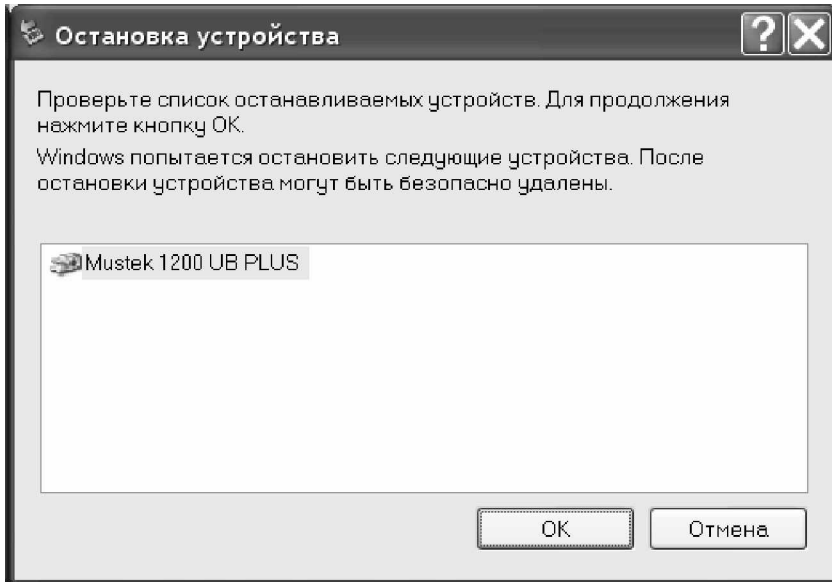


Рис. 4.8. Безпечний витяг пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus» в ОС. *а*) – вибір пристрою задля витягу (саме сканер, а не інший пристрій); *б*) - показує, що відбувається після затиснення кнопки «Остановить».

На рис. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12) наведені зображення, отримані з екрана комп'ютера безпосередньо під час одного з експериментів по візуалізації ступеня зашумованості міської забудови. Це досягається одночасним натисканням на клавіатурі настільного ПК або ноутбука комбінації кнопок: Alt та Print Screen.

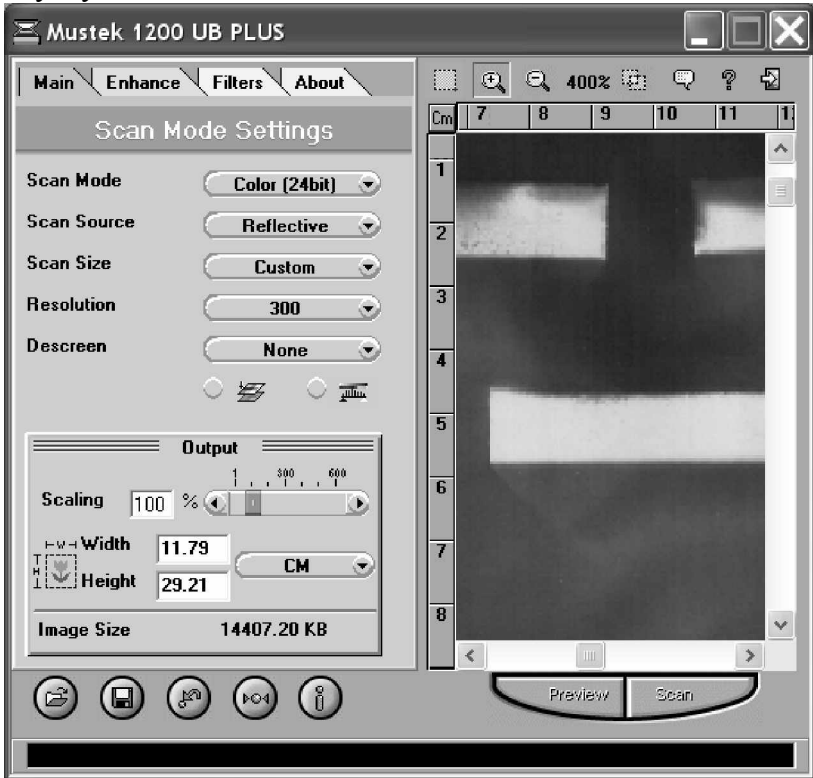


Рис. 4.9. Вікно “Main” діалогового вікна TWAIN (сканування) пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Можна установити режим сканування (кольорове/напівтонове/чорно-біле); джерело сканування; розмір області, що сканується; розрізняючі здатність; „Descreen”; здійснити масштабування зображення, що сканується, в межах 1% (зменшення в 100 разів) ÷ 600% (збільшення в 6 разів). Тут, і на наступних картинках 4.10, 4.11, 4.12 з метою ілюстрації додаткових

можливостей пропонованого пристрою навмисно встановлений масштаб зображення 400% (збільшення в 4 рази). Номінальним же, однак, є масштаб 100% (1:1).

У правому вікні діалогового вікна TWAIN (сканування) видний фрагмент моделі (у збільшеному масштабі), представлені три будинки, з розподілом зон світлотіні біля них. Подібні квазіфотографічні зображення є найкращим доказом дійсності експериментальних даних у ході досліджень по візуалізації зашумованості міської забудови.

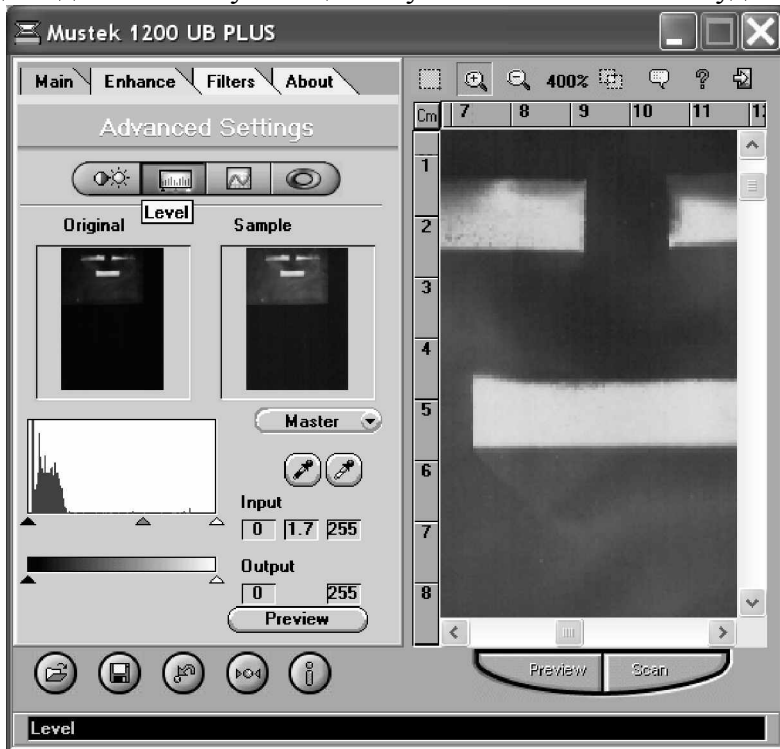


Рис. 4.10. Вікно “Enhance” діалогового вікна TWAIN (сканування) пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Можливо здійснити налаштування яскравості і контрасту зображення, що сканується; рівень; скорегувати криву кольорової корекції; змінити насиченість квітів. Віконце “Sample” показує орієнтований (зразковий) вид об’єктів

сканування після застосування корекції, у порівнянні з вихідним видом (віконце 'Original').

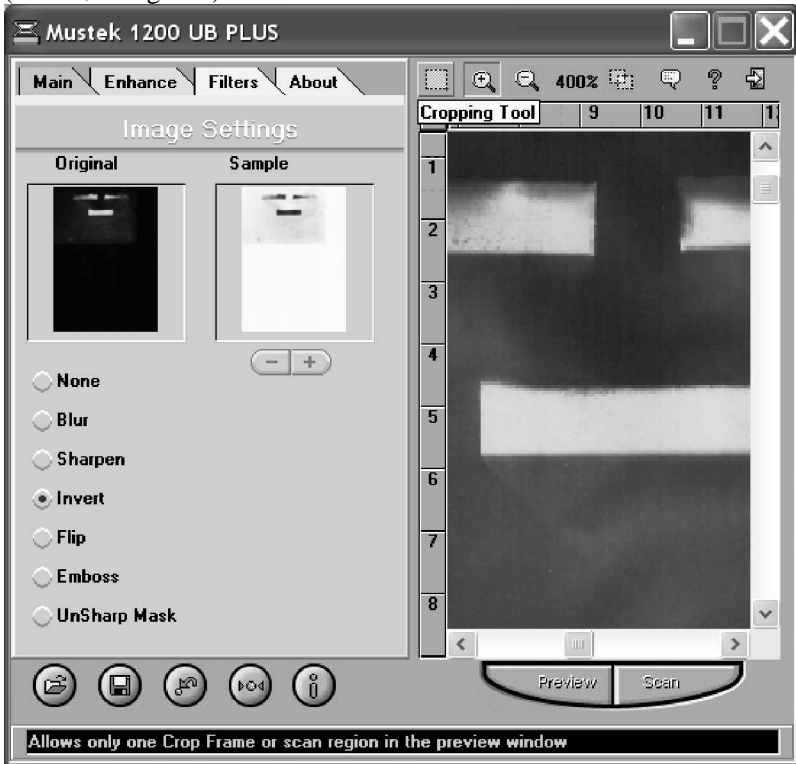


Рис. 4.11. Вікно “Filter” діалогового вікна TWAIN (сканування) пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Можливо застосувати спеціальні ефекти для корекції зображення, чи не застосовувати їх (за замовчуванням – параметр “None”). У даному випадку обране інвертування кольорів зображення (“Invert”). Віконце “Sample” показує орієнтований (зразковий) вид об’єктів сканування після застосування корекції, у порівнянні з вихідним виглядом (віконце 'Original')

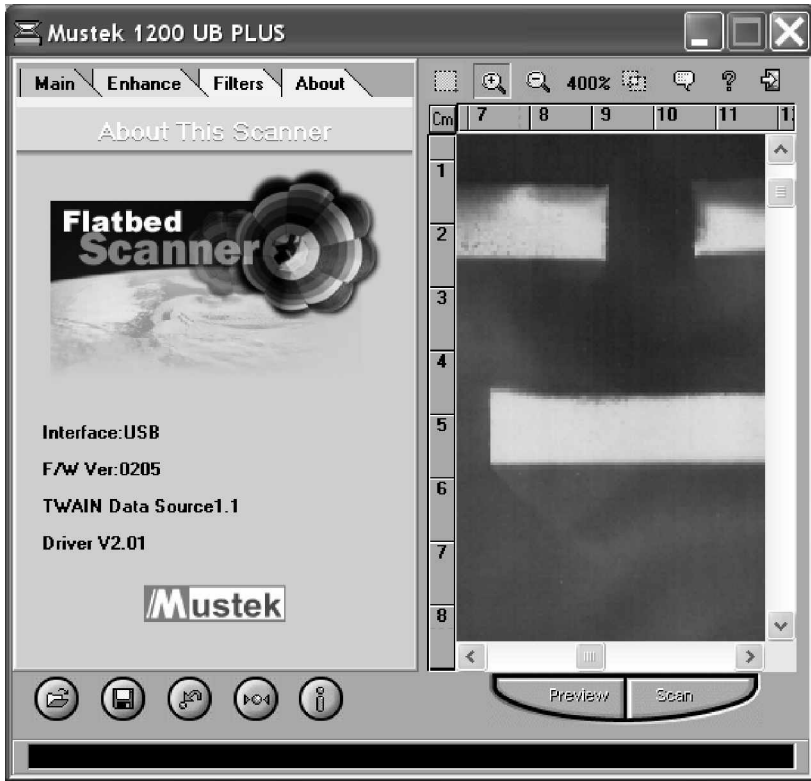


Рис. 4.12. Вікно “About” діалогового вікна TWAIN (сканування) пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Кнопка “Preview” (попередній перегляд) дозволяє побачити, які об’єкти підлягають скануванню. Початок сканування зображення здійснюється натисканням кнопки “Scan”.

Нами були проведені такі експерименти реального аналогового моделювання з метою прогнозування шумового режиму, і його оцінки на відповідність нормативним значенням [249].

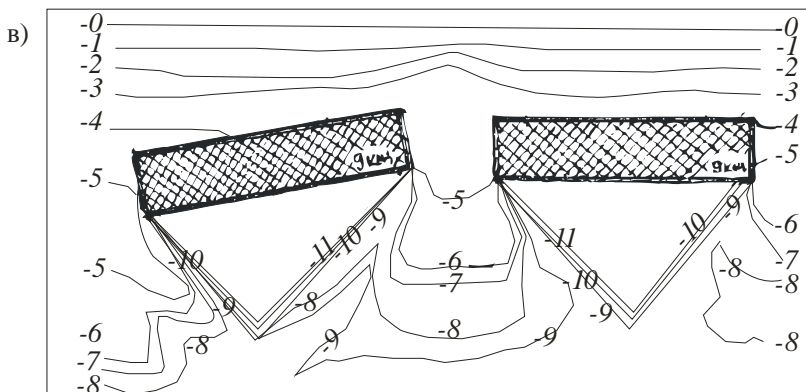
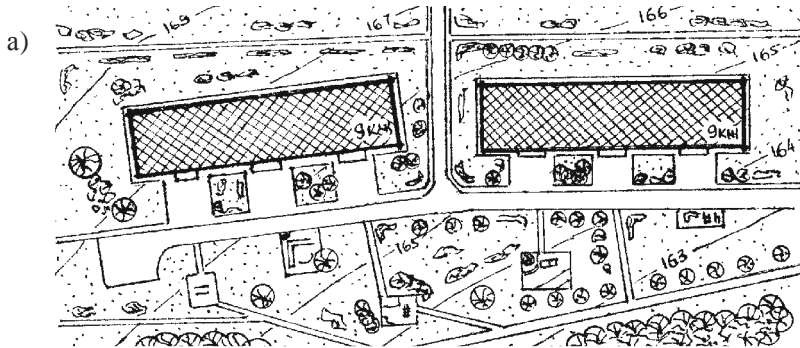


Рис. 4.13. Експеримент аналогового моделювання з використанням вищеприписаного пристрою. Дослідження закономірностей поширення

шуму від лінійного ДШ: а) конкретна містобудівельна ситуація; б) результати експерименту в необробленому вигляді (розподіл світлотіні на поверхні основи моделі); в) результати експерименту в обробленому виді: (карта шуму; побудована на базі моделювання). Цифровими позначеннями показані: 0 дБА - вихідний рівень звуку; - X дБА - його зниження). Масштаб лінійних розмірів 1:1250 ($c_L=0,0008$).

Подальшим розвитком цієї ідеї послужила пропозиція сполучити засіб реєстрації не з фотопластинкою (прототип), і навіть не зі сканером (вищеописане принципово новий пристрій), а зі спеціальним вимірювальним приладом. Таким чином, виходить ще більш оригінальна конструкція, що наділена цілою низкою переваг по відношенню як до прототипу, так і до описаного вище нового винаходу.

4.7. Власні авторські розробки в галузі аналогового моделювання акустичних процесів: «Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта»

4.7.1. *Загальні відомості.* В роботі [212, 221] ми казали, що застосування заміни натурального звуку в моделі світлом дозволяє будувати тільки-но дрібномасштабні моделі, наприклад, моделі забудови селитьби житлових районів (великої площі з великою кількістю будівель) із протяжними лінійними ДШ (транспортні магістралі) тощо; але подальше збільшення такої моделі неможливо за рахунок того, що при тому порушуються вимоги подібності; в той час як на практиці виникає необхідність в збільшенні масштабу моделей. Таким чином, існує проблема обмеження масштабів моделювання, поставлена в [212] та інших роботах.

Масштаб моделі може бути збільшений за рахунок використання більш довгих хвиль, тобто переходу в ІЧ область спектра з використанням контактних термоіндикаторів замість фотопластинки 1 [246, 247] або сканеру [245]. Взагалі застосування світла не у видимому, а в ІЧ діапазоні має чималі переваги в плані розширення діапазону можливих масштабів лінійних розмірів при моделюванні (див. далі). З урахуванням того, що натурний звуковий діапазон має довжину хвилі $1,7 \text{ см} < \lambda_{\text{н}} < 17 \text{ м}$, а модельний інфрачервоний діапазон $770 \text{ нм} < \lambda_{\text{м}} < 1 \text{ мм}$, масштаб цілком прийнятний для побудови більш великих моделей з дотриманням зазначених вимог подібності. Так, наприклад, при моделюванні звукової хвилі в повітрі при $f = 20 \text{ кГц}$, ($\lambda_{\text{н}} = 1,7 \text{ см}$), ІЧ- випромінюванням з $\lambda_{\text{м}} = 1 \text{ мм}$, масштаб лінійних розмірів, використовуваний при побудові моделі, дорівнює:

$$c_L = L_M / L_H = 1 \text{ мм} / 1 \text{ см} = 0,001 / 0,017 = 1:17,$$

що дозволяє побудувати навіть великомасштабну модель, у т.ч. модель приміщення з дотриманням вимог подібності. Тому наступні розробки використовують вже ІЧ-діапазон. Застосування світла не у видимому, а в ІЧ-діапазоні має чималі переваги в плані розширення діапазону можливих масштабів лінійних розмірів при моделюванні. У той же час недискретні способи реєстрації характеризуються високою наочністю, на відміну від дискретних: звертаючись до вищенаведених фотографій, можна помітити, що на кожній з них явно видні спад енергії, що моделюється, в міру видалення від ДШ, зони акустичної тіні, утворені будинками, спорудами і шумозахисними засобами, з можливістю кількісної оцінки в акустичних величинах (дБ) розподілу енергії, що моделюється, на території моделі об'єкта. Цими ж перевагами (обидві вищевказаних умови: ІЧ - діапазон + недискретна реєстрація одночасно) володіє більш вдосконалений і прогресивний пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [210, 212], зображений на кресленнях:

а) На рис. 4.14 показано модель міської території з моделями ДШ і засіб реєстрації розподілу енергії, що моделюється;

б) На рис. 4.15 наведені: модель міської території з моделями ДШ (вигляд А с рис. 4.14, тобто вид, що представляє собою вигляд зверху); зображення розподілу енергії, що моделюється, в досліджуваній площині (площини основи моделі, еквівалентної поверхні землі в натурі) на екрані засобу реєстрації (вигляд Б с рис. 4.14).

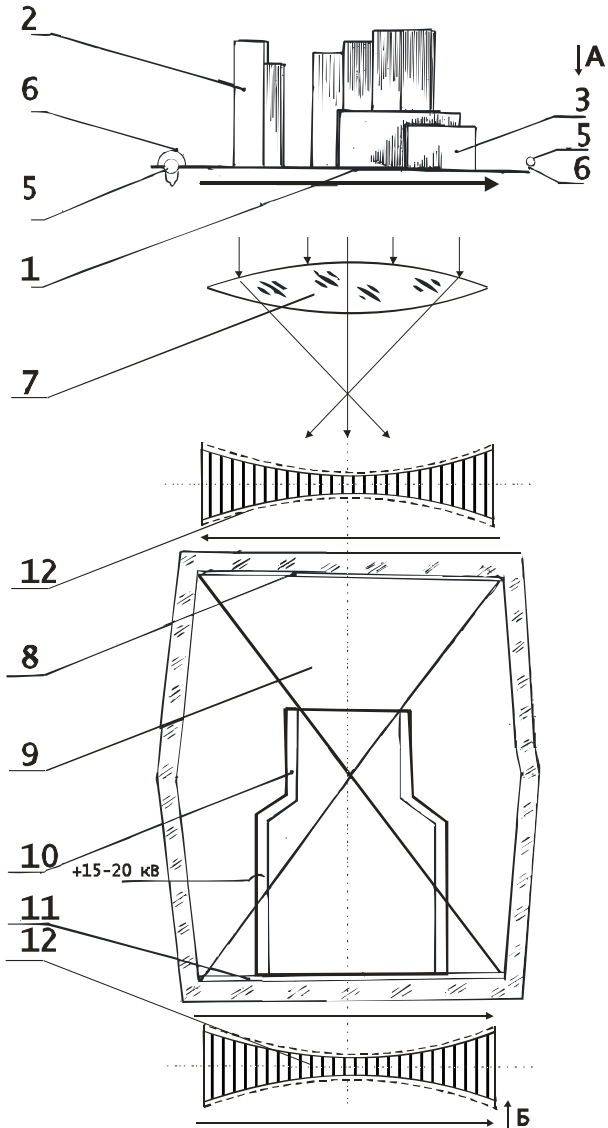


Рис. 4.14. Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретизованим способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта (розглядати разом з рис. 4.15).

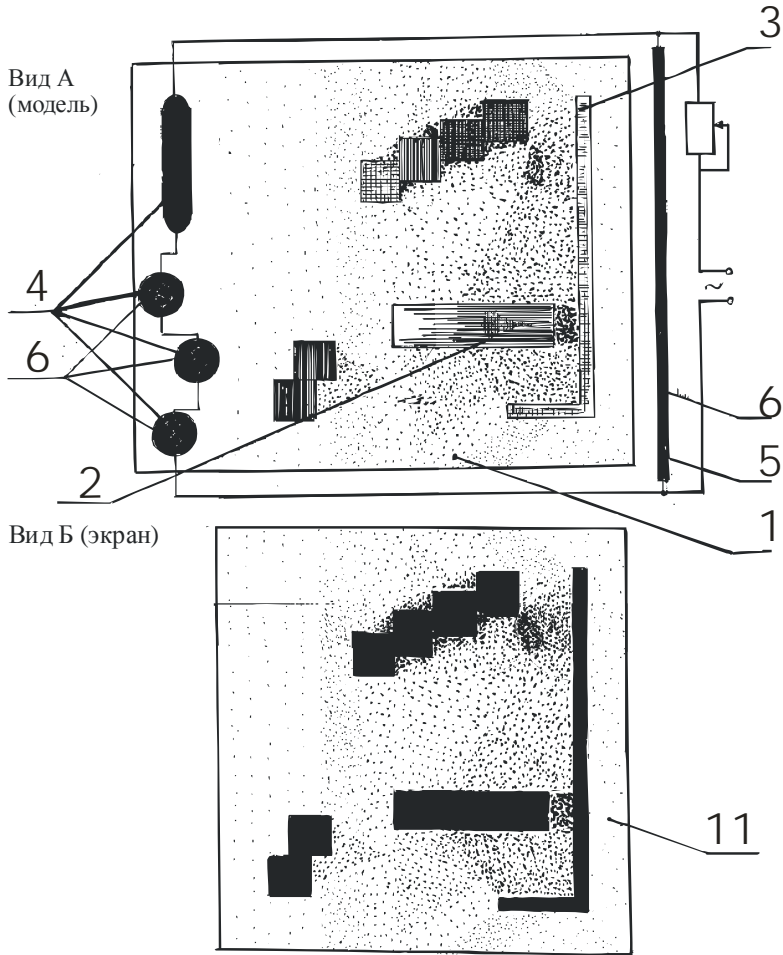


Рис. 4.15. Вигляди А та Б з рис. 4.14. Специфікація складових частин пристрою:

- змінна модель міської території (в складі): 1 - підстава з прозорого для ІЧ - випромінювання матеріалу; 2 - моделі будинків і споруджень; 3 - моделі засобів боротьби із шумом;

- моделі різноманітних джерел звуку (в складі):

4 - точкових у вигляді компактних [250, 251, 252, 253, 254, 255] чи ламп розжарювання; 5 - лінійних у вигляді ніхромової нитки; 6 - світлофільтр;

- засіб реєстрації розподілу енергії, що моделюється (електронно-

оптичний перетворювач), в складі:

7 - оптична система; 8 - фотокатод; 9 - кінескоп; 10 - високовольтний анод; 11 - люмінофор; 12 – волоконні світлопроводи.

В якості різноманітних джерел звуку можуть бути застосовані інші пристрої, винайдені особисто автором: [256 - 259].

4.7.2. *Структурний склад пристрою.* Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [260] складається з:

- змінної моделі міської території у вигляді підстави 1, виконаного з матеріалу, прозорого для ІЧ-випромінювання (наприклад, чорного папера), із установленими на ній моделями будинків, споруджень і ін. міських об'єктів 2 і моделями засобів боротьби із шумом на шляху його поширення (шумозахисних екранів і ін.) 3, моделей ДШ у вигляді джерел ІЧ- випромінювання, у т.ч. моделей точкових ДШ, (наприклад, ламп розжарювання 4) і (чи) лінійних джерел звуку, (наприклад, дровових випромінювачів з ніхрому чи ферроніхрому) 5, причому на зазначені моделі точкових 4 і лінійних 5 ДШ одягнуті світлофільтри 6;

- засобу реєстрації у вигляді оптичної системи 7, що забезпечує проектування зображення розподілу енергії, що моделюється, по якій-небудь площині моделі міської території на чуттєвий елемент, наприклад, напівпрозорий фотокатод 8, нанесений на внутрішню сторону зовнішнього дна кінескопа 9, що виконаний у вигляді колби, із внутрішнього простору якої викачане повітря, і куди поміщений високовольтний анод 10; із вмонтованим у її верхнє дно регулярним волоконним світлопроводом 12, зовнішній торець якого виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, розташований напроти фотокатода 8, причому торці волокон світлопроводу 12

виконані монолітними. Світлопроводи 12 можуть бути застосовані в кількості 1 чи 2 штук, і розташовані відповідно: перший (обов'язковий для установки: описаний вище) - за оптичною системою 7 (на вході в кінескоп 9; сполучений з фотокатодом 8); другий (опціонально) – вмонтований у нижнє дно кінескопа 9; зовнішній торець його виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, покритий люмінофором 11. Зовнішній торець кожного зі світлопроводів 12 має форму увігнутої убік колби площини, що повторює форму колби, причому радіуси кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу однакові.

Основа моделі і засіб реєстрації в даному пристрої, на відміну від попереднього, рознесені між собою на деяку відстань, що забезпечує собою деякі додаткові технічні переваги. Подібна конструкція загалом пропонувалася і раніше (ще в рамках кандидатської дисертації автора, 1995 р., [100]). (В приладі, описаному в кандидатській дисертації, може бути застосований [261]). Істотною відмінністю розглянутого тут пристрою від раніше описаної версії є наявність одного чи двох елементів 12, захищених патентом України, 1997 р. [262]. Про цей елемент конструкції варто розповісти докладніше.

4.7.3. *Запатентована конструкція кінескопа* [262; 263; 264]. Винахід відноситься до волоконної оптики і може бути використане для передачі телевізійних зображень на матовий торець світлопроводу. Відомо велика кількість конструкцій кінескопів. Недоліком їх є наявність аберацій, зокрема дисторсії - зображення, наприклад, прямокутної сітки на екрані кінескопа спотворюється через наявність у ньому радіуса кривизни, здобуваючи чи форму у вигляді „подушки” аби „бочки”. Завданням пропонованого винаходу є усунення аберації, зокрема дисторсії зображення. Особливістю нашого винаходу є те, що він

може бути використаний не тільки лише як структурний елемент 12 конструкції пропонованого пристрою моделювання, але і самостійно - у конструкціях комп'ютерних дисплеїв, побутових телевізорів, і інших пристроїв індикації, що використовують електронно-променеву трубку.

Перспективные технологии и новые разработки

Главная | Патентный отдел | Технологии | Справочник ГРТИ | Цены | Зарубежные патенты | Наши новинки

Раздел "Патентный отдел"

На данной странице представлены библиография и реферативная часть выбранного патента.
Для получения более подробной информации о патенте (полное описание, формула изобретения и т.д.) Вам необходимо сделать заказ (Нажмите на кнопку). После оплаты счета, который Вы получите автоматически, Ваш email будет отправлен полный комплект документов по патенту.

Возвратиться к списку ?

Ключевое слово

Номер публикации патента: 94031610

Вид документа:	A1
Страна публикации:	RU
Рег. номер заявки:	94031610
Редукция МПК:	H
Основные коды МПК:	H01J031/08
Имя заявителя:	Абрамов В.С. [UA]
Изобретатель:	Абрамов В.С. [UA] Карапов И.Т. UA

реферат

Изобретение предназначено для уменьшения aberrаций проекционного изображения. Внешний торец световода имеет форму вогнутой в сторону катоды плоскости, повторяющей форму катоды. Радиусы кривизны внешнего и внутреннего торцов световода одинаковы.

Возвратиться к списку ?

Рис. 4.16. Офіційна публікація в Інтернет патентного документу [262] за веб-адресою [265].

Завдання винаходу досягається за рахунок того, що кінескоп виконаний у вигляді колби з вмонтованим у її дно регулярним волоконним світлопроводом, зовнішній торець виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, - покритий люмінофором, причому торці волокон світлопроводу виконані монолітними, зовнішній торець світлопроводу має форму увігнутої убік колби площини, що повторює форму колби, радіуси кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу однакові. Виконання зовнішнього торця світлопроводу у формі увігнутої убік колби площини внутрішнього торця, що повторює форму світлопроводу, і рівність радіусів кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу забезпечує усунення дисторсії. Згідно [97, с.278-279], щоб уникнути aberaції,

геометричне розташування точок зображення повинне бути подібно геометричному розташуванню точок предмета. У відомих конструкціях кінескопів ця умова порушується через наявність радіуса кривизни колби. Унаслідок цього виникають аберації, зокрема дисторсія, при цьому прямі лінії зображення, що проектується, викривляються назовні, особливо на краях зображення. Відповідно до запропонованої конструкції кінескопа ці аберації компенсуються за рахунок того, що форма зовнішнього торця світлопроводу фактично повторює форму колби з тим же радіусом кривизни, але вигнута в протилежну сторону.

Кінескоп, відповідно до опису і формулі винаходу, містить: колбу 1 із вмонтованим у її дно регулярним волоконної світлопроводом 2, що має внутрішній торець 3, покритий люмінофором і повторює формою колби, що характеризується радіусом кривизни $R_{\text{внутр}}$, і зовнішній торець 4, виконаний матовим, який має форму увігнутої убік колби 1 площини, що характеризується радіусом кривизни $R_{\text{зовн.}}$, що повторює форму колби 1, причому радіуси кривизни однакові: $R_{\text{зовн.}} = R_{\text{внутр}}$.

Як вказується в [99, - с. 427], «...сферическую аберрацию можно также скомпенсировать путем комбинации собирающей и рассеивающей линз (рис. 48.2), подобранных соответствующим образом». В якості доказів, що наглядно ілюструє сей постулат, наводимо рисунок 48.2 з цієї книги [99, - с. 427], що має в нашій роботі нумерацію рис. 4.17:

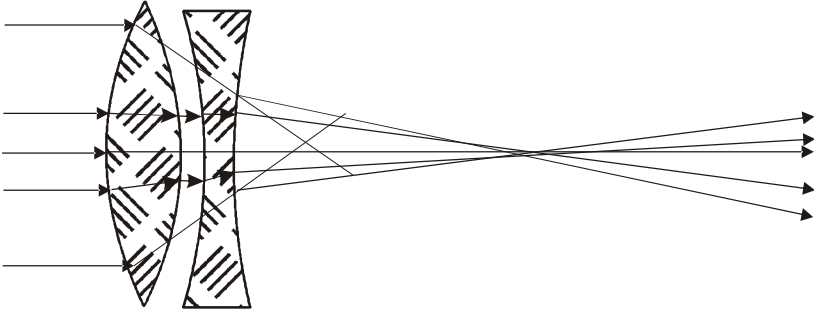


Рис. 4.17. Принцип усунення сферичної аберації в нашому винаході (на підставі відомих положень геометричної оптики).

Пропонований кінескоп ілюструється кресленням – рис. 4.18 (в розрізі).

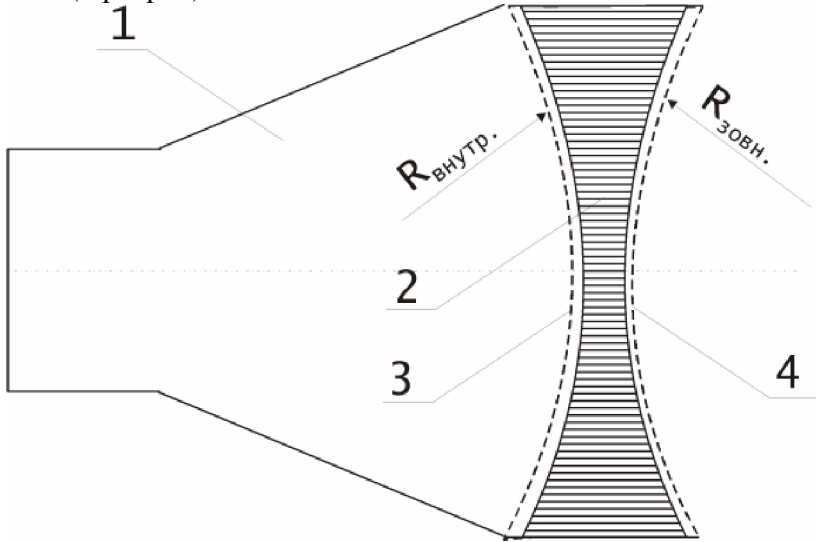


Рис. 4.18. Запатентована конструкція кінескопа згідно [262; 263; 264].

Елемент 1 при об'єднанні з пристроєм візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що

моделюється, на поверхні моделі об'єкта, еквівалентний позиції 9 попереднього малюнка 4.14; елемент 3 еквівалентний позиціям 8 і 11 того ж малюнка (у залежності від розташування: вище відзначалося, що можливо 2 варіанти його установки). Елемент 2 схематично зображений на рис. 4.14 як позиція 12.

Кінескоп [262; 263; 264] працює в такий спосіб.

Коли на колбі 1 проектується вихідне зображення, (яке містить, наприклад прямокутну сітку ліній), через наявність опуклості з радіусом кривизни $R_{\text{внутр}}$, неминуче обумовленої конструкцією колби 1, воно випробує аберацію, зокрема дисторсію, тобто прямі лінії вихідного зображення викривляються назовні, особливо на кутах зображення. Перекручування зображення обумовлені радіусом кривизни. Це ж дисторговане зображення проектується на внутрішній торець 3 волоконного світловода. При подальшому проектуванні зображення, що випробує дисторсію, на зовнішній торець 4 світлопроводу 2, таке перекручене зображення повторно випробує дисторсію, але при цьому для площини, що характеризується увігнутістю, прямі лінії повинні викривлятися усередину. Якщо абстрактно досліджувати зображення на зовнішньому торці світлопроводу, умовно допускаючи, що на внутрішній торець світлопроводу воно подано без перекручувань, то на зовнішньому торці світлопроводу виникне дисторсія через його увігнутість, і прямі лінії зображення скривлені усередину, особливо на його краях. Але на внутрішній торець світлопроводу зображення подається перекрученим, за вищевказаними причинами, при додаванні двох аберацій - опуклої й увігнутої дисторсії (причому радіуси кривизни однакові) вони взаємно компенсуються. Увігнутість зовнішньої поверхні 4 світлопроводу 2, усуває аберації (у вигляді „бочки” або „подушки” на дні колби 1 (тобто на

внутрішній поверхні 3 світлопроводу) через збіг $R_{\text{зовн.}} = R_{\text{внутр.}}$.

4.7.4. *Принцип дії пристрою в цілому.* Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [210], працює таким чином. З дотриманням вимог геометричної подібності збирають модель міської забудови, установлюючи на основі 1 моделі міських будинків і споруджень 2, засобів боротьби із шумом 3, моделі точкових 4 і лінійних 5 ДШ. Інтенсивність ІЧ-випромінювання на моделі підбирають пропорційно інтенсивності звуку в натурі, використовуючи готові співвідношення (що наведені в [219]) за рахунок регулювання сили струму електричного живлення моделей ДШ. Частотний спектр ІЧ-випромінювання в моделі підбирають пропорційним частотному спектру звуку в натурі відповідно до вищеописаних вимог подібності (наприклад, у масштабі лінійних розмірів $c = 1:17$ звук з довжиною хвилі $\lambda_{\text{н}}=1,7$ см замінюється ІЧ-випромінювання з $\lambda_{\text{м}}=1$ мм), що досягається за рахунок установки світлофільтрів 6 на моделі джерел звуку 4 і 5. Таким чином, досягається пропорційність АЧХ ІЧ-випромінювання в моделі і звуку в натурі з дотриманням вимог подібності. Оскільки звук і ІЧ-випромінювання підкоряються однаковим для всіх типів хвиль закономірностям поширення, енергія ІЧ-випромінювання поширюється на поверхні моделі ідентично тому, як поширюється енергія звуку на поверхні натурального об'єкта (з дотриманням всіх особливостей дифракційних і інтерференційних явищ і ін.). При необхідності моделюють ефективність різних можливих шумозахисних засобів, здійснюють підбор їхніх варіантів, розмірів, конфігурацій за рахунок використання різних варіацій

їхніх моделей 3. За допомогою оптичної системи 7 зображення розподілу енергії, що моделюється, проєктується на чуттєвий елемент, наприклад, фотокатод 8 електронно-оптичного перетворювача. При цьому може бути отримане це зображення в будь-якій площині, що цікавить дослідників. Як правило, з метою побудови карт шуму потрібно зображення розподілу енергії, що моделюється, на основі моделі 1 (еквівалентній поверхні землі в натурі), - для чого вона повинна бути прозорою для ІЧ- випромінювання. Під дією ІЧ-променів фотокатод 8 починає випускати електрони, причому з тих ділянок, де яскравість зображення більше, відповідно більше і випускається електронів. Між екраном 11 і фотокатодом 8 (до високовольтного анода 10) прикладена висока напруга, завдяки чому електрони розганяються, бомбардують екран 11 і викликають його світіння, "малюючи" картину, видиму оком людини. Таким чином, візуалізується зображення розподілу енергії, що моделюється, при цьому можливо його фотографування, а також кількісна оцінка цієї енергії різних точках зображення, тобто вимір у них інтенсивності (опромінювання ІЧ- випромінюванням). Приклад такої картинки приведений на рис. 4.19. Наступний малюнок взятий з роботи [128], що вважається свого роду „класикою” картографування шумового режиму. В роботі [128], що належить перу корифеїв АМ, наведені зразки карт шумового режиму задля найбільш поширених випадків, один з яких ми вдало промоделивали в наших власних дослідженнях: (див. рис. 4.19), та надаємо задля подальшого зіставлення. Електробезпека при роботі пристрою забезпечується оригінальною конструкцією заземлення або занулення, захищеною патентами: [266 - 271]. Автором розроблено також чисельні конструкції інших пристроїв аналогового моделювання [272 - 277], докладно описані в книгах [58, 210, 212].

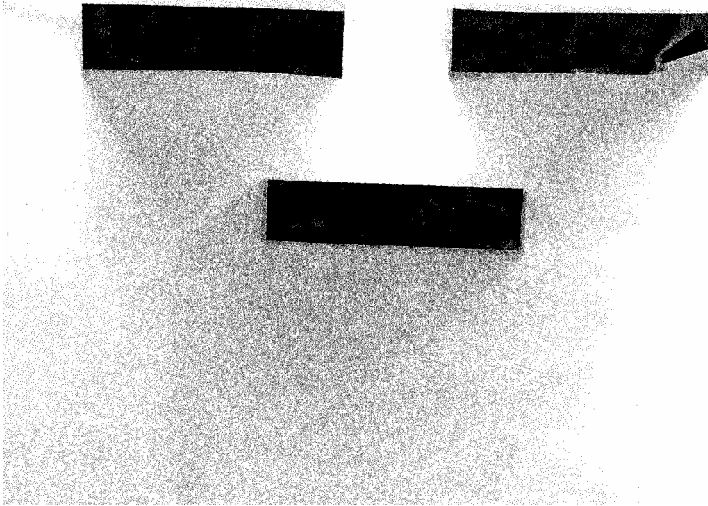


Рис. 4.19. Результати одного з експериментів, зафіксовані за допомогою вищеописаного пристрою.

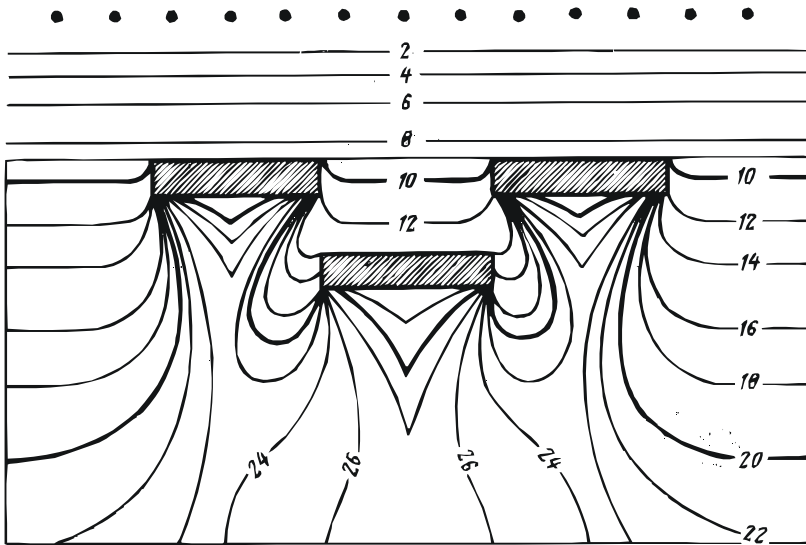


Рис. 4.20. Еталонна карта шуму задля адекватного випадку, взята з [128]. Наочна повна еквівалентність.

4.8. Математичне моделювання акустичних процесів

Історично склалося так, що методологія акустичних розрахунків, особливо в галузі шумозахисту, передбачає максимальне застосування так званих інженерних методів розрахунку. Саме під такі методики створено нормативну базу; саме вони є визначальними в теперішньому стані речей. Суть цих методик полягала в максимальному використанні номограм, графіків, таблиць т.п., з метою практично повного виключення необхідності яких або громіздких рутинних складних обчислювальних операцій.

Але, маючи вигреш в практичному користуванні, за рахунок такого підходу одержували програш в точності. Чого вартий графо-аналітичний метод СНиП II-12-77 [18]?

Як про це пишуть автори [79, с. - 201] (вони ж самі, мабуть і є основою авторського колективу [18], та пояснюють його положення в довідковому виданні): *"...Хотя кривая звукоизоляции в области граничной частоты имеет неравномерный характер, для ограждений из традиционных строительных материалов, за исключением металлических и стеклянных, её можно без особой ошибки заменить горизонтальным отрезком ВС..."*

Специфічна складність, з якою зштовхнувся автор цієї роботи при математичному моделюванні, полягає в несумісності графічних матеріалів, використовуваних у нормативних документах (дуже широко застосовувані в СНиП, ГОСТ і ін. графіки, номограми і т.п.), із задачами прикладного програмування. Практично неможливо скласти комп'ютерну програму, що враховує, наприклад, деякі дані, приведені в нормативному документі не інакше, як у вигляді номограм. Цей принциповий недолік математичного моделювання наочно представлений у главі 6.2. Там приводиться реальна комп'ютерна програма, спеціально розроблена автором для цілей акустичного

розрахунку рівнів звукового тиску, створюваного виробничим устаткуванням у приміщенні. Відмінністю її від аналогічних програм є уїдливе і доскональне проходження букви СНиП [18], на базі положень і розрахункових формул яких вона і побудована. При цьому порівняно легко удалося перекласти на мову програмування основні розрахункові формули СНиП. Однак, як відомо, у такому розрахунку згідно п. 4.2 СНиП [18,- с. 4] фігурує величина ψ – «коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении, принимаемый ... по графику на рис. 3». Там же, на с. 4 СНиП, приводиться відповідний графік для його визначення (він же використовується також і в іншому випадку – розрахунках звукопоглинання по п. 7.7 СНиП [18, - с. 21], де у формулі (43) задіється як цей коефіцієнт у його безпосередньому вигляді, так і ψ_1 – той же коефіцієнт, але після влаштування звукопоглинальних конструкцій, обумовлений за тим же графіком). Це положення нормативного документа обов'язково повинне бути враховане в здійснюваному акустичному розрахунку.

Оскільки в СНиП [18] не приводиться конкретна математична формула, який підкоряється графік функції, показані на рис. 3 СНиП, його математична інтерпретація виявляється неможлива. Укладачі СНиП явно не враховували вимогу безперервності комп'ютерних розрахунків: після довгого і плідного ланцюжка автоматичних обчислень, здійснюваних по приведеним там же формулах, розрахунок приходиться обривати, переходити в ручний режим, вдивлятися в графік СНиП, визначаючи шукані коефіцієнти ψ і ψ_1 для даного випадку (єдине, що виявилось можливо зробити укладачу: для зручності користувача програмою сканувати малюнок зі СНиП, і вставити прямо в текст програми оцифроване зображення (див. рис. 6.10 в подальшому тексті наступної

частини)); після вручну вводити їх у відповідні осередки даних. Програма виявляється розірвана як би на 2 половини: ну, а далі з цього місця процес розрахунку продовжується вже, як і колись, цілком автоматично, і завершується виконанням усіх необхідних обчислень і побудовою спектрів шуму.

Крім того, багато місць в методиках нормативних документів, що запропонують такі інженерні розрахунки, неконкретизовані явним чином. Ось як, наприклад, критикують [18] автори роботи [278] (автор цієї монографії в даному випадку із ними повністю згодний): *"...Кроме того, оставался нежелательный простор для проявления субъективного фактора, когда оператор должен был принимать решения, руководствуясь «пониманием ситуации». Так, например, СНиП II-12-77 "Защита от шума" при расчете шума на территории предписывает принимать решение о «количестве отражающих поверхностей вблизи источника»; при этом понятие «вблизи» не определяется ни качественно (в каких единицах: метрах, длинах волн ...) ни количественно (сколько этих единиц). Не говоря уж о том, что в рамках выбранного подхода и терминологии не менее важно учитывать и наличие отражающих поверхностей вблизи расчетной точки. Более адекватной представляется модель распространения, основанная на рассмотрении отражений звука от всех возможных поверхностей (картина мнимых источников). Недостатком данной модели при выполнении ручных расчетов является несомненная громоздкость рутинных расчетов, что ранее значительно ограничивало возможности реализации в повседневной практике проектирования. Эти ограничения в настоящее «компьютерное» время практически полностью снимаются.*

Большое значение при расчетах имеет экранирование

источников. СНиП определяет приближенную, табличную методику оценки эффективности шумозащитных экранов, как для транспортных магистралей, так и для технологических источников. Однако при расчете сложной модели, где много источников и много препятствий (кромка кровли, навес, фасад или угол здания, соседнее оборудование и т.д.), воспользоваться этой методикой практически невозможно. В этих случаях, расчетчик также, по собственному опыту старается принять решение: какие препятствия учитывать, какие нет, какие источники можно без расчета исключить из рассмотрения, какие необходимо принимать во внимание. При таком субъективизме в принятии параметров расчета, не зависимо от того, используется ли вычислительная техника или нет, результат дает точность приемлемую только для предварительной оценки.

Подобных примеров, к сожалению, можно привести слишком много..."

Далі автори роботи [278] (а автор цієї монографії - це повністю стверджує) доводять, що поряд з інженерними методами розрахунку, запропонованими СНиП, всі ці роки існувала досить серйозна як теоретична, так й емпірична база, заснована на результатах досліджень як вітчизняних, так і закордонних фахівців. Відмова від найбільш прогресивних, точних, докладних методів розрахунку в ті часи була обумовлена відсутністю комп'ютерної техніки, та бажанням облегшити життя рядовим проектувальникам (дехто з яких, наприклад, навіть не знав, чим відрізняється децибел від децибела А: (але при тому **виконував** ті розрахунки)).

Загальна комп'ютеризація, станом на теперішній час, призвела лише до автоматизації розрахункових операцій. Тобто, лівова частка сучасних програмних засобів, що

мають метою автоматизацію різного роду акустичних розрахунків, побудовані на застарілих методиках, на застарілій методології розрахунку. Знов-таки, посилаючись не тільки на свої власні погляди, а ще на текст однодумців [278] можна казати, що більшість таких програм являють собою пряме калькування «спрощених» методів розрахунку із всіма їхніми недоліками, а сучасна обчислювальна техніка використовується фактично у функції «калькулятора».

Тому методологія акустичних розрахунків потребує повного перегляду. При тому не треба здійснювати нові наукові відкриття, не треба виконувати якісь об'ємні дослідження: потребується лише повернутися до фундаментальних основ будівельної акустики. Але застосування добре відомих (однак не застосованих в інженерних методах розрахунку) теорій неминуче призводить до значного збільшення кількості вихідних даних. Необхідно не просто перекласти розрахункові формули на комп'ютер, необхідний принципово новий підхід.

Вихідні дані математичної моделі процесів розповсюдження звуку нового покоління повинні включати в себе інформацію про існуючу забудову та рельєф місцевості (тобто базуватися на досягненнях такого напрямку сучасної науки і техніки, як "Геоінформаційні системи та технології"). Це не є складним завданням, бо ГІС на даному етапі вже є досить розвинутою галуззю, а сама аббревіатура "ГІС" в наукових працях найчастіше надається без розшифровки. У цей час вже існують комп'ютерні технології, які дозволяють одержати масштабну трьохмірну модель забудови за ситуаційним планом місцевості. Потребується наділити їх можливістю створювати трьохмірну картину зашумованості цієї забудови на підставі відомих фізичних залежностей, що

описують процеси розповсюдження шуму в складних умовах. Проектувальникові необхідно тільки розташувати в ній джерела шуму й задати їхні рівні звукової потужності. Відповідна програма, аналізуючи модель, знайде всі перешкоди й поверхні, що відбивають, для кожного джерела, визначить сукупний внесок з урахуванням габаритів і геометрії взаємного розташування. Можливість автоматичного аналізу характеру шумовипромінювання, взаємного розташування джерел, а також умов поширення звукової хвилі; врахування всього цього вищепереліченого в обчислювальних викладках є унікальною перевагою комп'ютерного моделювання.

Зовсім інший ступінь деталізації й візуалізації дозволяє уточнити й переглянути багато базових понять, наприклад поняття «границі санітарно-захисної зони за фактором шуму». Відомо, що шумовий режим прилягаючих територій і забудови визначається не тільки потужністю шумовипромінювання підприємства, але й у не меншому ступені залежить від об'ємної конфігурації будов як самого підприємства, так і прилягаючої забудови. Використовувані в цей час методики дозволяють оцінити її по контрольних точках на різних висотах. Математичне моделювання акустичних полів дозволяє визначати границю СЗЗ за фактором шуму не як лінію на фіксованій відстані від поверхні землі, а як тривимірну (просторову) поверхню, що однозначно визначає вплив об'єкта не тільки по всіх румбах, але й але всіх висотах.

Автор цієї монографії захистив дисертацію на тему: "Аналогове моделювання при вирішенні завдань боротьби з шумом", написав книгу «Аналогове та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об'єкті, що захищається», що існує у двох виданнях (фактично - дві

різні книги): [210], 1997 та [212], 2007 (електронні версії яких надані в Інтернет за веб-адресами [211, 221]); зробив 8 запатентованих винаходів в галузі аналогового моделювання, та опублікував значну кількість робіт саме по аналоговому моделюванню. Отже, при поверхневому погляді, розмірковуючи за формальними критеріями, він може вважатися фундатором саме аналогового моделювання? Як же тоді він може писати про математичне моделювання в акустиці?! Але не слід забувати про те, що значну кількість наукових добутоків автора складають саме математичні моделі звуку [125 - 88]; що автор також зробив вагомий внесок в розвиток такого напрямку, як фізичне моделювання в акустиці (ввів додатковий критерій подібності, що докладно описано в попередньому підрозділі 4.4). Тому свій загальний науковий напрямок автор охарактеризував би як "фізичне, аналогове та математичне моделювання в акустиці"; те, що в якості теми його кандидатської дисертації був обраний один окремих з перелічених піднапрямків, є тільки свідченням тільки того, що той піднапрямок на час захисту був найменш вивченим. Для вирішення кожного конкретного завдання потребується свій власний інструментарій; і найкращім рішенням є вибір найбільш оптимального засобу моделювання в залежності від його умов.

Аналогові моделі відіграють роль засобу перевірки найбільш складних "вузлів" загальної картини зашумованості: наприклад, таких місць, де стається накладення декількох інтерференційних та дифракційних явищ одне на одного - (конкретним прикладом може бути хвильова картина поблизу місця перетинання під прямим кутом стан будинку складної конфігурації у місці, де з'єднуються дві його частини, перпендикулярні в плані одна одній).

Тому в наступній главі ми розміщуємо трикутникову схему перевірки математичної моделі процесів розповсюдження звуку аналоговим та фізичним моделюванням.

4.9. Точність і вірогідність результатів моделювання [279]

Достатня для технічних досліджень точність моделювання повинна бути забезпечена доступними засобами. Стосовно до аналогового і квазіаналогового моделювання процесів поширення різноманітних випромінювань це означає, що підвищення точності моделювання зв'язано з підвищенням ступеня адекватності математичних описів адекватних процесів у моделі й у натурі; а також з підвищенням точності виконання елементів моделі; дорівнює точності завдання необхідних початкових і граничних умов для моделювання. Кінцева точність моделювання буде визначатися впливом на кінцевий результат малих відхилень величин, що його визначають, - які, наприклад, задаються на вході системи.

Погрішності моделювання виникають у результаті дії безлічі сумарних факторів, кожний з яких несе в собі локальну погрішність.

Якщо не враховувати грубі помилки (так звані промахи), що порівняно легко можуть бути ідентифіковані завдяки наявності зворотного зв'язку між експериментатором і пристроєм моделювання, сумарна погрішність Q_{Σ} складається із систематичної $Q_{\text{систем}}$ і випадкової $Q_{\text{випадк}}$ погрішностей:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{систем}} + Q_{\text{випадк}}$$

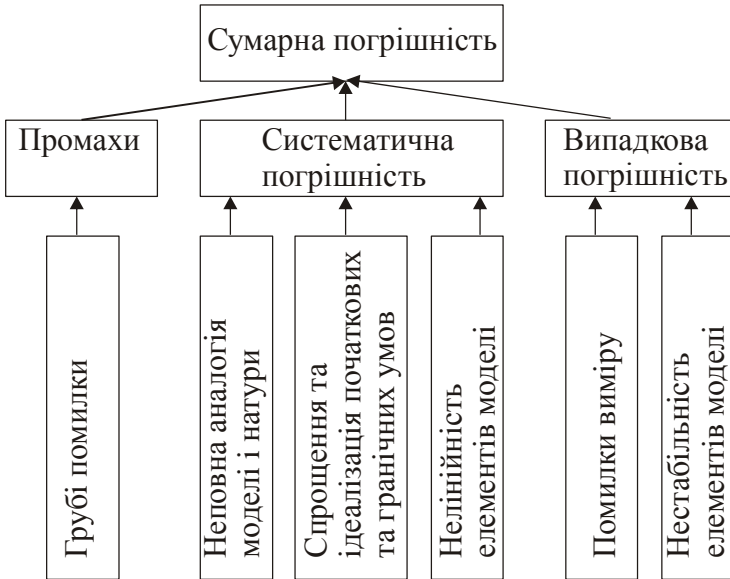


Рис. 4.21. Погрішності, які утворюють сумарну погрішність.

Випадкова погрішність $Q_{\text{випадк}}$ при моделюванні являє собою помилки виміру, і погрішності від нестабільності різних елементів моделі, що мають характер випадкових функцій. Оскільки пропонувані пристрої моделювання можуть бути використані для рішення безлічі типових задач, поняття «випадкові погрішності» розширюється.

До випадкової погрішності $Q_{\text{випадк}}$ можуть бути віднесені помилки набору параметрів системи в моделюючому пристрої, що можуть приймати випадкові значення, обмежені полем допуску, - і мати при тому істотну вагу в сумарній погрішності моделі. Оцінка випадкової погрішності здійснюється за рахунок повторного рішення якої-небудь задачі на аналоговій моделі, при якому створюються різні сполучення використовуваних однотипних елементів моделі для набору тієї ж задачі. Розсіювання результатів наочно видно з результатів повторних вимірів, що проводяться не менш

3 разів; рішення уточнюється за рахунок отриманих середніх значень.

Систематична погрішність $Q_{\text{систем}}$ носить регулярний характер і виникає в результаті неточності математичного опису щодо дійсного фізичного процесу (тобто - неповна аналогія моделі). Мається на увазі так звана методична погрішність, що є наслідком відступу від точної подібності натури і моделі. Цей відступ викликаний відомим спрощенням моделі, і внесенням ряду додаткових факторів, що ускладнюють явища в моделі.

До систематичної погрішності $Q_{\text{систем}}$ відносяться також погрішності від завдання початкових і граничних умов, у зв'язку з їх спрощенням і деякою ідеалізацією; а також погрішності апроксимації функціональних залежностей, реалізованих нелінійними елементами аналогової моделі (до яких відноситься, наприклад, загасання моделюючого випромінювання).

Для оцінки локальних систематичних погрішностей результатів моделювання вони зіставлялися з рішенням, у якому дана погрішність зменшена. При цьому фізична система з розподіленими параметрами (наприклад, моделі ДШ) представляється у вигляді сукупності лінійних елементів; а помилка оцінюється зіставленням між собою рішень для $1n$; $2n$; $4n$: ... елементів. Кусочно-лінійна апроксимація нелінійних залежностей спаду інтенсивності випромінювання при поширенні його на моделі залежно від відстані для оцінки помилок по черзі заміняється при моделюванні $1n$; $2n$; $4n$: ... елементів. При дослідженні локальних погрішностей виявилось, що в аналоговій і квазіаналоговій моделі вони залежать від безлічі причин, не усі з яких очевидні.

Тому поряд з оцінкою основних видів локальних погрішностей застосовується загальна оцінка погрішності моделювання, реалізована для груп подібних систем

шляхом порівняння результатів моделювання аналоговими методами з чисельним рішенням контрольних задач, для яких малися точні аналітичні рішення, отримані шляхом використання описаних вище аналітичних і графічних методів; а також – дані натурних вимірів.

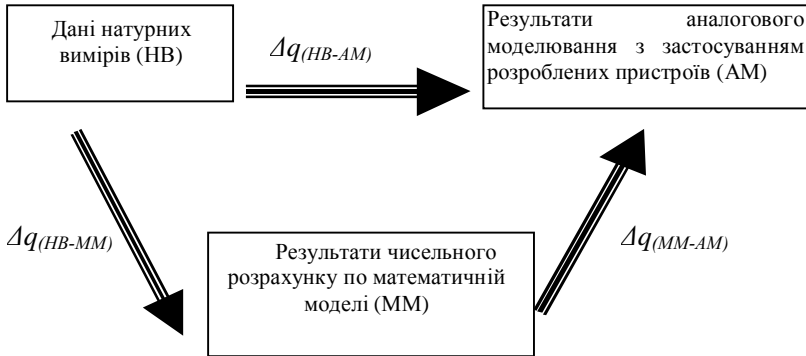


Рис. 4.22. Зіставлення погрішностей натурних вимірів, математичної, і аналогової (квазіаналогової) моделей процесів поширення звуку, призначених для визначення ефективності шумозахисних пристроїв: $\Delta q_{(НВ-ММ)}$ – первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини при її натурних вимірах, і її обчисленні по математичній моделі (недосконалість математичного опису; мала вивченість фізичного явища, що моделюється, самого по собі); $\Delta q_{(ММ-АМ)}$ – первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини між результатами аналогового (квазіаналогового) моделювання, і її обчисленні по математичній моделі (невірогідність відображення в моделі адекватних процесів); $\Delta q_{(НВ-АМ)}$ – первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини при її натурних вимірах і результатами аналогового (квазіаналогового) моделювання (недосконалість моделі)

При цьому переслідується не одержання строгого збігу результатів аналогового моделювання з відомими чисельними рішеннями, - а вірогідність відображення в моделі досліджуваного хвильового явища. У зв'язку з цим

враховуються вимоги точності чисельного рішення стосовно до використовуваних математичних моделей. Зіставлення перерахованих вище трьох груп даних дозволило виділити три різновиди первинних погрешностей: $\Delta q_{(HB-MM)}$; $\Delta q_{(MM-AM)}$; $\Delta q_{(HB-AM)}$. Вони представлені на схемі, з якої випливає:

$$\Delta q_{(HB-AM)} = \Delta q_{(HB-MM)} + \Delta q_{(MM-AM)}. \quad (4.11)$$

Зводимо (4.11) в квадрат:

$$\delta^2 q_{(HB-AM)} = \delta^2 q_{(HB-MM)} + \delta^2 q_{(MM-AM)} + 2 \delta^2 q_{(HB-MM)}$$

При цьому відповідною відносною погрешністю є:

$$\Delta(q) = \Delta q/q.$$

Оскільки на запропонованих пристроях моделювання вирішується безліч однотипних задач для кожної фізичної величини, можна провести усереднення відносної погрешності по цій безлічі.

Припустимо, що відносна первинна погрешність завдання параметрів q_i ($i = 1; 2; \dots; n$, $n \rightarrow \infty$). Число однотипних задач розподіляється за законом Гауса:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-AM)} = \sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-MM)} + \sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(MM-AM)}$$

Оскільки по аксіомі випадкових погрешностей:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-MM)} \cdot \delta^2(q_i)_{(MM-AM)} = 0 \quad (4.12)$$

Із (4.12) випливає залежність між середніми квадратичними помилками δ завдання вихідних величин:

$$\sigma^2 q_{(HB-AM)} = (\sigma^2 q_{(HB-MM)} + \sigma^2 q_{(MM-AM)})^{1/2}.$$

Ідентична залежність існує і для граничних помилок $\sigma_{\text{граничне}}$, що характеризують поле допуску величин, що задаються. Приймається:

$$\sigma_{\text{граничне}}(q) = 3 \sigma(q).$$

При розгляданні формули (4.12) був зроблений висновок, що збільшення погрішності від натурних вимірів, - (даних по який у загальному випадку може і не бути: досить тільки даних розрахунку по математичній моделі – якщо вона досить достовірна стосовно натурних процесів, що вона описує?) - стосовно пристрою аналогового моделювання в порівнянні з математичною моделлю визначаються формулою:

$$\sigma_{(НИ-АМ)} = \sigma_{(НИ-ММ)}(1 + \alpha)^{1/2},$$

$$\text{де } \alpha = \sigma_{(ММ-АМ)} / \sigma_{(НИ-АМ)}.$$

При дослідженні точності і вірогідності всіх розроблених особисто нами пристроїв аналогового і квазіаналогового моделювання з'ясувалося, що погрішність вихідної величини в пристрої моделювання в 2 рази менше погрішності завдання цих же величин у порівнянні з натурою в математичній моделі. Тоді при $\alpha \leq 1/2$ помилка в 2% збільшується не більш, ніж до значення 2,2%! Таким чином, варто зробити висновок про однакову вірогідність усіх пропонованих аналогових і квазіаналогових моделей, і математичної моделі.

Тому що загальна погрішність шуканої величини залежить від первинних помилок завдання вихідних величин, причому внески різних первинних помилок також різні, були застосовані методи експериментального визначення складових загальної погрішності по первинних помилках. Припустимо, що шукана величина ψ зв'язана з вихідною величиною:

$$\psi = Y \cdot F(q_1; q_2; \dots; q_n)$$

де Y – зовнішнє збурювання, що діє на систему (узагальнені зовнішні сили, що дестабілізують її);

q_i – параметри системи, що задаються ($i = 1; 2; \dots$);

n).

Тоді випадкова помилка у визначенні шуканої величини ψ :

$$\Delta\psi = Y \sum_{i=1}^{\infty} (\partial F / \partial q_i) \Delta q_i + YF$$

Визначимо відносну випадкову помилку на підставі наведеного вище:

$$\Delta\psi / \psi = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\partial F / \partial q_i)}{F / q_i} (\Delta q_i / q_i) + \Delta Y / Y \quad (4.13)$$

Впливаючи із (4.13), запишемо вираження для середньої квадратичної помилки моделювання:

$$\sum(\psi)_{\text{НИ-AM}} = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\left\{ \frac{(\partial F / \partial q_i)}{F / q_i} \right\}^2 \sigma^2 q_{(AM-MM)} + \sigma^2 q_{(НВ-AM)} \right]^{1/2}$$

Вищеописані пристрої були реалізовані таким чином, щоб їхня систематична погрішність $Q_{\text{систематич}}$ не перевищувала задану частку методичної погрішності математичної моделі $Q_{\text{методич(ММ)}}$, а погрішність виміру в них, обумовлена точністю використовуваних вимірювальних приладів, не збільшувала значним чином загальну погрішність моделювання, що досягалося за рахунок застосування прецизійних вимірювальних приладів.

Погрішність результатів обчислення на математичній моделі, основу якої склали загальновідомі акустичні закономірності, призначалася таким чином, щоб не збільшувати погрішність, обумовлену іншими причинами. Така математична модель, також розроблена автором, докладно описана в главі 6.2.

Тому загальна помилка моделювання, заснована на

вихідних даних, не перевищує помилки чисельного рішення з використанням математичної моделі; і результати аналогового (квазіаналогового) і математичного моделювання є однаково достовірні.

ЧАСТИНА 5. Розрахунок часу реверберації звуку в приміщеннях

5.1. Загальні відомості

В залах як типових, так й унікальних будинків суспільного призначення необхідно забезпечити умови гарної чутності мови й музики. Найцікавіший напрямок сучасної фізики - архітектурна акустика, - створює умови акустичного комфорту в зальних приміщеннях.

Архітектурна акустика сполучає в собі гадану простоту експерименту зі складністю теоретичного аналізу звукових процесів у приміщеннях. Зв'язано це з тим, що "експериментатором" у даній області є кожен відвідувач або глядач, який знаходиться в залі, де виконується та або інша вистава або програма, який оцінює її "якість", не замислюючись про те, що разом з музикою він одночасно сприймає й звучання зального приміщення, у якому перебуває.

Згідно з [280], архітектурна акустика (вона ж - акустика приміщень), являє собою область акустики, що вивчає поширення звукових хвиль у приміщенні, відбиття й поглинання їхніми поверхнями, вплив відбитих хвиль на чутність мови й музики. Метою досліджень служить створення прийомів проектування залів (театральних, концертних, лекційних, радіостудій і т.п.) із заздалегідь передбаченими гарними умовами чутності. У закритих приміщеннях більш-менш значного обсягу слухач сприймає, крім прямого звуку, ще й ряд його запізнілих повторень, обумовлених відбиттями від обмежуючих поверхонь, і таких, що швидко наступають одне за одним. Внаслідок поглинання звукової енергії при кожному відбитті й у процесі її поширення ці повторення послабляються тим сильніше, чим більше їхнє запізнювання щодо прямого звуку. Після вимикання джерела звуку кількість відбитої енергії в приміщенні

убуває доти, поки вона не буде поглинутою; це поступове загасання звуку називається реверберацією.

Розглянемо процеси, що відбуваються в приміщенні при звучанні джерела ДШ (рис. 5.1).

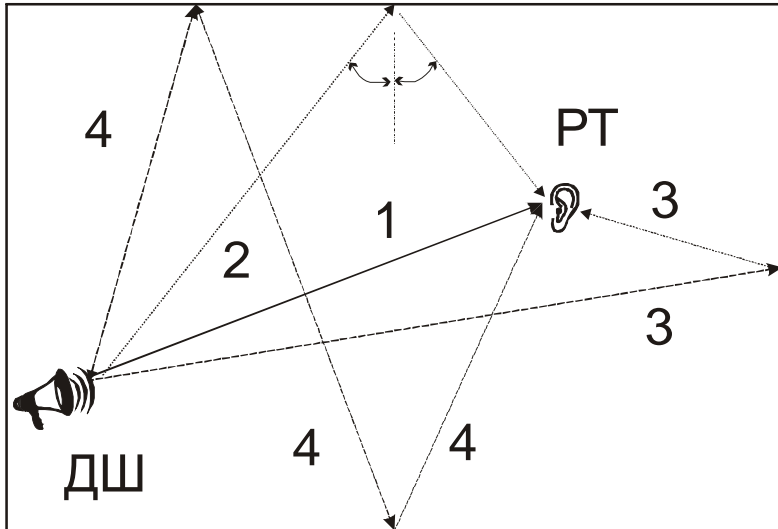


Рис. 5.1. Прямий і відбиті сигнали в приміщенні.

Першим у точку прийому РТ, де перебувають вуха слухача або мікрофон, приходять за шляхом 1 прямий звук, потім за шляхом 2 звуки, відбиті від найближчих до джерела поверхонь, далі звуки за шляхом 3, відбиті від віддалених поверхонь. Пізніше приходять звуки, що перетерпіли дворазові відбиття на шляху 4, і т.д. Кількість відбиттів в одиницю часу зростає пропорційно другому ступеня часу. Приміщення поступово заповнюється звуковою енергією. Після припинення звучання джерела починається процес відзвучу. У тій же послідовності, як і на початку звучання, спершу в точку прийому приходять порівняно рідкі початкові відбиття. Далі щільність запізнілих імпульсів збільшується, а їхня енергія поступово спадає (рис. 5.2).

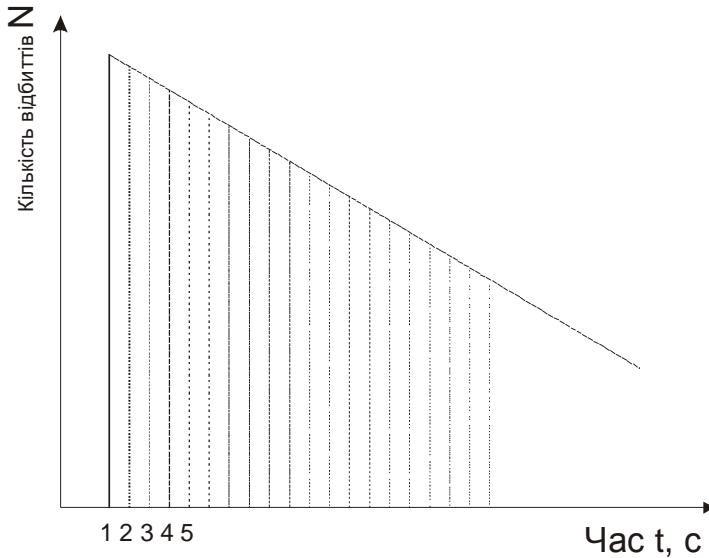


Рис. 5.2. Структура ранніх відбиттів ревербераційного відгуку.

Тривалість реверберації є найважливішим чинником, який визначає акустичну якість залів. При надмірно повільному загасанні звучання мови й музики виявляється недостатньо чітким, при короткій реверберації мова звучить занадто глухо, а музичні звучання втрачають злитість і виразність.

Вуху людини розрізняє близько 50 градацій часу реверберації в діапазоні від 0,5 до 3 с, тобто часто використовуваних її значень [281]. Ці дані свідчать про те, що наше слухове сприйняття - феноменально тонкий акустичний інструмент. Навіть при оптимальній реверберації на акустичну оцінку залу впливають розподіл часів приходу ранніх, більше інтенсивних відбиттів, а також і напрямки, по яких вони досягають слухача. Найбільш сприятливі умови різні між собою не тільки для мови й музики, але й для музичних добуток різного характеру (камерна, естрадна, симфонічна музика). Тому акустичне проектування концертних залів (вибір форми,

розміщення слухачів, обробка обмежуючих поверхонь приміщення конструкціями, які розсіюють і поглинають звук, застосування підвісних відбивачів і т.д.) нерідко вимагає компромісних рішень. У залах великої місткості умови чутності можуть бути поліпшені за рахунок застосування електроакустичних систем посилення й штучної реверберації. Видатним прикладом електроакустично оснащеного залу універсального призначення (конгреси, концерти, опера, кінотеатр) може служити великий (6000 місць) зал Палацу з'їздів у Московському Кремлі.

Історично склалося так, що розвиток наукових досліджень даної галузі йшов роздільно по трьох основних напрямках: фізичний аналіз натуральних акустичних сигналів (мова, музика), архітектура зальних приміщень й дослідження психофізіологічного процесу слухового сприйняття людиною акустичної інформації. Перші спроби зв'язати два останніх із зазначених напрямків були розпочаті ще в Древній Греції, знамениті театральні амфітеатри якої створювалися із застосуванням ряду акустичних прийомів для посилення звучання мови акторів на сцені. У подальшому питання гарної чутності в залах розглядалися ще в 1-м столітті до н. е. римським архітектором Вітрувієм. Твори Вітрувія були вперше переведені на російську мову одним з найбільш відомих архітекторів Росії - В. Баженовим, який застосував їх відомості при створенні ряду акустично оброблених будинків власного проектування. Тоді ж працював інший видатний російський зодчий - М. Казаков, по проектах якого також був побудований ряд видатних об'єктів, і в тому числі унікальний зал Дворянського Собранія у Москві, відомий у наш час як Колонний зал. У той же період почала складатися й знаменита школа класичної європейської театральної архітектури, основу якої

становлять ярусні зали, що мають в плані форму підкови.

Однак, як не дивно, довгий час питання майстерності видатних зодчих різних країн миру вступали у відоме протиріччя із проблемою систематичного наукового вивчення акустики залів. Причина полягала в тім, що дійсно великі майстри архітектури щиро вважали себе служителлями мистецтва (на що, мабуть, мали повне право). Разом з тим повністю розібратися у всіх таїнствах перетворення майстерності архітекторів і мистецтва виконавців у чудове звучання класичних залів неможливо без чисельних розрахунків.

Початок цього процесу поклав наприкінці ХІХ століття американський дослідник У. Себін, з ім'ям якого зв'язане становлення архітектурної акустики як науки. Він спробував оцінити акустичні власності будь-якого приміщення, незалежно від його призначення, за допомогою універсального критерію, - так названого часу реверберації, що характеризує швидкість загасання звуку від максимального значення до однієї мільйонної його частини (або на 60 дБ). За тривалість процесу реверберації було прийнято вважати проміжок, за який щільність звукової енергії зменшується в 10^6 разів, звуковий тиск в 10^3 , а рівень звукового тиску на 60 дБ.

«Reverberation» у перекладі означає "відбиття", "відзвук". У Німеччині для позначення цього процесу використовується слово Nachhall, у перекладі на українську "відзвук", "відгомін", "відгук". Термін "отзвук" раніше зустрічався й у російській технічній літературі

Прямих пояснень мотивів вибору спаду рівня на 60 дБ немає. В роботі [133] наводиться така спроба дати пояснення цьому значенню. Фортисимо оркестру відповідають рівні звукового тиску 90-100 дБ, а піаніссимо - 35-40 дБ. Тоді середні рівні складають 63-70 дБ і прийнятий по визначенню (зменшення на 60 дБ) час

реверберації буде приблизно відповідати тривалості спаду середніх рівнів до порога чутності. Можливо, дане обставина й стала причиною вибору такого визначення часу реверберації?

Вважалося, що цей параметр тісно пов'язаний із суб'єктивним сприйняттям гучності звучання залу.

Досить багато років час реверберації залишався практично єдиним параметром об'єктивної оцінки акустики залів, і основні дослідження вчених різних країн були спрямовані на виявлення діапазонів оптимальних значень цього параметра залежно від обсягу й призначення приміщення. У ході практичного аналізу акустики залів, однак, виявилася явна недостатність використання тільки часу реверберації як єдиного критерію акустичної якості. Як з'ясувалося, на процес слухового сприйняття звуку в залах, крім загальної оцінки гучності звучання, впливають і багато інших об'єктивних і суб'єктивних факторів (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Фактори, що впливають на процес слухового сприйняття звуку в залах, окрім загальної оцінки гучності звучання.

Крім того, попутно було з'ясовано, що простий розподіл натуральних звучань на мову й музику явно недостатній для детальних досліджень акустики залів. Як мінімум, впливало розділити мову на інформаційну й художню (у тому числі й вокал сольних оперних партій), а музику - на легку та серйозну: зробити так, як показано на рис. 5.4

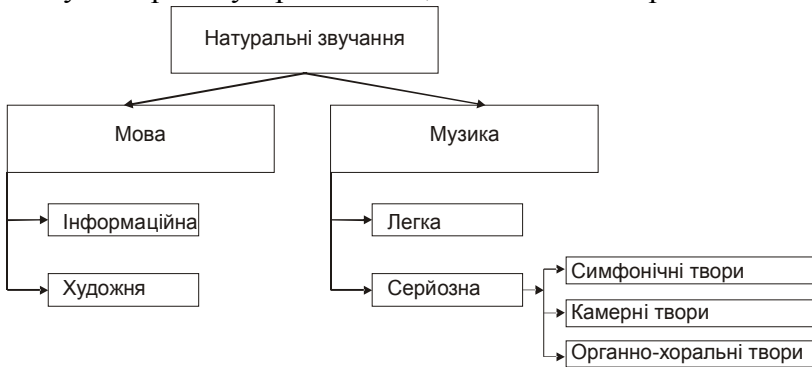


Рис. 5.4. Класифікація видів натуральних звучань, кожний з яких вимагає специфічні умови реверберації.

Кожна з цих категорій вимагає своїх специфічних умов для оптимізації розповсюдження звуку в зальних приміщеннях.

Важливим для слухового сприйняття є запізнювання відбитих звукових хвиль. Звук, випромений джерелом, доходить до перешкоди (наприклад, стіни) і відбивається від неї. Процес багаторазово повторюється із втратою при кожному відбитті частини енергії. До розрахункової точки перші запізнілі імпульси, як правило, приходять після відбиття від стелі й стін залу (студії). Внаслідок інерції слуху людина має здатність зберігати (інтегрувати) слухові відчуття, поєднувати їх у загальне враження, якщо вони тривають не більше 48 мс. Тому до корисного звуку, що підкріплює вихідний, відносяться всі хвилі, які досягають РТ протягом 48 мс після вихідного звуку. Запізнюванню на 48 мс відповідає різниця в шляху 17 м. Концентровані

звуки, що приходять пізніше, сприймаються як луна. Відбиття від перешкод, що укладаються в зазначений проміжок часу, є корисними, бажаними, тому що вони збільшують відчуття гучності на значення, що доходять до 5 - 6 дБ, поліпшують якість звучання, надаючи звуку "жвавність", "пластичність", "об'ємність".

Істотну роль грає напрямок приходу початкових відбиттів. Якщо запізнілі сигнали, тобто всі ранні відбиття, надходять до слухача з того ж напрямку, що й прямий сигнал, слух майже не розрізняє різниці як звучання в порівнянні зі звучанням тільки прямого звуку. Виникає враження "плоского" звуку, позбавленого об'ємності. Тим часом навіть прихід тільки трьох запізнілих сигналів по різних напрямках, незважаючи на відсутність ревербераційного процесу, створює ефект просторового звучання. Якість звучання залежить від того, з яких напрямків й у якій послідовності приходять запізнілі звуки. Якщо перше відбиття надходить із фронтального боку, звучання погіршується, а якщо з тильної сторони, то різко погіршується.

Досить істотне значення має час запізнювання початкових відбиттів стосовно моменту приходу прямого звуку й відносно один одного. Тривалості запізнювання повинні бути різними для найкращого звучання мови й музики. Гарна розбірливість мови досягається, якщо перший запізнілий сигнал надходить не пізніше 10 - 15 мс після прямого, а всі три повинні займати інтервал часу 25 - 35 мс. При звучанні музики найкраще відчуття просторовості й "прозорості" досягається, якщо перше відбиття надходить до слухача не раніше 20 мс і не пізніше 30 мс після прямого сигналу. Всі три запізнілі сигнали повинні розташовуватися в проміжку часу 45 - 70 мс. Найкращий просторовий ефект досягається, якщо рівні запізнілих початкових сигналів незначно відрізняються

друг від друга й від рівня прямого сигналу.

При підключенні до структури початкових відбиттів (першого, другого, третього) іншої частини відзвуку найбільш сприятливе звучання виходить у тому випадку, коли друга частина процесу починається після всіх дискретних відбиттів. Підключення ж процесу реверберації (відзвуку) відразу ж за прямим сигналом погіршує якість звучання (рис. 5.5).

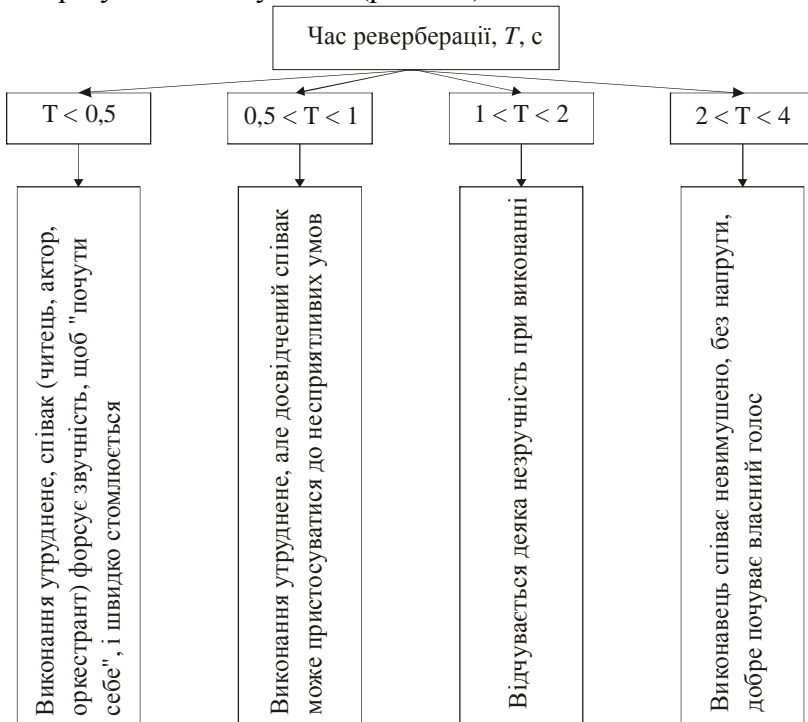


Рис. 5.5. Комфортність умов виконання (фонації) для співака за часом реверберації

Трохи менші значення часу реверберації є комфортними для читця. Однак з позицій слухача більше прийнятний час реверберації від 1 до 1,7 с залежно від характеру добуток, що виконує. Щоб переконати це протиріччя, необхідно

створити досить більшу місцеву реверберацію в зоні розташування виконавців. Ефективні звуковбирні матеріали розміщують тому на тих поверхнях, які можуть дати інтенсивні відбиття з великою різницею ходу стосовно прямого звуку. Інші перешкоди покривають звуковбирними матеріалами лише таким чином, щоб забезпечити потрібну реверберацію в залі й не допустити нерівномірного загасання різних частотних складового спектра звуку. Навіть при проектуванні студій варто обачно ставитися до рекомендації рівномірно розміщати звуковбирні матеріали. У зоні розташування виконавців бажано забезпечити більшу реверберацію, чим в іншій частині студії. Не вся тривалість процесу реверберації відчувається нашим слухом. Постійна часу слуху t , що характеризує інерційні властивості слуху й відповідає спаду слухового відчуття в ϵ разів (зменшенню рівня гучності на 8,7 дБ), становить за різними даними 0,125-0,15 с (за деякими відомостями навіть 0,165 с). Це відповідає спаду рівня інтенсивності на 60 дБ, тобто часу стандартної реверберації 0,86-1,05 с. Отже, процес реверберації при $T < 0,86$ с мало помітний на слух через його маскування власним процесом спаду слухового відчуття. Ще більше він маскується акустичними перешкодами (шумами) приміщення. Тому тривалість чутної частини відзвуку становить менш половини часу реверберації й реверберація при $T < 0,86$ с мало відчувається нашою свідомістю. Для відчуття повноти музики час реверберації повинний бути істотно більше 0,86 с. Як відомо, цей оптимум становить для різних музичних звучань від 1 до 1,7 с.

При забезпеченні оптимальної структури початкових (ранніх) відбиттів звучання музики залишається гарним навіть при значному (на 10 - 15%) відхиленні часу реверберації від рекомендованих значень. Досягнення

оптимального запізнювання відбитих сигналів стосовно прямого звуку висуває вимогу до мінімального обсягу приміщення, що не рекомендується порушувати. Тим часом при проектуванні приміщення вибирають його розміри, виходячи із заданої місткості, тобто вирішують завдання чисто економічно, що є неправильним. Навіть у невеликому концертному залі оптимальну структуру ранніх відбиттів можна одержати лише при заданих висоті й ширині залу перед естрадою, менше яких спускатися не можна.

Але все це справедливо у відсутності акустичних перешкод. При шумах, наприклад, з рівнями 30-40 дБ, що характерно й для житлової кімнати, і для концертного залу, значна частина відзвуку буде маскуватися шумами, і чутний відзвук буде тривати менш половини часу реверберації.

* * *

Такі відомості відносно складності розглядуваних процесів ми надаємо для того, щоб показати, що врахування багаторазових відбиттів в акустичних розрахунках – справа в технічному та науковому плані дуже серйозна. Існує безліч факторів, що неможливо врахувати логічними попередніми умопобудовами. Ось що, наприклад, пишуть на [282]: «...Исследования начальных отражений методом акустического моделирования были проведены в Научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) под руководством А. И. Качеровича. Изучалось влияние на качество звучания речи и музыки формы, объема, линейных размеров, размещения звукопоглощающих материалов. Получены интересные результаты.

Существенную роль играет направление прихода начальных отражений. Если запаздывающие сигналы, т.е. все ранние отражения, поступают к слушателю с того

же направления, что и прямой сигнал, слух почти не различает разницы в качестве звучания по сравнению со звучанием только прямого звука. Возникает впечатление плоского звука, лишённого объёмности. Между тем даже приход только трех запаздывающих сигналов по разным направлениям, несмотря на отсутствие реверберационного процесса, создает эффект пространственного звучания. Качество звучания зависит от того, с каких направлений и в какой последовательности приходят запаздывающие звуки. Если первое отражение поступает с фронтальной стороны, звучание ухудшается, а если с тыльной стороны, то резко ухудшается...»

Незважаючи на значні успіхи в області акустики музичних залів, завдання забезпечення в них комфортних акустичних умов виявляється складним. Основні труднощі тут полягають у тому, що поки ще не встановлено досить точні однозначні зв'язки великої кількості існуючих об'єктивних критеріїв, – (їх більше 20-ти), – із суб'єктивними оцінками якості сприйняття музичних добутоків спеціально підготовленим експертами або видатними музикантами.

Розглянемо, наприклад, наскільки правомірна при проектуванні залів вимога дифузності звукового поля, покладена в основу статистичної теорії при акустичному проектуванні концертних і театральних залів? Виконання вимоги дифузності поля й вимоги рівномірного розподілу звуковбирних матеріалів по всіх перешкодах, що впливає з неї, приводить до того, що значна частина звукової енергії буде безцільно губитися. Тим самим зневажають інтересами й слухачів, і виконавця: (котрий повинен добре чути себе й своїх товаришів по ансамблю). Для цього необхідно, щоб досить велика кількість відбитої звукової енергії поверталася до виконавця. Це тим більше важливо

тому, що тісно розташовані в групі виконавці самі по собі поглинають значну частку енергії, – а, значить, у зоні їхнього розташування додаткове звукопоглинання повинне бути порівняно невеликим.

Тому успішне рішення завдання по створенню музичних залів з гарною акустичною репутацією можливо тільки при тісному співробітництві архітекторів з фахівцями - акустиками, що володіють не тільки методами розрахунку окремих акустичних параметрів залу, але й сучасними методами дослідження проектних рішень залів, включаючи фізичне й математичне моделювання.

Основою успішної роботи над такими об'єктами будівництва є наявність союзу трьох визначальних і напрямних сил - генерального замовника, архітектора й фахівця – акустика.

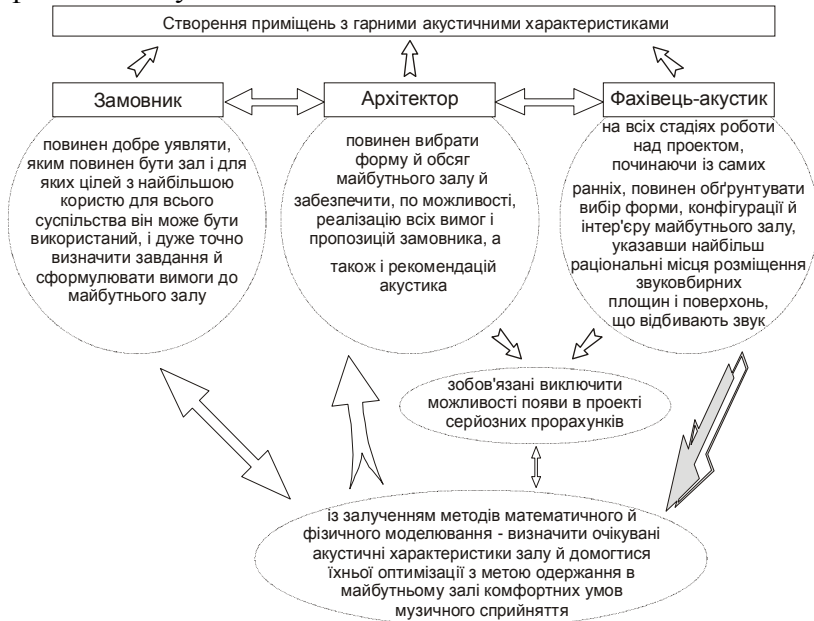


Рис. 5.5. Єднання інтересів генерального замовника, архітектора та фахівця-акустика в спільній роботі над проектом.

Їхні взаємообов'язки та завдання в спільній роботі над проектом відображено на рис. 5.6. Тільки таке єднання трьох творчих початків здатне принести очікувані плоди.

Необхідно коротко зупинитися на тенденції останніх років про можливу заміну всієї зазначеної раніше послідовності етапів створення акустики філармонічних залів простою установкою у вже готовий, побудований зал розгалуженої системи гучномовців, з необхідним електронним забезпеченням. Передбачалося, що процесорне керування системою гучномовців дозволить «створити» у залі будь-які акустичні умови, незалежно від його архітектурного рішення. Сама ця ідея, зовні досить приваблива, далеко не нова. Вона виникла ще на початку 50-х рр. ХХ століття у зв'язку створенням, так званих амбіофонічних систем, або систем об'ємного звуку. Однак, практичне впровадження даної концепції зустрічає неймовірні труднощі, навіть при використанні найсучасніших електронних систем керування звуком. Справа в тому, що будь-яке приміщення є складною системою передачі звуку, що при правильному її «настроюванні» не тільки передає, але й максимально збагачує музичний звук, управляючи їм по досить складних фізичних законах. Таке завдання може вирішити тільки весь акустичний обсяг приміщення, створений об'ємно-планувальним рішенням залу й конструкціями його огорожень. Системи ж електроакустики в принципі не можуть створити ідеальні акустичні умови в будь-якій точці залу, у найкращому разі диференціюючи умови озвучення по окремих зонах місць для глядачів, розділяючи їх по відносно кращим і відносно гірших умовах чутності. Крім того, навіть найсучасніші системи електронного керування звуком можуть створити тільки «штучний» звук, що значно уступає якості музичного звучання «живого» приміщення. Саме за цими причинами

зазнав невдачі досвід створення системи штучного звуку в Кремлівському Палаці З'їздів, широко розрекламованої у свій час. Також закінчилася невдачею спроба «замінити» живе звучання нового залу Філії ГАБТ (м. Москва) найсучаснішою електронною системою «об'ємного» звуку. З іншого боку, філармонічні зали світового рівня, зі стійкою акустичною репутацією, завжди використовуються тільки в режимі живого звуку, за винятком ряду сучасних добутків, партитури яких передбачають специфічні інструменти й прийоми електронного керування звуком. Як гарні приклади можуть бути названі всесвітньо відомі Бостонський симфонічний зал, зал Музичного суспільства у Відні й російські Великий зал Московської консерваторії й Великий зал С.-Петербурзької філармонії.

Регулювання акустичних умов в приміщенні здійснюється шляхом установки щитів, що відбивають, і регулювання кількості звуковбирних матеріалів, розташовуваних на поверхнях. Теорія звукопоглинання й методи його виміру також відносяться до акустичної акустики. Усе більше поширюється застосування електроакустичної апаратури для звукопідсилення й для створення штучної реверберації (незважаючи на те, що було написано вище). Електроакустичними способами імітації відзвуку приміщення користуються також у лабораторній практиці.

5.2. Методики Себіна, Ейрінга для розрахунку часу реверберації (стислі відомості, що є в будь-якому довіднику)

Відомі емпіричні формули, що дозволяють розрахувати час реверберації в даному приміщенні. Так, згідно [127, с. 248 -249] час реверберації визначається за формулами Ейрінга:

$$T = \frac{-0,162V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_{\Theta})}, \quad (5.1)$$

та Себіна (при малих значеннях α):

$$T = \frac{0,162V}{S - \alpha_{\Theta}}, \quad (5.2)$$

де T - час реверберації, с; V - обсяг приміщення, м³; S - площа конструкцій приміщення, що обгороджують, м²; α_{Θ} - коефіцієнт звукопоглинання поверхні, що характеризує втрати енергії на перетворення в тепло і пропущення (проходження через перешкоду). У першоджерелі [127, с. 248 -249] він позначений просто як α (без індексу Θ). Але α в багатьох інших роботах позначає коефіцієнт поглинання звуку (що, незважаючи на схожість назв, означає дещо інше). У нашій роботі такий коефіцієнт звукопоглинання поверхні з вищенаведених формул Себіна та Ейрінга (з метою сумісності з загальноприйнятими позначеннями фізичних величин) позначений як α_{Θ} та виражений як :

$$\alpha_{\Theta} = \alpha + \tau, \quad (5.3)$$

де α - коефіцієнт поглинання звуку, що характеризує тільки втрати енергії на перетворення в тепло і що виражається за формулою (2.5); τ - коефіцієнт пропущення звуку, що характеризує тільки втрати енергії на проходження її через перешкоду "наскрізь" і що виражається за формулою (2.6).

Таким чином, коефіцієнт звукопоглинання поверхні α_{Θ} з формули, наведеної в [127, с. 248 -249] розділений на дві його складові - коефіцієнти α і τ .

Подібні (за призначенням, але не за змістом) розробки маються й у світлотехніці. Насущною проблемою при дослідженні даного хвильового явища, на думку автора, є уніфікація розрахункових формул, що описують багаторазове відбиття. Теоретично багаторазове відбиття в обох випадках повинне адже описуватися однаковими за формою вираженнями? Базовими в цьому випадку, мабуть, повинні з'явитися саме дослідження в області акустики, оскільки там цей матеріал за станом на сьогоднішній день найбільшою мірою пророблений.

5.3. Методики Себіна, Ейрінга, Міллінгтона для розрахунку часу реверберації (пояснення до формул; інші більш докладніші відомості)

Як говорилося раніше, існують 3 теорії акустики. У. Себін при тому застосовував підходи, що нині названі статистичною теорією акустики.

Метод, запропонований У. Себіном, був заснований на моделі ідеального приміщення, у якому звукове поле після припинення дії звукового сигналу може бути розраховане на основі статистичного розгляду процесу загасання звуку. При цьому передбачається, що амплітуди й фази відбитих звукових хвиль розподілені хаотично, тобто у хвильовому русі немає переважних напрямків потоків і симетрії в розподілі амплітуд. Прийняте допущення дозволяє вважати, що середні значення звукової енергії по різних напрямках однакові, тобто звукове поле є ізотропним, і середня за часом щільність звукової енергії в будь-якій точці приміщення теж однакова. Таке звукове поле з дифузійним. Його розгляд дав можливість зневажити явищами інтерференції й застосувати при розрахунках енергетичне підсумовування. Цей підхід подібний використовуваному в кінетичній теорії газів і заснований на математичній теорії ймовірностей. Л. Бреховских показав, що для приміщень, лінійні розміри яких великі в

порівнянні з довжиною хвилі, виходять досить задовільні результати.

Методами математичної статистики в дифузійному полі визначають середню довжину пробігу звукового променя між двома відбиттями. Для приміщення у формі прямокутного паралелепіпеда з лінійними розмірами, близькими до "золотого перетину" (довжина відноситься до ширини й до висоти, як $2:2^{0.5}:1$, по іншому визначенню 5:3:2), статистично визначена середня довжина вільного пробігу звукового променя:

$$R = 4V/S, \text{ м} \quad (5.4)$$

де V - обсяг приміщення, м^3 ; S - загальна площа всіх обмежуючих поверхонь (підлоги, стелі, стін), м^2 .

Згодом було встановлено, що отримана залежність приблизно зберігається й для приміщень, лінійні розміри яких відхиляються від "золотого перетину", і для приміщень складнішої форми.

При кожному відбитті частина енергії, що падає, поглинається перешкодами й перетворюється в тепло.

Для експериментального визначення часу реверберації Себін користувався найпростішими пристосуваннями: органічними трубами як джерелом звуку й секундоміром. Він знайшов, що час реверберації T прямо пропорційний обсягу приміщення V і зворотно пропорційний добутку середнього коефіцієнта поглинання α_{Θ} і площі всіх перешкод S :

$$T = \frac{kV}{\alpha_{\Theta} \cdot S}$$

Середній коефіцієнт поглинання α_{Θ} розраховується як:

$$\alpha_{\Theta} = \frac{(\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n)}{S}$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ - коефіцієнти поглинання різних матеріалів; $S = S_1 + S_2 + \dots S_n$ - загальна площа перешкод; n - кількість різних перешкод.

Із цього вираження випливає, що середній коефіцієнт поглинання відповідає єдиному матеріалу, яким можна було б покрити всі поверхні перешкод приміщення зі збереженням загального звукопоглинання $A = \alpha_{\Theta} S$. Одиницею поглинання вважають 1 м^2 відкритого прорізу, який повністю поглинає енергію, що падає на нього (без обліку дифракції). Цією одиницею із себін (Сб).

Щоб погодити фізичні розмірності в лівій і правій частинах формули, було вирішено додати коефіцієнту k розмірність с/м. По вимірах часу реверберації в п'ятьох різних приміщеннях у формі прямокутного паралелепіпеда й обсягами від 96 до 1960 м^3 У. Себін прийняв значення того коефіцієнта $k=0,164$ (це число приблизно дорівнює дробу $1/6$). При теоретичному виведенні формули для розрахунку часу реверберації було отримане значення $k=0,161$, яке і вказується в більшості підручників. Наводячи довідникові дані в попередній главі, ми застосували значення $k=0,162$, яке й надане в [127, с. 248 - 249]. Яке ж з них насправді дійсне?

Відповідь полягає в тому, що надалі (після досліджень Себіна) зусиллями багатьох дослідників було виявлено, що коефіцієнт k різний для приміщень різної форми. Обмірювані значення k для різних випадків наведені на рис. 5.7.



Рис. 5.7. Коефіцієнт k до формули Себіна

З наведених прикладів видно, що форма приміщення впливає на значення часу реверберації, хоча зі структури самої формули U . Себіна це не впливає. Справа в тому, що від співвідношення лінійних розмірів залежить середня довжина пробігу між двома відбиттями R , отже, залежить і час реверберації T .

Теоретичне виведення формули Себіна засноване на припущенні про дифузійний, рівномірний розподіл звукової енергії по просторі приміщення й про безперервне поглинання енергії перешкодами в процесі реверберації.

Це допущення дає порівняно невелике відхилення розрахованої величини T від обмірюваної, якщо середній коефіцієнт поглинання малий, і тому кількість відбиттів виходить досить більшою, щоб зневажити дискретністю цього процесу.

Насправді звукова енергія поглинається перешкодами не безупинно, а стрибками, у міру досягнення хвилею тієї або іншої поверхні. Тому цілком рівномірного заповнення енергією всього обсягу приміщення не буде.

Більше точні дослідження реверберації були проведені в 1929 р. Шустером і Ветцманом, а в 1930 р. - Карлом Ейрінгом. Формула Ейрінга має вигляд:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\ominus})}.$$

Розклавши вираження $\ln(1 - \alpha_{\ominus})$ у ряд і залишивши в ньому через малість α_{\ominus} тільки перший член, виявимо, що при невеликих значеннях α_{\ominus} формула Ейрінга переходить у формулу Себіна. Дійсно,

$$\ln(1 - \alpha_{\ominus}) = -\alpha_{\ominus} - \frac{1}{2}\alpha_{\ominus}^2 + \frac{1}{3}\alpha_{\ominus}^3 - \dots = -\alpha_{\ominus}$$

В чому полягає зміст знака мінус у знаменнику формули? Логарифм чисел менше одиниці має від'ємне значення. Знак мінус введений, щоб виключити фізичну незгідність – від'ємне значення T . Виразення, що знаходиться в знаменнику, є еквівалентом загального поглинання $A = \alpha_{\ominus}S$, що мається у формулі Себіна.

Порівнюючи формули Себіна й Ейрінга, дійдемо до висновку, що наближення Себіна дає завищене значення T . Розбіжність збільшується зі зростанням α_{\ominus} :

Таблиця 5.1.

Завищення часу реверберації T , с при різних значеннях α_{\ominus}

α_{\ominus}	0,2	0,5	0,8
Завищення T , %	11	37	100

При значенні $\alpha_{\ominus} = 1$ виходить фізично нереальний результат: $T = V/6S$, хоча в цьому випадку (звукопоглинання максимально можливе) повинно бути $T = 0$.

Формули Себіна й Ейрінга можуть бути застосовані, якщо звукобирні матеріали розподілені по поверхнях, що обгороджують приміщення, досить рівномірно, щоб

можна було користуватися поняттям середнього коефіцієнта поглинання.

Для оптимізації акустичних умов у концертних залах, наприклад, рекомендується $\alpha_{\Theta} = 0,19$. Тому цілком припустимий час реверберації в цьому випадку варто розраховувати за формулою Себіна.

При виведенні формули Себіна й Ейрінга прийняті деякі допущення, які рідко обмовляються в літературі по акустиці. Формула Себіна отримана в припущенні, що хвилі падають на перешкоди під будь-якими кутами, а при виведенні формули Ейрінга прийнято, що хвилі падають на перешкоди під кутами, близькими до нормалі. Тому, строго говорячи, у формулу Себіна варто було б підставляти значення коефіцієнта поглинання, що певні в дифузійному полі, у ревербераційній камері, а у формулу Ейрінга - значення коефіцієнта поглинання, обмірювані в плоскому полі, при нормальному падінні, тобто в трубі.

При дуже нерівномірному розподілі загального поглинання результат, обчислений по формулі Ейрінга, може виявитися далеким від обмірюваного. Міллінгтон (Millington) пояснив причину цього розходження. Ейрінг прийняв, що число відбиттів від різних поверхонь із площами $S_1, S_2, \dots S_n$ однаково. У дійсності ймовірність числа відбиттів від даної поверхні тим більше, чим більше сама поверхня. На підставі цих міркувань Міллінгтон вивів іншу формулу для розрахунку часу реверберації:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-\sum S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)}$$

де S_i - площа матеріалів з коефіцієнтами поглинання α_i .

Недолік формули Міллінгтона полягає в наступному: обчислене значення часу реверберації виходить рівним нулю, якщо хоча б один елемент перешкоди, як би він не був малий, має $\alpha = 1$. Очевидно, при виведенні формули

було прийнято якесь сумнівне допущення. Втім, парадоксального результату легко уникнути, прийнявши, що жоден коефіцієнт поглинання не дорівнює одиниці.

Практика показала, що для приміщень із невеликим $\alpha_{\text{с}}$ (театральні й концертні зали, навчальні аудиторії й т.п.) всі три формули дають однаково задовільний результат. Для приміщень із середніми коефіцієнтами загасання (наприклад, студії) більше близькі до обмірюваного значення часу реверберації, розраховані по формулі Ейрінга. Якщо матеріали мають α_i , що сильно розрізняються, а самі матеріали розподілені по поверхнях нерівномірно, більше близькими до обмірюваного виходять значення часу реверберації T , розраховані по формулі Міллінгтона. Використовуючи названі формули, необхідно прийняти ті α , які були розраховані за допомогою цих же формул при обробці експериментального матеріалу, отриманого у звукомірній камері.

В підрозділі «2.3. Вимірювання рівнів шуму» показано, як за допомогою вищенаведених формул Себіна й Ейрінга вирішують зворотне завдання: тобто визначають α або A за обмірюваним часом реверберації.

* * *

В 1929 р. Пауль Себін (Paul Sabine, двоюрідний брат У. Себіна) зробив висновок, що на частотах більше 2 кГц на час реверберації істотно впливають метеорологічні умови, (а саме - вологість повітря у вимірювальній камері). Дослідження були продовжені Ервіном Майером (Erwin Meyer), - {виявлений той же ефект для частот вище 3,2 кГц}, та Верном Кнудсеном (Vern Knudsen) в 1931 р. - {визначив, що поглинання звуку в сухому повітрі більше, ніж у вологому, і на верхніх звукових частотах більше, ніж на нижніх. Коли відносна вологість стає рівною 100% і з'являється туман, поглинання звуку в повітрі сильно

збільшується й уже для всіх частот поглинання звуку викликано в'язкістю й теплопровідністю повітря, а також молекулярними втратами. Воно стає помітним на частотах більше 2 кГц у приміщеннях обсягом понад 2000 м³ і зростає приблизно пропорційно квадрату частоти}. З урахуванням цієї обставини формула Ейрінга здобуває вигляд:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\ominus}) + 4\mu V}$$

Замінюючи натуральний логарифм на десятковий, одержимо формулу з іншими числовими коефіцієнтами, більше зручну для розрахунків:

$$T = \frac{0,07V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\ominus}) + 1,74\mu V}$$

Тут коефіцієнт μ - показник загасання в повітрі, що має розмірність M^{-1} , (який визначають по графіках, наведених у багатьох керівництвах, посібниках і підручниках по акустиці); він зростає зі збільшенням частоти й зменшенням вологості. Виправлення на загасання звуку в повітрі пропорційне обсягу, оскільки звукова енергія послабляється по всьому просторі приміщення. За даними І.Г. Дрейзена в великих приміщеннях вже на частоті 4 кГц поглинання звуку в повітрі досягає 1/3-1/4 загального звукопоглинання. Зі збільшенням обсягу (до величин, що більше 2000 м³) зі збільшенням частоти друга складова у знаменнику формули починає переважає над першою і час реверберації прагне до $T = 1/24 \mu$. Це означає, що час реверберації на верхніх частотах у приміщеннях великого обсягу визначається мікрокліматичними умовами в приміщенні, тобто температурою й відносною вологістю.

В акустичних розрахунках необхідно враховувати енергію як дифузійного $\epsilon_{\text{диф.звук}}\text{у}$, так і прямого $\epsilon_{\text{прямого звук}}\text{у}$ звуку (рис. 5.8).

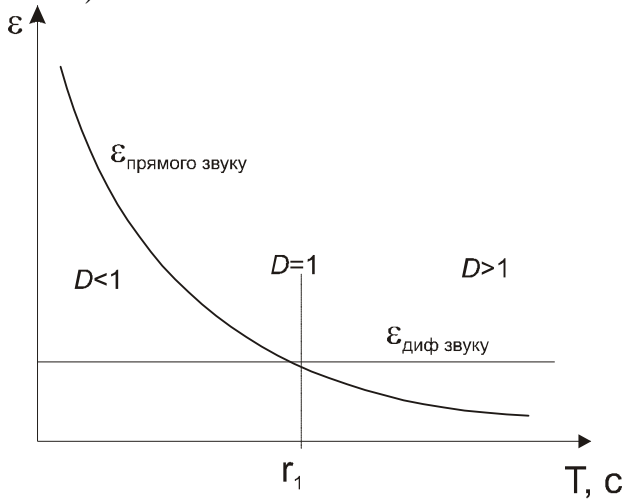


Рис. 5.8. Графік впливу енергії дифузійного й прямого звуку при оцінці акустичних процесів.

На невеликих відстанях від джерела переважає енергія прямого звуку, (оскільки вона зменшується назад квадрату відстані; і на малих відстанях досить велика), на більших відстанях - енергія дифузійного звуку, (оскільки вона залишається приблизно постійна). Відношення щільностей цих двох енергій називають акустичним відношенням:

$$D = \frac{\epsilon_{\text{диф.звук}}}{\epsilon_{\text{прямогозвук}}}$$

На відстані r_1 від ДШ обидві складові однакові ($D = 1$). На відстанях більше r_1 перевага дифузійної енергії проявляється на слух як підвищена "гучність" приміщення. Чисельне значення r_1 пов'язане з обсягом приміщення V і часом реверберації T емпірично: при обсязі приміщення 150 м^3 і часу реверберації $0,7 \text{ с}$ маємо $r_1 = 0,87 \text{ м}$, а при

обсязі 8000 м^3 і часі реверберації $2,0 \text{ с}$ відповідно $r_1 = 3,8 \text{ м}$.

$$r_1 = 0,06 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

На відстанях більше r_1 характер звучання визначається головним чином енергією дифузійного звуку. Для визначення часу реверберації в цій області використовують раніше наведені формули. На близьких відстанях спад рівня має інший, більше складний характер, представлений на рис. 5.9 "східчастою" лінією 1-2-3.

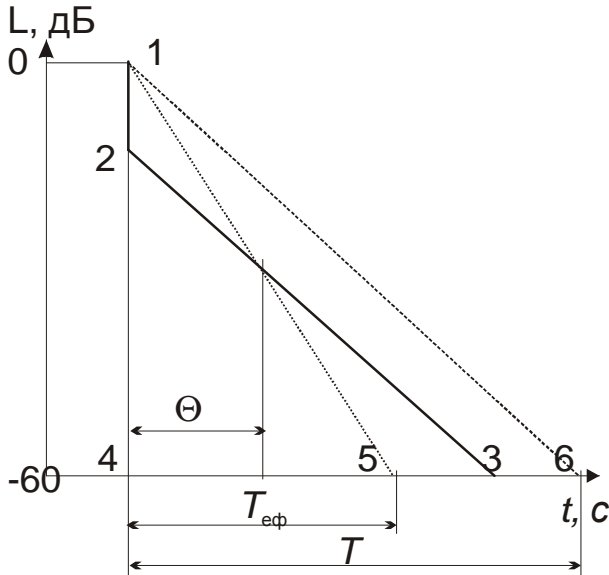


Рис. 5.9. Розходження між часом реверберації T і часом ефективного реверберації $T_{\text{эф}}$.

Так звана "ефективна реверберація", що відчувається, у цьому випадку буде менше, ніж розрахована по раніше наведених формулах. Г.А. Гольдберг і С. Ф. Тер-Осип'янець порівнювали два процеси спаду рівнів - з "сходиною" і без "сходинок". Їхніми дослідженнями виявлено, що

визначальним для рівності двох відчуттів тривалості процесів є те, що два процеси відзвуку створюють однакове враження тривалості процесів, якщо через проміжок часу 0,1 - 0,3 с графіки обох процесів проходять через одну точку, яка відповідає якомусь значенню рівня.

Це є час ефективної реверберації $T_{\text{ef}} < T$, що визначають на основі рівності площ двох трикутників 2-4-3 й 1-4-5. Він характеризується часом, протягом якого рівень зменшився б на 60 дБ від початкового рівня 0 дБ за умови спаду рівня без "сходинки", і залежить від співвідношення енергій дифузійного й прямого звуку, D , що чисельно виражається акустичним відношенням, і коефіцієнтом спрямованості Ω приймача звуку: (наприклад, людського вуха; але, оскільки в акустичних вимірах в якості приймача звуку виступає мікрофон, звичайно в технічній акустиці - коефіцієнтом спрямованості Ω мікрофона). Для розрахунку часу ефективної реверберації була запропонована формула

$$\frac{1}{T_{\text{ef}}} = \frac{1}{6\Theta} \lg \frac{\Omega + D}{D} + \frac{1}{T}$$

У цій формулі Θ - раніше зазначений проміжок часу, протягом якого слух досить добре інтегрує процес спаду рівня, його середнє значення 0,2 с, що трохи більше постійної часу слуху $t = 0,165$ с. Підставивши у формулу чисельне значення 6Θ , одержимо

$$\frac{1}{T_{\text{ef}}} = \frac{1,2T}{1,2 + \lg \frac{\Omega + D}{D}}$$

Не змінюючи відстань між джерелом звуку й використовуючи різні приймачі звуку (тобто мікрофони з різними діаграмами спрямованості), можна в широких межах регулювати час ефективної реверберації. Тим самим при побудові приміщень суспільного призначення

(концертних залів, театрів, студій звукозапису тощо) підбирають ефект реверберації відповідно до змісту переданих сцен або згідно з жанром музичних добутків, що в них виконуються.

З-за різної відстані від інструментів оркестру до мікрофона може виникнути небажаний ефект, що порушує баланс звучання (під таким балансом розуміють задуману композитором певну домірність звучностей різних оркестрових груп; інструмента, що солює; й оркестрового супроводу). Найближчі до мікрофона інструменти будуть впливати на нього прямим звуком, а віддалені - звуком з помітною реверберацією. Переміщення співака-соліста під час виконання перед мікрофоном приводить до відчуття зміни "гучності" приміщення.

5.4. Розрахунок часу реверберації звуку в приміщеннях за методикою Абракітова [283, 284, 285]

Як показано, зусилля багатьох сучасних дослідників спрямовані на уточнення таких формул, що наведені вище, на врахування в них інших параметрів, що суттєво впливають на процес багаторазових відбиттів. От що, наприклад, пишуть в [286]: *«...Заметим, что при одной и той же акустической мощности источника звука длительность процесса реверберации на низких и средних частотах почти не зависит от звукопоглощения воздушной среды, ибо значение коэффициента мало. В области верхних частот длительность процесса реверберации уменьшается тем значительно, чем выше частота. Вообще говоря, чем больше объем помещения, тем больше средняя длина свободного пробега звуковой волны ..., тем на более низких частотах начинает сказываться поглощение звука в воздушной среде...»* Таким чином, існує необхідність в деякій корекції загальновідомих формул, їхньому уточненні, врахуванні супутніх факторів.

В роботі [283] в 1994 р. автором була запропонована інша методика розрахунку часу реверберації звуку в приміщеннях, що забезпечує більшу точність розрахунків. За основу обчислень покладена формула (2.2), що зв'язує час розповсюдження звукової хвилі T , с, відстань, яку вона проминула R , м та швидкість розповсюдження хвилі c , м/с, (що дорівнює добутку довжини хвилі λ , м на частоту f , Гц). Нагадаємо її:

$$T = \frac{R}{c} = \frac{R}{\lambda \cdot f}, \text{ с}, \quad (2.2)$$

Загальний час реверберації, с:

$$T = t_0 + \sum_1^n t_n = R_0 \frac{R_0}{c_0} + \sum_1^n \frac{R_n}{c_n}, \quad (5.5)$$

де

t_0 - час розповсюдження звукової хвилі від джерела до перешкоди (прямий звук), с;

t_n - час розповсюдження звукової хвилі проміж двома послідовними відбиттями (відбитий звук), с;

n - кількість відбиттів, необхідна для послаблення інтенсивності звуку в 10^6 разів;

c_0 - швидкість розповсюдження звукової хвилі від джерела до перешкоди (прямий звук), м/с;

c_n - швидкість розповсюдження звукової хвилі проміж двома послідовними відбиттями, м/с;

R_0 - відстань, що проминула хвиля між джерелом та перешкодою (прямий звук), м;

R_n - відстань, що проминула хвиля проміж двома послідовними відбиттями (відбитий звук), м.

З вищевказаних величин точне конкретне значення можна одержати тільки для n , для інших має рацію прийняти їхні середні значення. Цю формулу можливо зробити простішою, якщо припустити, що

$$c = c_0 = c_n = \text{const}$$

в усіх місцях приміщення, що обстежують, – бо

впливом турбулентності атмосфери, градієнту швидкості руху повітря та градієнту температури можна зневажити. Також всі проміжки часу між двома послідовними відбиттями можна вважати рівними між собою, якщо прийняти однаковими відстані R_i , що проходить звукова хвиля за такий проміжок, та замінити це уявлення відомим уявленням середньої довжини вільного пробігу звукової хвилі між двома її послідовними відбиттями $R_i = R_n = \text{const}$ при $t = t_n = \text{const}$.

$$T = t_0 + nt = (R_0 + nR_i)/c = (R_0 + nR_i)/(\lambda f). \quad (5.6)$$

Більш того, проміжки часу розповсюдження звукової хвилі від джерела до перешкоди t_0 і між двома її послідовними відбиттями t , відповідним чином, відстані R_0 і R_i також можливо прийняти однаковими, і тоді формули (5.5) та (5.6) перетворюються на:

$$T = t(n + 1) = R(n + 1)/c = R(n + 1)/(\lambda f), \quad (5.7)$$

де t та R відповідно середній час, с; та відстань, м, при розповсюдженні звукової хвилі між двома її послідовними відбиттями в приміщенні, що випробує реверберацію.

Середню відстань (середню довжину вільного пробігу), що проминає звукова хвиля між двома послідовними відбиттями R , згідно з [79, 118, 283] можливо записати як:

$$R = 4V/S, \text{ м}, \quad (5.4)$$

де V - обсяг приміщення, м³;

S - площа поверхні, що відбиває звук, м².

Тоді формула (5.7) має вигляд:

$$T = \frac{4V(n+1)}{S \cdot c} = \frac{4V(n+1)}{S \cdot \lambda \cdot f}, \text{ с}. \quad (5.8)$$

При кожному відбитті звукової хвилі від перешкоди її інтенсивність зменшується в ρ разів, тобто інтенсивність звукової хвилі, що падає на перешкоду $I_{\text{падіння}}$, та

інтенсивність відбитої від тієї ж перешкоди хвилі $I_{\text{відбиття}}$ зв'язані між собою як:

$$I_{\text{відбиття}} = \rho I_{\text{надіння}}, \text{ Вт/м}^2;$$

або

$$I_{\text{відбиття}} = (1 - \alpha - \tau) I_{\text{надіння}}, \text{ Вт/м}^2;$$

де ρ , α , τ - відповідно, коефіцієнти відбиття, поглинання, пропущення.

Ряд значень інтенсивності при кожному наступному відбитті можна записати так:

$$I_1; I_2 = \rho I_1; I_3 = \rho I_2; \dots; I_n = \rho I_{n-1}.$$

Слід зауважити, що коефіцієнт відбиття в тих же самих умовах є величиною незмінною, тобто $\rho = \text{const}$.

Таким чином, зменшення інтенсивності при багаторазовому відбитті можливо уявити собі як геометричну прогресію. Оскільки цілковита величина знаменника цієї прогресії $\rho < 1$, вона є зменшуваною прогресією. Запишемо цю прогресію:

$$I_n = I_1 \rho^{n-1}, \text{ Вт/м}^2 \quad (5.9)$$

де I_1 - початкова інтенсивність (тобто інтенсивність так званого прямого звуку), Вт/м²;

I - інтенсивність звуку при n -ому відбитті, Вт/м²;

n - номер окремого члену прогресії (тобто кількість відбиттів).

Але також відомо, що реверберація характеризується зменшенням інтенсивності в 10^6 разів - (за загальноновизнаними критеріями це є неодмінною умовою реверберації), тобто:

$$I_1/I_n = 10^6.$$

Звідси n - конкретне цілковите число, тому що наступні відбиття, які призводять до подальшого зменшення інтенсивності (більш ніж в 10^6) разів, нікого вже не цікавлять. Таким чином, n - це кількість відбиттів, що

необхідна для здійснення умови реверберації: зменшення інтенсивності звуку в мільйон разів.

Якщо в формулі (5.9) поділити обидві частини на I_n :

$$I_n = I_1 \rho_{n-1}, \text{ Вт/М}^2$$

$$\frac{I_n}{I_n} = \frac{I_1}{I_n} \rho_{n-1},$$

$$1 = 10^6 \rho_{n-1},$$

$$\rho_{n-1} = 10^{-6},$$

та після цього прологарифмувати:

$$n-1 = \log_{\rho} 10^{-6},$$

одержимо кількість відбиттів n , що необхідна для здійснення умови реверберації: зменшення інтенсивності звуку в мільйон разів:

$$n = 1 + \log_{\rho} 10^{-6}.$$

Виведені формули можливо зробити більш точнішими, якщо мати на увазі зменшення інтенсивності звуку під час його розповсюдження в середовищі з-за поглинання чи розсіювання енергії звукової хвилі речовиною середовища (атмосферним повітрям), та ін. Тоді в знаменнику геометричної прогресії необхідно відняти відповідний коефіцієнт зменшення, який враховує ці явища поглинання та розсіювання звукової хвилі в повітрі $\alpha_{\text{повітря}}$, (на який зменшується інтенсивність звуку у кожному разі при проходженні хвилі відстані між поверхнями, що відбивають):

$$n = 1 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6}. \quad (5.10)$$

Цей коефіцієнт, що включає в себе довідкові дані, (котрі наведені, наприклад, в [79]), враховується взагалі при розповсюдженні звуку у вільному просторі на далекі відстані, тому що величина його дуже мала.

Коефіцієнт відбиття ρ згідно [58, 118] може бути

замінений на $\rho = (1 - \alpha - \tau)$. У літературі радянського періоду часто сума α і τ називається "коефіцієнтом звукопоглинання" [127, с. 248 -249] - (що формально не вірно), тобто під звукопоглинанням розуміють не тільки явище зменшення інтенсивності звуку внаслідок теплових та механічних втрат (тобто - власно "поглинання звуку"), а ще й, (додатково до цього), втрати при проходженні скрізь поверхні, що відбивають звук, "навиліт", (тобто - пропущення звуку). Деяка логіка в цьому є: загальну звукову енергію розподіляють не на три, а лише на дві частки: частину енергії, що випробувала відбиття, (що характеризується коефіцієнтом відбиття ρ): ця частина приймає участь в подальшому процесі багаторазових відбиттів; та частину енергії, що "зникла" при відбитті за рахунок поглинання та пропущення наскрізь через конструкції, що обгороджують (при тому поділяти її на дві складові, тобто власне поглинуту та пропущену частки в даному випадку, звісно, немає сенсу): ця частина не приймає участь в подальшому процесі багаторазових відбиттів та характеризується коефіцієнтом звукопоглинання α_{Θ} .

В такому разі:

$$\rho = 1 - \alpha_{\Theta}, \quad (5.11)$$

де α_{Θ} - вищезгаданий середній коефіцієнт звукопоглинання, (що насправді дорівнює $\alpha_{\Theta} = \alpha + \tau$),

$$\alpha_{\Theta} = \sum_1^i \alpha_{\Delta i} S_i / S, \quad (5.12)$$

де $\alpha_{\Delta i}$ - коефіцієнти звукопоглинання кожного з i -х конструктивних елементів (конструкцій, що обгороджують), які відбивають звук, кожний з яких характеризується своєю площею поверхні S_i .

Аналогічно з ним середній коефіцієнт відбиття ρ :

$$\rho = \sum_1^i \rho_{\Delta i} S_i / S, \quad (5.13)$$

де $\rho_{\Delta i}$ - коефіцієнти відбиття кожного з i -х конструктивних елементів (конструкцій, що обгороджують), які відбивають звук, кожний з яких характеризується своєю площею поверхні S_i .

На наш погляд, якщо мова йде про багаторазове відбиття потоку звукової енергії, тобто про реверберацію, більш логічно використовувати уявлення "коефіцієнти відбиття звуку $\rho_{\Delta i}$ " (або "середній коефіцієнт відбиття звуку ρ "), аніж "коефіцієнти звукопоглинання $\alpha_{\Delta i}$ " (або "середній коефіцієнт звукопоглинання α_{Θ} " [284]. Втім, задля сумісності із багаторазово наведеними в існуючій літературі позначеннями, застосованими раніше іншими авторами, ми далі надаємо два варіанти формул: такі, що виражені через коефіцієнт відбиття; і такі, що виражені через коефіцієнт звукопоглинання: (оскільки ці величини взаємопов'язані, ніякої суттєвої різниці між ними нема).

Формула Ейрінга (5.1), що записана за допомогою (5.11) через середній коефіцієнт відбиття, має вигляд:

$$T = \frac{-0,162V}{S \cdot \ln \rho}, \quad (5.14)$$

а формула Себіна (5.2) має вигляд:

$$T = \frac{0,162V}{S \cdot (1 - \rho)}, \quad (5.15)$$

Зіставимо з ними формули для розрахунку часу реверберації звуку за описаною нами методикою Абракітова, а саме (5.7), якщо підставити туди розрахункову кількість багаторазових відбиттів (5.10):

$$\begin{aligned}
 T &= t(2 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6}) = \frac{R(2 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6})}{c} = \\
 &= \frac{R(2 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6})}{\lambda \cdot f}, \text{ с.} \quad (5.16)
 \end{aligned}$$

Якщо підставити туди R по (5.4)

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{4V(2 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6})}{S \cdot c} = \\
 &= \frac{4V(2 + \log_{(\rho - \alpha_{\text{повітря}})} 10^{-6})}{S \cdot \lambda \cdot f}, \text{ с.} \quad (5.17)
 \end{aligned}$$

Версія (5.17), що записана через (5.13):

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{4V(2 + \log \sum_{i=1}^i \frac{\rho_{\Delta_i} S_i}{S} - \alpha_{\text{повітря}} 10^{-6})}{S \cdot c} = \\
 &= \frac{4V(2 + \log \sum_{i=1}^i \frac{\rho_{\Delta_i} S_i}{S} - \alpha_{\text{повітря}} 10^{-6})}{S \cdot \lambda \cdot f}, \text{ с.} \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

Інша версія, що записана через (5.12):

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{4V(2 + \log_{(1 - \alpha_{\text{повітря}} - \sum_{i=1}^i \frac{\alpha_{\Delta_i} S_i}{S})} 10^{-6})}{S \cdot c} = \\
 &= \frac{4V(2 + \log_{(1 - \alpha_{\text{повітря}} - \sum_{i=1}^i \frac{\alpha_{\Delta_i} S_i}{S})} 10^{-6})}{S \cdot \lambda \cdot f}, \text{ с.} \quad (5.19)
 \end{aligned}$$

Умовні позначення в формулах (5.16-5.21):

T - загальний час реверберації звуку в приміщеннях, с;

t - (середній) час розповсюдження звуку між двома послідовними відбиттями, с;

R - середня довжина вільного пробігу звукової хвилі між двома послідовними відбиттями, м;

V - обсяг приміщення, м³;

$\alpha_{\text{повітря}}$ - коефіцієнт зменшення інтенсивності звукової хвилі у середовищі, де вона поширюється (наприклад, повітрі);

ρ - середній коефіцієнт відбиття;

$\rho_{\Delta i}$ - коефіцієнти відбиття кожного з i -х конструктивних елементів, кожний з яких характеризується своєю площею поверхні S_i , що відбиває звук;

α_{Θ} - середній коефіцієнт звукопоглинання;

$\alpha_{\Delta i}$ - коефіцієнти звукопоглинання кожного з i -х конструктивних елементів (конструкцій, що обгороджують), які відбивають звук, кожний з яких характеризується своєю площею поверхні S_i , яка відбиває, поглинає та пропускає крізь себе звук;

$S = \sum_1^i S_i$ - загальна площа поверхонь, що відбивають звук, м²;

c - швидкість розповсюдження звуку, м/с;

λ - довжина хвилі, що випробує реверберацію, м;

f - частота хвилі, що випробує реверберацію, Гц.

Перевірка розмірності (5.17) та інших формул:

$$T = L^3 / (L^2 L T^{-1}) = T.$$

Добуток λf при проведенні практичних розрахунків доцільно замінити розрахунковою швидкістю звуку, що дорівнює $c = 344$ м/с. Тоді:

$$T = \frac{0,0116 \cdot V(2 + \log \sum_1^i \frac{\rho_{\Delta_i} S_i}{S} - \alpha_{\text{повітря}} 10^{-6})}{S}; \quad (5.20)$$

$$T = \frac{0,0116 \cdot V(2 + \log_{(1 - \alpha_{\text{повітря}} - \sum_1^i \frac{\alpha_{\Delta_i} S_i}{S})} 10^{-6})}{S}. \quad (5.21)$$

Вказана вище методика дозволяє значно підвищити точність розрахунків часу реверберації в приміщеннях порівняно з розрахунками за формулами Себіна та Ейрінга. Наведені вище формули відрізняються від формул Себіна та Ейрінга, що показує їхню наукову новизну [284, 285].

5.5. Оперативне регулювання часу реверберації в приміщеннях (власна авторська розробка згідно [287])

Пропонована в цій главі розробка відноситься до області архітектурно-будівельної акустики, а саме до технічних засобів, що дозволяють примусово й оперативно змінювати час реверберації звуку в приміщеннях. Реверберація - післязвучання, що зберігається після вимикання джерела звуку й обумовлене одночасним приходом у дане місце відбитих чи розсіяних звукових хвиль. Вона одним з основних функціональних параметрів приміщень будинків суспільного призначення, і значно впливає на чутність мови і музики в них. Існує потреба не тільки в розрахунку її часу, але й в можливості примусово змінювати його в залежності від конкретних умов. Реверберація істотно впливає на якість як мовного, так і музичного звучання. Надмірна тривалість реверберації приводить до того, що нові склади мови звучать на тлі попередніх загасаючих складів. Розбірливість мови при цьому погіршується. При короткому відзвучі розбірливість мови цілком задовільна, але своєрідна "безжиттєвість", "стерильність" такого звучання сприймається так само, як

нестаток, особливо при художнім читанні. Ще більше значення має процес відзвуку при слуханні музики. Кожна музична фраза являє собою послідовність звукових імпульсів. Затягнутий відзвук порушує естетичність сприйняття музики тим сильніше, ніж швидше темп виконання, тому що звуки "набігають" один на одного. Навпаки, при дуже короткому відзвучі або його відсутності (при виконанні на відкритому повітрі) музика звучить сухо. Втрачається злитість звучання. Лише при деякому, цілком певному для кожного стилю виконання часу відзвуку утворюється необхідна єдність звучання, що створює найкращий естетичний результат. Стислим чином це можна сформулювати так: надлишковий час реверберації звуку приводить до неприємної гучності приміщення, недостатня реверберація - до різко уривчастого звучання, позбавленому музичної "соковитості". При тому оптимальний час реверберації, як згадувалося вище, є змінною в різних випадках величиною, що залежить від характеру виконуваної програми, особливості музикальних чи речових творів та ін., та потребує його корекції в одному й тому ж приміщенні в різних випадках.

Таким чином у конструкціях різноманітних приміщень, наприклад, зорового залу для глядачів, театрів, дискотек і т.п., а також конструкціях спеціально створюваних ревербераційних камер виникає необхідність в регулюванні часу реверберації, для чого і може бути застосований запропонований спосіб [288].

Відомий спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що полягає у зміні конфігурації і площі поверхонь, що відбивають звук, у таких приміщеннях, описаний в [289]. Наприклад, ефект зміни часу реверберації звуку спостерігається навіть при простій перестановці меблів у приміщенні. Цей вказаний відомий спосіб полягає у примусовій зміні конфігурації і

площі поверхонь, що відбивають звук, у таких приміщеннях. Також цей спосіб реалізується в пристрої, що представляє собою акустичну стелю, що складається з акустичних об'ємних елементів, що включають V-образні звукопоглиначі, кожний з яких поміщений на звукопроникну оболонку постійної ширини і має між гранями щілини, що сходяться, з поперечним перерізом у формі трапеції, менша підстава яких відповідає довжині звукової хвилі переважних низькочастотних складових звуку, причому V-образні елементи виконані з перемінним кутом розкриття, уздовж осі та віднесені від відбиваючої звук поверхні щілини, утвореної гранями сусідніх елементів. Змінюючи кут розкриття V-образних елементів акустичної підвісної стелі, змінюють час реверберації звуку в приміщенні, де він установлений [289].

Цей спосіб, незважаючи на його суттєву відмінність від наших розробок, - (як можна бачити з опису, там ніде не фігурують вакуумовані елементи), послужив в якості прототипу для нашого оригінального винаходу.

Для облицювання приміщення можуть бути використані звукоізолюючі панелі, що містять вакуумовані порожнини: такі, як [290 - 298]. Застосування в якості облицювань, що відбивають звук, саме таких звукоізолюючих панелей з вакуумованими порожнинами є необхідною умовою для реалізації пропонованого нами способу.

Конструкція такого звукоізолюючого елемента, або панелі, що має в собі порожнини, які містять вакуум, запатентована [298, 297] та надана на рис 5.10.

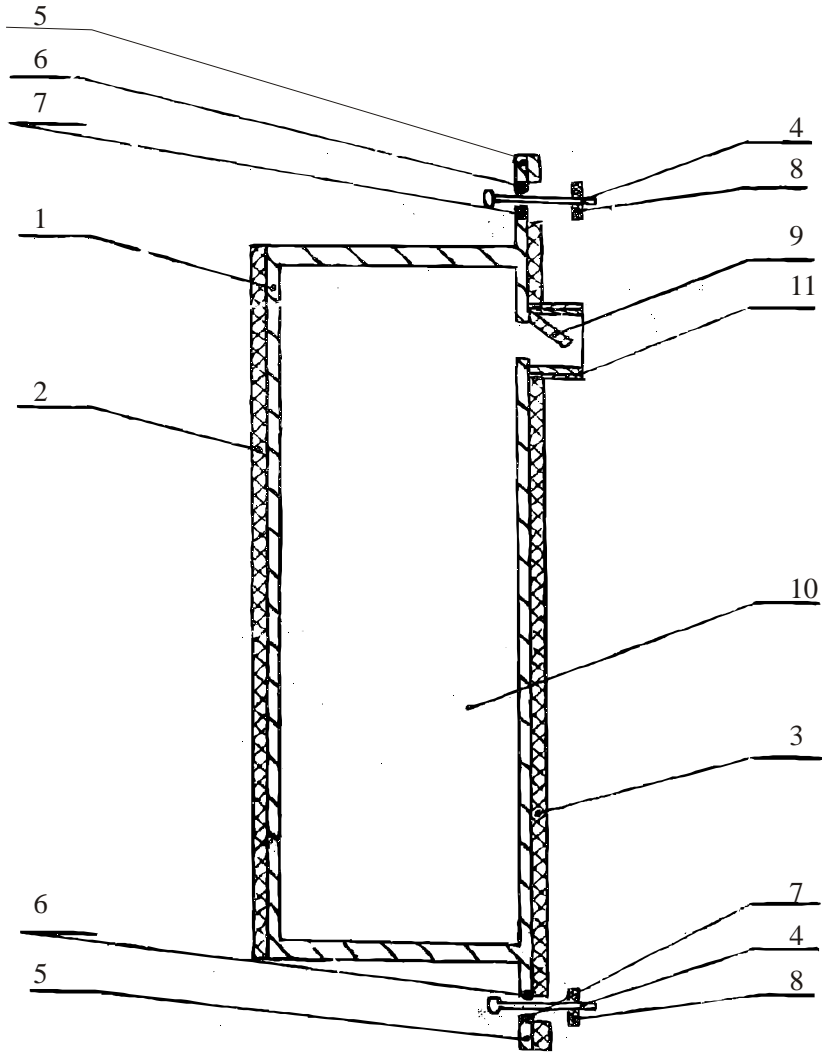


Рис. 5.10. Звукоізолюючий елемент [298, 297].

Він має цільний герметичний корпус I, (виготовлений, наприклад, із фторопласта, армованого металом), на лицьовій стороні якого нанесене додаткове звуковбирне

покриття 2, з розміщеною на його тильній стороні прокладкою, що демпфірує, 3, монтажними болтами 4, що вставляються в наявні на кріпильних фланцях 5 кріпильні отвори 6, постачені втулками, що демпфірують, 7, які амортизують шайбами 8, установленими на монтажних болтах, клапан для забезпечення вакуумування 9, внутрішній вакуумований простір 10 і сполучний штуцер II, призначений для підключення зовнішньої апаратури для забезпечення вакуумування (не показана). Усередині простору 10 підтримується вакуум, характеристики якого підбирають виходячи з необхідної величини зниження шуму (звукоізолюючої здатності) даним елементом.

Розрахункова формула, виведена автором, дозволяє визначити величину тиску розрідженого газу P , Па усередині вакуумованої порожнини залежно від необхідної звукоізолюючої здатності R , дБ. Формула наведена в [297].

Таким чином, варто вважати, що відомий спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що облицьовують звукоізолюючими панелями, які містять вакуумовані порожнини, після чого змінюють конфігурацію і площу поверхонь, що відбивають звук, у таких приміщеннях, (що є прототипом запропонованого).

Цей відомий спосіб характеризується наступними недоліками: складність, непрактичність. Наприклад, зміна часу реверберації в великому залі, обладнаному описаним пристроєм для реалізації даного способу, вимагає наявності складних і громіздких механізмів для зміни конфігурації підвісної стелі, причому ця зміна конфігурації повинна бути здійснена безпосередньо під час представлення, і супроводжується, крім усього, значним шумом і вібрацією, що відволікає глядачів від сцени чи екрана, звертаючи їхню увагу на зміну конфігурації стелі. Зазначений приклад ілюструє такий недолік відомого

способу, як його незручність застосування.

Цей відомий спосіб не вирішує задачу примусової зміни коефіцієнта пропущення звуку τ через вакуумовану порожнину звукоізолюючих панелей (пристроїв для здійснення даного способу), якими облицюють приміщення - відповідно до прототипу τ є постійною, а не змінною величиною.

Завданням розробки є забезпечення нескладної і зручної у користуванні можливості оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях за рахунок зміни характеристик використовуваних для облицювання приміщення звукоізолюючих панелей з вакуумованими порожнинами [290 -298].

Поставлене завдання вирішується тим, що спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях, що облицюються звукоізолюючими панелями, що містять вакуумовані порожнини, відповідно до нашої пропозиції [287], передбачає два варіанти такого регулювання. Відповідно до першого з них здійснюють примусову зміну тиску газу, що знаходиться в зазначених вакуумованих порожнинах, наприклад, за допомогою додатково підключеного до них вакуумного насоса. Відповідно до другого з них здійснюють примусову зміну температури газу, що знаходиться в зазначених вакуумованих порожнинах, наприклад, за допомогою додатково введеного в конструкцію звукоізолюючих панелей теплообмінника. (На наш власний авторський погляд, перший спосіб більш зручніший та здібний до практичного застосування; другий має тільки-но інженерно-конструкторську зацікавленість).

Технічним результатом нашого винаходу [287] є спрощення і здешевлення маніпуляцій по оперативному регулюванню часу реверберації звуку в приміщеннях.

Зміна температури чи тиску газу у вакуумованій

порожнині звукоізолюючої панелі спричиняє зміну щільності газу; отже, як наслідок, стається зміна коефіцієнта τ звуку, та відповідно, зміна коефіцієнта α звукоізолюючих панелей, використовуваних для облицювання реверберуючого приміщення, що в остаточному підсумку веде до зміни часу реверберації звуку в такому приміщенні.

Сутність нашої пропозиції [287] полягає в наступному. Згідно [127, с. 248-249] час реверберації визначається по відомих формулах Ейрінга і Себіна (при малих значеннях α), - куди, як вище (в гл. 5.1-5.3) згадувалося, входять наступні величини: T - час реверберації, с; V - обсяг приміщення, м^3 ; S - площа конструкцій приміщення, що обгороджують, м^2 ; α - коефіцієнт звукопоглинання поверхні, що характеризує втрати енергії на перетворення в тепло і пропущення (проходження через перешкоду). У дійсному описі коефіцієнт звукопоглинання поверхні виражений:

$$\alpha = \alpha' - \tau,$$

де α' - коефіцієнт поглинання звуку, що характеризує тільки втрати енергії на перетворення в тепло і; τ - коефіцієнт пропущення звуку, що характеризує тільки втрати енергії на проходження її через перешкоду наскрізь).

Таким чином, коефіцієнт звукопоглинання поверхні α розділений на дві його складові - коефіцієнти α' і τ . Відповідно до винаходу, зміна обсягу приміщення $V \text{ м}^3$, і площі конструкцій приміщення, що обгороджують, $S, \text{ м}^2$, не виконується, тому що не здійснюється зміна конфігурації і площі поверхонь, що відбивають звук. Замість цього здійснюється зміна звукопоглинання α , а саме його складової частини - коефіцієнта пропущення τ . Ця зміна можлива, оскільки спосіб передбачає

облицювання приміщення звукоізолюючими панелями, що утримують в собі вакуумовані порожнини.

Згідно [116, с. 68, 493] інтенсивність звуку ϵ

$$I = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot c}{2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.17)$$

де ρ - щільність середовища поширення звуку, кг/м^3 ; V - максимальне значення швидкості коливань частинок пружного середовища, м/с , c - фазова швидкість хвилі (швидкість звуку), м/с .

Позначимо інтенсивність звукової хвилі, котра падає на перешкоду як $I_{\text{падіння}}$, а інтенсивність звукової хвилі, що пройшла через перешкоду як $I_{\text{пропущення}}$, тобто τ згідно [116] при підстановці в (5.17) складе:

$$\tau = \frac{I_{\text{пропущення}}}{I_{\text{падіння}}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot V_{\text{пропущення}}^2 \cdot c_{\text{пропущення}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot V_{\text{падіння}}^2 \cdot c_{\text{падіння}}}. \quad (5.18)$$

При тому за (5.17)

$$I_{\text{падіння}} = \frac{\rho_{\text{падіння}} \cdot V_{\text{падіння}}^2 \cdot c_{\text{падіння}}}{2}, \text{ Вт/м}^2; \quad (5.19)$$

$$I_{\text{пропущення}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot V_{\text{пропущення}}^2 \cdot c_{\text{пропущення}}}{2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.20)$$

де індекси при величинах, що входять у вищевказані формули (5.19) і (5.20) характеризують: індекс *падіння* - звукову хвилю, що падає на перешкоду, середовищем поширення якої є атмосферне повітря, котре знаходиться в приміщенні, що випробує реверберацію, індекс *пропущення* - звукову хвилю, що пройшла через перешкоду, середовищем поширення якої є розріджений газ у вакуумованій порожнині звукоізолюючої панелі, котра

використана в якості облицювання приміщення, що випробує реверберацію. При цьому величини максимального значення швидкості коливань часток пружного середовища $V_{\text{падіння}}$ і $V_{\text{пропущення}}$, що характеризують імпульс, який перенесений звуковою хвилею, однакові $V_{\text{падіння}} = V_{\text{пропущення}}$. Різняться щільності середовища поширення - щільність атмосферного повітря $\rho_{\text{падіння}}$ і щільність розрідженого газу у вакуумованій порожнині звукоізолюючої панелі $\rho_{\text{пропущення}}$, а також швидкості $c_{\text{падіння}}$ і $c_{\text{пропущення}}$ (швидкість звуку в газах є функцією його щільності), причому $\rho_{\text{падіння}} > \rho_{\text{пропущення}}$. Запишемо (5.18) як

$$\tau = \frac{I_{\text{пропущення}}}{I_{\text{падіння}}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot c_{\text{пропущення}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot c_{\text{падіння}}}. \quad (5.21)$$

За рахунок того, що $\rho_{\text{падіння}} > \rho_{\text{пропущення}}$, $I_{\text{пропущення}} < I_{\text{падіння}}$ (тобто пояснений механізм дії звукоізолюючих панелей, які містять вакуумовані порожнини), таким чином в описуваних панелях має місце зниження інтенсивності минаючого через них звуку. Згідно [97, с. 154, 249, 253] щільність газу ρ визначається як

$$\rho = P / (R \cdot T), \quad (5.22-a)$$

де P – тиск газу, Па; T - температура газу, К; R – газова постійна, Дж/(кг · К).

За (5.22-а) запишемо щільності ρ для обох ситуацій як:

$$\rho_{\text{падіння}} = \frac{P_{\text{падіння}}}{R_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{падіння}}}; \quad (5.22-б)$$

$$\rho_{\text{пропущення}} = \frac{P_{\text{пропущення}}}{R_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{пропущення}}}. \quad (5.22-в)$$

Згідно [97, с. 154, 249, 253] швидкість звуку в газі (чи фазова швидкість) c :

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}, \text{ м/с.} \quad (5.23-а)$$

де κ – показник адиабати.

Виходячи з (5.23-а), запишемо швидкість звуку в атмосферному повітрі:

$$c_{\text{падіння}} = \sqrt{\kappa_{\text{падіння}} \cdot R_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{падіння}}}, \text{ м/с,} \quad (5.23-б)$$

та швидкість звуку в розрідженому газі, що заповнює вакуумовану порожнину:

$$c_{\text{пропущення}} = \sqrt{\kappa_{\text{пропущення}} \cdot R_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{пропущення}}}, \text{ м/с.} \quad (5.23-в)$$

Підставивши (5.22-б), (5.22-в), (5.23-б), (5.23-в) у формулу (5.21):

$$\tau = \frac{I_{\text{пропущення}}}{I_{\text{падіння}}} = \frac{\rho_{\text{пропущення}} \cdot c_{\text{пропущення}}}{\rho_{\text{падіння}} \cdot c_{\text{падіння}}} = \quad (5.24)$$

$$= \frac{\frac{P_{\text{пропущення}}}{R_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{пропущення}}} \cdot \sqrt{\kappa_{\text{пропущення}} \cdot R_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{пропущення}}}}{\frac{P_{\text{падіння}}}{R_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{падіння}}} \cdot \sqrt{\kappa_{\text{падіння}} \cdot R_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{падіння}}}}$$

Якщо вакуумована порожнина заповнена тим же самим

газом, що й атмосферне повітря (а технологія виробництва звукоізолюючих панелей не передбачає заповнення їх іншим газом), газові постійні однакові:

$$R_{\text{падіння}} = R_{\text{пропущення}},$$

і показники адіабати також однакові

$$\kappa_{\text{падіння}} = \kappa_{\text{пропущення}}.$$

Тоді (5.24) спрощується:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_{\text{пропущення}} \cdot T_{\text{падіння}} \cdot \sqrt{T_{\text{пропущення}}}}{P_{\text{падіння}} \cdot T_{\text{пропущення}} \cdot \sqrt{T_{\text{падіння}}}} = \\ &= \frac{P_{\text{пропущення}} \cdot \sqrt{T_{\text{пропущення}}}}{P_{\text{падіння}} \cdot \sqrt{T_{\text{падіння}}}}. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Якщо гази різні, усе рівно відношення

$$P_{\text{падіння}}/P_{\text{пропущення}} = \text{const}, \text{ і}$$

$$\frac{T_{\text{падіння}} \cdot \sqrt{T_{\text{пропущення}}}}{T_{\text{пропущення}} \cdot \sqrt{T_{\text{падіння}}}} = \text{const},$$

тобто являють собою постійну величину. Таким чином, вираз (5.25) описує фізичний зміст процесу. Виходячи з (5.25), змінити інтенсивність звукової хвилі, що пройшла через вакуумовану порожнину звукоізолюючої панелі $I_{\text{пропущення}}$, у відношенні до вихідної інтенсивності хвилі, що падає (котра поширюється у атмосферному повітрі приміщення, що випробує реверберацію), $I_{\text{падіння}}$, відповідно змінити коефіцієнт пропущення τ , відповідно змінити час реверберації за формулами Ейрінга та Себіна можна двома шляхами:

1. зміною тиску у вакуумованій порожнині, $P_{\text{пропущення}}$ стосовно атмосферного $P_{\text{падіння}}$,

2. зміною температури у внутрішній порожнині звукоізолюючих пристроїв.

Пропонований спосіб реалізується таким чином.

Приміщення, у якому необхідно здійснювати оперативне регулювання часу реверберації, наприклад, ревербераційну камеру, зоровий зал, кінотеатр чи дискотеку та ін., облицьовують звукоізолюючими панелями, що містять вакуумовані порожнини (див. вище). Для регулювання часу реверберації звуку змінюють тиск розрідженого газу у вакуумованих порожнинах цих панелей за допомогою підключеного до них вакуумного насоса - пристрою для видалення газів і пар із судин, (або змінюють температуру цього газу за допомогою теплообмінників, що знаходиться у вакуумованих порожнинах цих панелей - апаратів для передачі тепла від середовища з більш високою температурою (тіла, що гріє - теплоносія) до середовища з більш низькою температурою (тіла, що нагрівається)). Вакуумні насоси і теплообмінники відомі [116] і підключення їх до вакуумованих порожнин звукоізолюючих панелей, якими облицьоване приміщення, не складає праці. При цьому змінюється коефіцієнт пропущення звуку τ , відповідно, коефіцієнт звукопоглинання α , відповідно час реверберації звуку в приміщенні. За рахунок підбора необхідного сполучення тиску і температури підбирають необхідний час реверберації звуку. При цьому з'являється можливість забезпечити різний час реверберації в різних частинах того самого приміщення, наприклад, за рахунок того, що у вакуумованих порожнинах звукоізолюючих панелей, якими облицьована одна стіна приміщення, підтримується одна величина тиску газу, а в порожнинах панелей, якими облицьована інша стіна приміщення – інша величина тиску газу, відмінна від неї. Можливість швидкої зміни тисків і температур забезпечує досягнення незвичайних звукових звуку в ефектів у приміщенні, зв'язаних з різкою зміною часу реверберації в ньому.

В якості пристрою контролю та вимірювання

звукоізолюючої здатності запропоновано застосувати [299].

ЧАСТИНА 6. ШУМ В ПРИМІЩЕННЯХ

6.1. Методика розрахунку згідно СНиП (стислий, скорочений виклад)

Акустичний розрахунок звичайно включає:

- 1) Визначення рівнів звукового тиску в розрахункових точках приміщення.
- 2) Зіставлення очікуваних рівнів звукового тиску з нормативними.
- 3) Визначення необхідного зниження шуму.
- 4) Розрахунок звуковбирного облицювання приміщення з метою забезпечення нормативних рівнів звукового тиску в ньому.

Розрахунки ведуться в октавних смугах частот зі середньгеометричними частотами 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; і 8000 Гц.

Згідно [79. - с. 190] по акустичних властивостях залежно від співвідношення розмірів всі приміщення можуть бути розбиті на 3 групи: розмірні, у яких відношення найбільшого розміру до найменшого не більше 5; плоскі, у яких $D/H > 5$. $G/H \geq 4$; довгі, у яких $D/H > 5$. $G/H < 4$. Залежно від цього розрахунки виконуються по різних формулах.

Звукопоглинання в приміщенні характеризується постійною приміщення:

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_0}$$

де A - еквівалентна площа поглинання, m^2 ; α_0 - середній коефіцієнт звукопоглинання:

$$\alpha_0 = \frac{A}{S_{обл}}$$

де: $S_{обл}$ - площа облицювання, m^2 .

Визначають постійну приміщення B із джерелом шуму в

кожній октавній смузі частот.

Постійна B має своє значення для кожної октавної смуги. Приблизно постійну B_{1000} (для октави з $f = 1000$ Гц) акустично не обробленого приміщення можна визначити так:

$$B_{1000} = V/20$$

Для кожної октавної смуги $B = \mu B_{1000}$, де коефіцієнт μ визначається табл. 4. [18, - с. 4]) залежно від обсягу V , м³, і типу приміщення.

Таблиця 6.1

**Визначення коефіцієнта B : μ – частотний множник,
що визначається за табл. 4 СНИП**

Обсяг приміщення V , м ³	Середньгеометричні частоти октавних смуг, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
< 200	0.82	0.8	0,75	0,7	0,8	1,0	1.4	1.8	2,5
200 < V < 1000	0.67	0,65	0,62	0,64	0,75	1.0	1,5	2,4	4,2
< 1000	0.5	0.5	0.5	0,55	0.7	1,0	1.6	3.0	6.0

Знаючи B , для кожної октавної смуги можна обчислити еквівалентну площу звукопоглинання A (м²) і середній коефіцієнт звукопоглинання:

$$A = \frac{B \cdot S_{\text{заг}}}{B + S_{\text{обл}}} = \frac{B}{\left(\frac{B}{S_{\text{обл}}} + 1 \right)}; \quad \alpha_{\theta} = \frac{B}{B + S_{\text{заг}}}$$

де: $S_{\text{заг}}$ - загальна площа поверхні приміщення, що підлягає звукопоглинанню, м².

Зниження рівня звукового тиску за октавними смугами (дБ) при акустичній обробці приміщення:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B};$$

B та B_1 - постійні приміщення відповідно до і після його акустичної обробки; м^2 .

$$B_1 = \frac{A_1 + \Delta A}{1 - \alpha_{\Theta 1}},$$

де: A_1 - еквівалентна площа звукопоглинання поверхнями, не зайнятими звуковбирним облицюванням,

$$A_1 = (S_{\text{заг}} - S_{\text{обл}});$$

$S_{\text{обл}}$ - площа облицювання, м^2 . У будь-якому випадку повинна виконуватися умова: $S_{\text{обл}} \leq S_{\text{заг}}$, м^2 ; $\alpha_{\Theta 1}$ - середній коефіцієнт звукопоглинання акустично обробленого приміщення $\alpha_{\Theta 1} = (A_1 + \Delta A) / S_{\text{обл}}$,

$$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} \cdot S_{\text{обл}}.$$

Значення коефіцієнта звукопоглинання матеріалу облицювання $\alpha_{\text{обл}}$ знаходять за довідковими даними у залежності від виду звуковбирного облицювання.

6.2. Власні авторські розробки в галузі розрахунків звукопоглинання

(Програма для розрахунку рівнів звукового тиску в октавних смугах частот, створюваних технологічним устаткуванням, у РТ виробничих приміщень)

6.2.1. *Склад матеріалу, що наводиться нижче:*

- 1) Інструкція до користування програмою;
- 2) Приклад акустичного розрахунку по комп'ютерній програмі, складеній автором (результати реальних обчислень на об'єкті „ПО Знамя”, м. Полтава).

6.2.2. *Підготовка до користування програмою.* Перед початком розрахунку повинні матися:

- План приміщення з нанесеними (і маркірованими ДШ), точним розташуванням призначених РТ;
- Відстані від кожного ДШ (його крайньої точки, чи його акустичного центра залежно від специфіки нормативних вимог) до РТ, обмірювані (обчислені) за планом;
- Дані про типаж використовуюваного технологічного устаткування; його габарити;
- Довідкові дані про спектри шуму (октавні рівні звукової потужності) даного технологічного устаткування – із довідників, даних натурних вимірювань, або паспортні дані нового обладнання;
- Нормативні рівні звукового тиску для даного виду виробничої діяльності (вибирається за ДСН 3.3.6.037-99).

Ці характеристики являють собою необхідний набір вихідних даних до розрахунку по розробленій програмі. Варто визначитися також із приміщеннями складної конфігурації, або приміщеннями, що утримують в собі групи технологічного устаткування, - розбивши їх уявленими площинами на кілька частин (простих умовних приміщень прямокутної форми, з однією групою

обладнання в кожній). У кожній з таких частин (умовних приміщень) повинне бути призначено не менш 1 РТ. Тоді розрахунки ускладнюються, бо для кожної наступної РТ враховують шумовий фон попередньої РТ.

6.2.3. Порядок розрахунку. (Ілюструється наочним прикладом).

6.2.1. Створюють файл (відкривають шаблон документа *Акустический расчет.xlt*) у "Microsoft Excel". Це досягається: вибором команди "Создать..." у меню "Файл" для застарілих версій "Microsoft Excel" (показано нижче на рис. 6.2.3.1); або вибором даного шаблону в області задач (панель створення файлів) у версії "Microsoft Excel 2002" з пакета "Microsoft Office XP". Можна також просто скопіювати (і потім відкрити) файл старого (попереднього) аналогічного розрахунку, замінивши потім у цій копії вихідні дані. Варто мати на увазі, що, для того, щоб уникнути появи здатних шокувати користувача непередбачених повідомлень, у підлягаючий заповненню осередок програми замість реальних вихідних даних введені умовні (нулі). Унаслідок цього умовний приклад розрахунку (з вихідними значеннями "0" у ряді граф ще до початку розрахунку) уже зроблений; уже (за нульовим значенням) заповнені результати розрахунку; уже побудовані зразки спектрів шуму. Це може бути незвично: розрахунки ще не почалися, але якісь результати вже є (програма лічить автоматично).

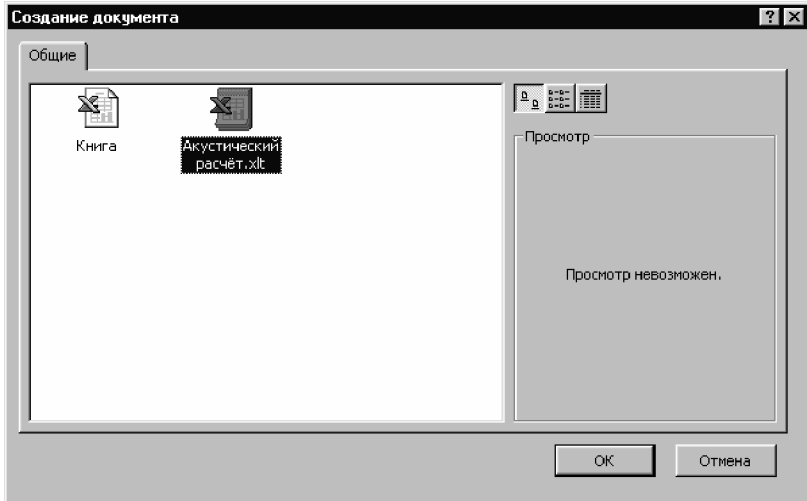


Рис. 6.1. Діалогове вікно «Создание документа» "Microsoft Excel"

Наприклад, навіть, якщо $L_{P1} = 0$ дБ, згідно з математичними правилами ($10^{0,1L_{P1}} = 1$). Ними треба просто знехатити. При введенні нових, *реальних* значень кінцеві результати розрахунку автоматично перераховуються. Для кожного з приміщень, що підлягають розрахунку, створюється окремий файл. Складне приміщення з групами устаткування, (умовно розділене уявленими площинами на декілька простих), обчислюється в 1 файлі (кожна частина, тобто умовне приміщення - на окремому аркуші "Microsoft Excel"). Якщо приміщення має просту (прямокутну) форму, і не має угруповання виробничого устаткування, непотрібні частини розрахунку (незадіяні аркуші "Microsoft Excel") не заповнюються. Варто упокоритися з тим, що в тих аркушах у будь-якому випадку через обставину, зазначену вище, будуть матися якісь умовні цифрові значення. По закінченні розрахунку їх можна видалити, скориставшись командою "Удалить лист" меню "Правка". Аркуші перейменовують згідно з

потребу; зокрема, в прикладі, що розглядається в нижче, аркуш 1 штучно названий „Часть 1 РТ1”.

6.2.2. Блок-схема розрахунку наведена на рис. 6.2. Користуючись цією принциповою схемою, починають (та виконують) складний розрахунок по його етапам.

6.2.3. Вводять найменування досліджуваного приміщення в комірку D1 аркушу „Часть 1 РТ1”. В інших (зв'язаних) комірках найменування об'єкта обновлюються автоматично. Загальне правило: вихідні дані вводяться тільки в ті комірки, що заповнені *курсивом*. Комірки, заповнені звичайним шрифтом, є захищеними (тобто заблоковані для внесення будь-яких змін) засобами "Microsoft Excel".

6.2.4. Вводять розміри досліджуваного приміщення (комірки B5 : B7 аркушу „Часть 1 РТ1”). Тип приміщення - („соразмерное / плоское / длинное”), - та вибір способу подальшого розрахунку залежно від цього визначається автоматично.

6.2.5. В комірку C10 аркушу „Часть 1 РТ1” вводять загальне (зведене) найменування джерел шуму в розглядуваній частині приміщення. Величина m – загальна кількість ДШ, обов'язково вводиться в комірку B9; згідно зі спеціально написаним макросом це число розширює кількість рядків з характеристиками ДШ для наступного заповнення (для взаємної сумісності із прикладом, що наводиться в графічному матеріалі цієї глави, в дійсному описі прийняте $m = 6$). Назвами кожного з конкретних ДШ у даному приміщенні заповнюють комірки B13:B18; в комірки F13:F18 для кожного з них (відповідно в кожному рядку) вводять їхні габарити, і в комірки H13:H18 нумерацію позицій обладнання по кресленню.

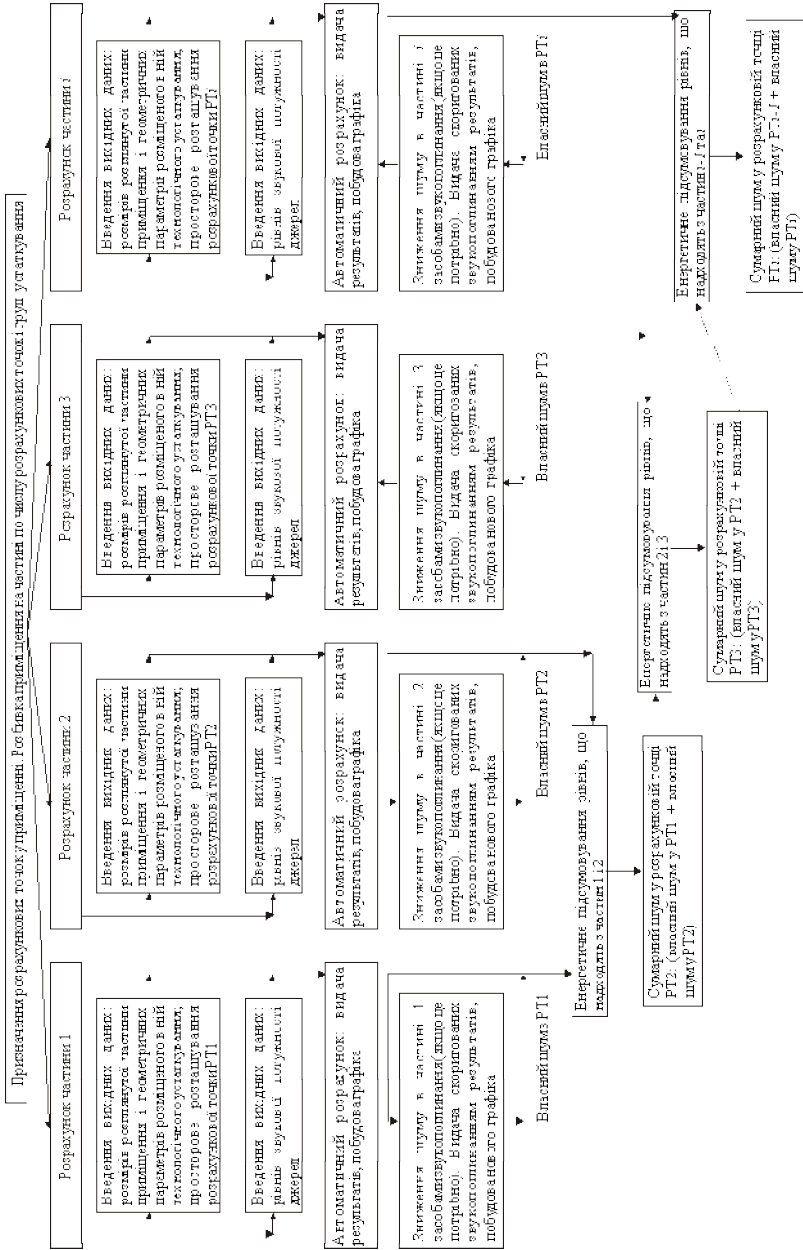


Рис. 6.2. Функціональна блок-схема розрахунку за програмою.

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls									
Введите вопрос									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	"Корпус 6. Механический участок" АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ								
	Наибольший акустический расчет помещеия:								
	1) Разделение помещения на 2 части воображаемой плоскостью с целью обеспечения возможности дальнейшего расчета, листа классификации и определение расчетных точек;								
	2) Акустический расчет 1 части								
	2.1) Определение уровней звукового давления в расчетных точках помещения (1 часть)								
	2.2) Сопоставление ожидаемых уровней звукового давления (в 1 части) с нормативными.								
	2.3) Определение требуемого снижения шума (в 1 части).								
	2.4) Расчет звукопоглощающей способности помещения (в 1 части) в целях обеспечения нормативных уровней звукового давления в нём.								
	3) Акустический расчет 2 части								
	3.1) Определение уровней звукового давления в расчетных точках помещения (2 части).								
	3.2) Сопоставление ожидаемых уровней звукового давления (во 2 части) с нормативными.								
	3.3) Определение требуемого снижения шума (во 2 части).								
	3.4) Расчет звукопоглощающей способности помещения (во 2 части) в целях обеспечения нормативных уровней звукового давления в нём.								
	4) Сравнение уровней звукового давления шума, производимого через воображаемую перегородку (из 1 во 2 части)								
	5) Добавление уровой шума 1 части к уровням 2 части по правую сложения уровней.								
	Расчеты ведутся в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, и 8000 Гц.								
	Механический участок (Корпус 6) представляет собой помещение со сложной конфигурацией и групповое размещение оборудования. Правила акустического расчета таких помещений изложены в [Борьба с шумом на производстве / Справочник под ред. Юрина Е.Я. М.: Машиностроение, 1985 – с. 194-195]. Там дословно указано следующее: «Октавные уровни звукового давления в расчетных помещениях ориентировочно определяются следующим образом. Помещение разбивают воображаемой перегородкой на части по числу групп оборудования и рассчитывают уровни звукового давления в каждой части, как в отдельном помещении, прикладывая воображаемые перегородки во фронталь, боковые, задней. Затем ... определяют уровни звукового давления шума, производимого через воображаемую перегородку, и добавляют к уровням собственного шума в частях по правую сложения уровней.								
	1) Разделение помещения на 2 части воображаемой плоскостью с целью обеспечения возможности дальнейшего расчета, листа классификации и определение расчетных точек.								
	Разбивка помещения воображаемой перегородкой по оси «Б» и «7-9/10» (см. план помещения). Механический участок (Корпус 6) разделен на 2 части. В части 1 выделена расчетная точка РТ1, в части 2 выделены расчетная точка РТ2.								
2	2) Акустический расчет 1 части (расчетная точка РТ1)								
3	наименование помещения "Часть 1. Механического участка"								
4	Размеры помещения								
5	длина D =	36 м	Переменные величины (исходные данные для расчета) вводятся курсивом						
6	ширина G =	10 м							
7	высота H =	4,2 м							
8	2.1) Определение уровней звукового давления в расчетных точках помещения (1 часть)								
	Согласно [Борьба с шумом на производстве / Справочник под ред. Юрина Е.Я. М.: Машиностроение, 1985 – с. 190] по акустическим свойствам в зависимости от соотношения размеров все помещения могут быть разбиты на 3 группы, соразмерные, у которых отношение наибольшего размера к наименьшему не более 5, плоские, у которых D/H > 5, G/H > 4, длинные, у которых D/H > 5, G/H < 4. В зависимости от этого расчета производятся по разным формулам.								
	Наше помещение имеет соотношение D/H = 124,2 < 5; G/H = 94,2 < 5. Таким образом, «1 часть участка типологична М» представляет собой помещение соразмерное.								
	Общее количество источников шума в помещении								
9	ид =	6	источников, в т.ч.			6 источников (см. ниже)			
10	Источники шума в помещении являются <i>токарная и фрезерные станки</i>								
11	Спецификации ближайших к расчетной точке источников шума								
12	№ ш.	Наименование оборудования							МНН пос. по чертежу
13	1	Ток. Шит. Станок 11611П			Габариты		1770x800x1170	11	
14	2	Унич. Фрез. Станок 676П			Габариты		1200x1215x1750	5	
15	3	Горизонт. Фрезерн. Станок 6Р80			Габариты		2000x1900x1600	9	
16	4	Верт. Фрезерн. Станок 6Р10			Габариты		1360x1850x1750	6	
17	5	Унич. Фрез. Станок 676П			Габариты		1200x1215x1750	5	
18	6	Ток. Шит. Станок 11611П			Габариты		1770x800x1170	11	
19									
20	Устанавливаем уровни звуковой мощности L_{p_i} , дБ от каждого источника шума. Согласно табличным данным								
21	[Снижение шума на промышленных предприятиях / Ленинградский государственный проектный институт. М. Стройиздат, 1971. – 168 с.]								
22	для используемого технологического оборудования:								
23	Уровни звуковой мощности в октавных полосах, в дБ на частоте в Гц								
24	Уровень, дБ/Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
25	L_{p1} =	74	75	80	80	79	79	75	75
26	L_{p2} =	80	85	78	82	80	79	77	89
27	L_{p3} =	86	70	78	80	78	78	78	88
28	Часть 1 РТ1 / Часть 2 РТ2 / Звукопоглощение в части 2 /								

Рис. 6.3. Фрагмент 1 (тобто початок) розрахунку очікуваних рівнів шуму у РТ1.

6.2.6. В комірки B25:I30 вводять спектри шуму устаткування. Обчислення аргументу $10 \lg^{0,1 L_{p1}}$ кожного рядка (B32:I37) відбувається автоматично.

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls									
Введіть запит									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
26	$L_{P2} =$	60	65	73	82	80	79	77	69
27	$L_{P3} =$	65	70	78	80	76	73	70	58
28	$L_{P4} =$	68	70	74	78	79	76	72	73
29	$L_{P5} =$	60	65	73	82	80	79	77	69
30	$L_{P6} =$	74	75	80	80	79	79	75	73
31									
32	$10^{0,1 L_{P1}}$	25118884,32	31622776,8	100000000	100000000	79432823,47	79432823,47	31622776,8	31622776,8
33	$10^{0,1 L_{P2}}$	1000000	3162277,66	19952623,15	158489319,2	100000000	79432823,47	50118723,36	7943282,347
34	$10^{0,1 L_{P3}}$	3162277,66	10000000	39810717,06	100000000	39810717,06	19952623,15	10000000	630957,3445
35	$10^{0,1 L_{P4}}$	3981071,706	10000000	12589254,12	63095734,45	79432823,47	39810717,06	15848931,82	31622776,8
36	$10^{0,1 L_{P5}}$	1000000	3162277,66	19952623,15	158489319,2	100000000	79432823,47	50118723,36	7943282,347
37	$10^{0,1 L_{P6}}$	25118884,32	31622776,8	100000000	100000000	79432823,47	79432823,47	31622776,8	31622776,8
38	Определяем расстояния r_i , представляющие собой расстояние от источника шума (акустического центра машины) до расчетной точки.								
39	Из геометрических построений определяем проецируем радиусы r_i								
40	$d_1 =$	3 м	Высота расчетной точки над поверхностью пола $h = 1,2 - 1,5$ м (согласно СНиП II-12-77). Принимаем радиусы r_i по теореме Пифагора: $r_i = \sqrt{d_i^2 + h^2}$.						
41	$d_2 =$	1,5 м							
42	$d_3 =$	2,5 м							
43	$d_4 =$	3,5 м							
44	$d_5 =$	2							
45	$d_6 =$	3,5 м							
46	Таким образом,								
47	$r_1 =$	3,354101966 м	Ближайшим к расчетной точке согласно [СНиП II-12-77, с. 5] является источник шума, у которого выполняется условие $r_i \leq 5 r_{min}$, где r_{min} – расстояние от расчетной точки до акустического центра ближайшего к ней источника шума. В нашем случае:						
48	$r_2 =$	2,12 м							
49	$r_3 =$	2,915476947 м							
50	$r_4 =$	3,907886553 м							
51	$r_5 =$	2,50 м							
52	$r_6 =$	3,907886553 м							
53	$r_{min} =$	2,12 м	Соответственно, $5 r_{min} = 10,61$ м						
54	Таким образом, ближайшим к расчетной точке является:								
55	$r_1 =$	3,35 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
56	$r_2 =$	2,12 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
57	$r_3 =$	2,92 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
58	$r_4 =$	3,91 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
59	$r_5 =$	2,50 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
60	$r_6 =$	3,81 м	<	$5 r_{min} =$	10,61 м	ближайший			
61	Число ближайших к расчетной точке источников шума $n = 6$								
62									
63	Посчитываем площади в образахых поверхностей S_i , окружающих i -й источник шума и проходящих через расчетную точку. $S_i = 2\pi r_i^2$. Площади соответственных поверхностей равны:								
64	Площади поверхностей								
65		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6		
66	m^2	70,69	28,27	53,41	91,11	39,27	91,11		
67	Определяем постоянную помещения V_{pm} с источником шума в каждой октавной полосе частот:								
68	где V_{pm} – постоянная помещения на среднегеометрической частоте 1000 Гц, определяемая по таблице 3 СНиП II-12-77 в зависимости от объема V , M , и типа помещения;								
69	μ – частотный множитель, определяемый по табл. 4 СНиП								
70	Приводим помещение тип 1 по табл. 3, для которого								
71	$V_{1000} = \sqrt{2} V$. В нашем случае:								
72	$V_{1000} =$								
73	$V_{1000} =$								
74	$V_{1000} =$								
75	$V_{1000} =$								
76	$V_{1000} =$								
77	$V_{1000} =$								
78	$V_{1000} =$								
79	$V_{1000} =$								
80	$V_{1000} =$								
81	$V_{1000} =$								
82	$V_{1000} =$								
83	$V_{1000} =$								
84	$V_{1000} =$								
85	$V_{1000} =$								
86	$V_{1000} =$								
87	$V_{1000} =$								
88	$V_{1000} =$								
89	$V_{1000} =$								
90	$V_{1000} =$								
91	$V_{1000} =$								
92	$V_{1000} =$								
93	$V_{1000} =$								
94	$V_{1000} =$								
95	$V_{1000} =$								
96	$V_{1000} =$								
97	$V_{1000} =$								
98	$V_{1000} =$								
99	$V_{1000} =$								
100	$V_{1000} =$								

Рис. 6.4. Фрагмент 2 (тобто середина) розрахунку очікуваних рівнів шуму у РТ1.

6.2.7. В комірки В40:В45 вводять горизонтальні проєкції відстані від джерела шуму до РТ, вимірювані за планом. Відстані від ДШ до РТ (з урахуванням висоти розташування РТ над підлогою: $1,2 \div 1,5$ м) визначаються в

комірок В47:В53 автоматично по теоремі Піфагора.

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls										
Введіть запит										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
74	Розрахунок постійної помещення $B_{p, \text{дБ}}$									
75	$V, \text{м}^3$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
76	$V_{\text{пос.}}, \text{м}^3$ (Постійна помещення для октавної полос частот 1000 Гц)					75,6				
77	Постійна помещення B для кожної октавної полоси частот	37,8	37,8	41,58	51,93	75,6	120,96	226,8	453,6	
Окончателний розрахунок рівней звукового тиску при роботі декількох різних джерел шуму введемо формулу П.2. з урахуванням роботи [Снижение шума на промышленных предприятиях / Ленинградский государственный университет. М.: Стройиздат, 1971. - с. 20].										
$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{10^{0,1 L_{p_i}}}{S_i} + \frac{4 B \cdot 10^{0,1 L_{p_i}}}{\theta_{\text{ш}}} \right) \text{ дБ.}$										
Всі вказівки в ній вивчені були виконані раніше.										
78	Промежутові етапи вирахувань:									
80	Аргумент $L_i, \text{дБ}$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
81	$10^{0,1 L_i / S_i}$	365359,237	447370,774	1414710,61	1414710,61	1123744,58	1123744,58	447370,774	447370,7743	
82	$10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	35367,7651	111842,654	705679,689	5605413,02	3536776,51	2609261,44	1772087,24	280936,1444	
83	$10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	29210,8378	187241,11	745420,283	187241,11	745420,283	372965,13	187241,11	11814,1932	
84	$10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	43697,0511	109762,03	138182,208	892551,268	871870,793	436970,511	173961,094	347098,0145	
85	$10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	20464,7909	80026,7394	508089,376	4032697,37	2346479,09	2022740,24	1276262,81	202274,0241	
86	$10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	275709,733	347098,015	1097620,3	1097620,3	871870,793	871870,793	347098,015	347098,0145	
87	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	2658080,88	3346325,566	9620089,62	7568678,987	4202794,893	2626746,806	557720,9277	278860,4639	
88	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	105920,1059	334632,5566	1919444,288	11979540,36	5291005,291	2827467,806	803920,1016	70046,59155	
89	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	334632,5566	1059201,059	3829794,811	7568678,987	2106397,146	658908,9666	176366,843	5563,987747	
90	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	421277,4292	1058201,058	1211087,457	4769140,926	4202794,893	1316491,966	279522,6039	278860,4639	
91	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	105920,1059	334632,5566	1919444,288	11979540,36	5291005,291	2827467,806	803920,1016	70046,59155	
92	$4 \cdot 10^{0,1 L_{p_i} / S_i}$	2658080,89	3346325,566	9620089,62	7568678,987	4202794,893	2626746,806	557720,9277	278860,4639	
93	Сума аргументов (число под знаком логарифма)	7078521,393	10762159,72	32729492,5	66122562,63	34692944,46	20121570,86	7543708,55	2618829,638	
94	$L = 10 \lg$ (сумма под знаком логарифма), точно	68,49942549	70,3189433	75,14939271	78,20349677	75,43980487	73,03661882	68,77584901	64,18107243	
95	уровни звукового тиску $L_{p, \text{дБ}}$	68	70	75	78	75	73	69	64	
96	2.2-2.3) Сопоставление ожидаемых уровней звукового давления с нормативными и определение требуемого снижения шума									
97	Уровень, дБ \sqrt{f} , Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Нормативные значения допустимых уровней звукового давления [ГОСТ 3.36.037-99. Состояние шума в производственном шуму, измеренное по инфракраску, К - 1999 - 32 с.]										
98		95	87	82	78	75	73	71	69	
99	Требуемое снижение шума (Математическое выражение)	-27	-17	-9	0	0	0	-2	-5	
100	Требуемое снижение шума (результат расчета)	не требуется	не требуется	не требуется	не требуется	не требуется	не требуется	не требуется	не требуется	
101	2.4) Расчет звукопоглощающей способности помещения (в 1 части) в целях обеспечения нормативных уровней звукового давления в нем									
102	не требуется, т.к. ожидаемые уровни ниже нормативных									
103										

Рис. 6.5. Фрагмент 3 (тобто кінець) розрахунку очікуваних рівнів шуму у РТ1.

6.2.8. Обчислення величини n (число найближчих до РТ ДШ) виробляється автоматично (виходячи з раніше введених відстаней по п. 6.2.7 і габаритів ДШ по п. 6.2.5. У

визначених умовах $m = n$; у ряді випадків, однак, $m \neq n$. Це дуже суттєвий момент, оскільки ДШ, що не є найближчими до РТ, відповідно з правилами обчислень (згідно СНиП II-12-77) в подальшій лічбі не враховують.

6.2.9. Нормативні значення припустимих рівнів звукового тиску (згідно ДСН 3.3.6.037-99) вводять в комірки В98:І98. Оскільки діючі норми передбачають усього тільки декілька різних між собою наборів припустимих спектрів, з них (заздалегідь при складенні програми внесених у базу даних) просто вибирається відповідний розглянутому випадку.

6.2.10. Подальші розрахунки здійснюються автоматично. Результатом розрахунку є дані рядку 95 (вони уперше (точно) відображаються в рядку 94; далі округляються до цілих значень дБ: як це прийнято в акустиці; для більшої зручності виробляється їхнє вирахування з нормативних значень) – комірки А98:І100. За результатами обчислень в аркуші "Microsoft Excel" „Часть 1 РТ1” комп'ютером автоматично будується графік.

6.2.11. У нашому прикладі програма показала, що очікувані рівні в частині 1 приміщення не перевищують припустимі. Автоматизований розрахунок звукопоглинання задля частини 1 тому не виконується (його приклад розглянутий далі для частини 2 у п. 6.2.13 – п. 6.2.17).

6.2.12. Аналогічно виконуються вимоги п. 6.2.3- п. 6.2.10 для акустичного розрахунку другої частини приміщення (точка РТ2). Розрахунок виконується на іншому листі "Microsoft Excel" – „Часть 2 РТ2”. У результаті даного розрахунку, однак же, встановлено, що очікувані рівні в приміщенні перевищують припустимі; вимагаються додаткові заходи щодо зниження шуму.

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls										
Файл Правка Вид Вставка Формат Среда Данные Служба Справка										
Введите вопрос										
1										
2	Продолжение расчета			"Корпус 6. Механический участок"						
3	В помещении находятся 2 расчетные точки. Проводим расчёт для каждой из них раздельно. Расчетная точка РТ2									
4	Рассмотрим помещение "Часть 2 механического участка корпуса 6. Расчетная точка РТ2"									
5	Размеры помещения									
6	длина D =	75 м		Переменные величины (исходные данные для расчета) вводятся вручную						
7	ширина G =	7 м								
8	высота H =	4,2 м								
9	3.1) Определение уровня звукового давления в расчетной точке помещения (2 части)									
10	Общее количество источников шума в помещении									
11	n =	6		источников, в т.ч.		n =		6 источников (см. ниже)		
12	Источниками шума в помещении являются <i>токарные станки и токарные автоматы</i>									
13	3.1.1. Расчетная точка РТ2									
14	Спецификация близлежащих к расчетной точке источников шума									
15	№ шт	Наименование оборудования						№№№ по з. чертежу		
16	1	Токар. авт. SV18RA		Габариты		2100x1000x1450		26		
17	2	Токар. авт. SV18RA		Габариты		2100x1000x1450		26		
18	3	Токар. авт. ПАТ52		Габариты		1600x900x1500		22		
19	4	Токар. авт. ТГ-26		Габариты		1600x1000x1520		23		
20	5	Токар. авт. 1М10ДА		Габариты		1600x870x1365		21		
21	6	Токар. авт. ст. "Микромет"		Габариты		2200x1000x1450		24		
22	Устанавливаем уровни звуковой мощности $L_{p,2}$ дБ от каждого источника шума. Согласно табличным данным									
23	для используемого технологического оборудования									
24	Уровни звуковой мощности в октавных полосах и дБ на частоте в Гц									
25	Уровень, дБ \ f, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
26	L_{p1}	74	75	80	80	79	79	75	75	
27	L_{p2}	74	75	80	80	79	79	75	75	
28	L_{p3}	79	85	82	84	84	83	82	80	
29	L_{p4}	79	85	82	84	84	83	82	80	
30	L_{p5}	79	85	82	84	84	83	82	80	
31	L_{p6}	74	75	80	80	79	79	75	75	
32	$10^{0,1 L_{p1}}$	25118654,32	31622776,6	100000000	100000000	79432623,47	79432623,47	31622776,6	31622776,6	
33	$10^{0,1 L_{p2}}$	25118654,32	31622776,6	100000000	100000000	79432623,47	79432623,47	31622776,6	31622776,6	
34	$10^{0,1 L_{p3}}$	79432623,47	316227766	158489319,2	251186843,2	251186843,2	199526231,5	158489319,2	100000000	
35	$10^{0,1 L_{p4}}$	79432623,47	316227766	158489319,2	251186843,2	251186843,2	199526231,5	158489319,2	100000000	
36	$10^{0,1 L_{p5}}$	79432623,47	316227766	158489319,2	251186843,2	251186843,2	199526231,5	158489319,2	100000000	
37	$10^{0,1 L_{p6}}$	25118654,32	31622776,6	100000000	100000000	79432623,47	79432623,47	31622776,6	31622776,6	
38	37) Определим расстояния r_i , представляющие собой расстояние от источника шума (акустического центра машины) до расчетной точки.									
39	Из геометрического построения определим проекции этих радиусов									
40	$d_1 =$	4 м		Высота расчетной точки над поверхностью пола $h = 1,2 - 1,5$ м (согласно СНиП						
41	$d_2 =$	1,5 м		II-12-77). Принимаем радиусы r_i из теоремы Пифагора: $r_i = \sqrt{d_i^2 + h^2}$						
42	$d_3 =$	3 м								
43	$d_4 =$	4,5 м								
44	$d_5 =$	5 м								
45	$d_6 =$	1,5 м								
46	$d_7 =$	3 м								
47	Таким образом,									
48	$r_1 =$	4,5 м		Ближайшими к расчетной точке согласно [СНиП II-12-77, с. 5] являются источники						
49	$r_2 =$	7,12 м		шума, у которых выполняется условие $r_i \leq 5$ м, где $r_{i, \text{max}}$ – расстояние от расчетной						
50	точки до акустического центра ближайшего к ней источника шума. В нашем									
51	случае – это источник шума № 3.									

Рис. 6.6. Фрагмент 1 (тобто початок) розрахунку очікуваних рівнів шуму у Р2.

Аналогічно попереднього розрахунку, за винятком вибору конкретного варіанта звуковбирного облицювання (здійснюється примусово (напівавтоматично) відповідно до таблиці 1 додатка 2 СНиП II-12-77, наведеної там на стор. 42-44).

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls									
Файл Правка Вид Вставка Формат Сервіс Дані Окно Справка									
Введіть вміст									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
36									
37	Определим расстояния r_i , представляющие собой расстояние от источника шума (акустического центра машины) до расчетной точки.								
38	Из геометрического построения определим проекции этих радиусов								
39	$d_1 =$	4	м	Высота расчетной точки над поверхностью пола $h = 1,2 - 1,5$ м (согласно СНиП II-12-77). Применим радиусы r_i по теореме Пифагора: $r_i = \sqrt{d_i^2 + h^2}$.					
40	$d_2 =$	1,6	м						
41	$d_3 =$	3	м						
42	$d_4 =$	4,6	м						
43	$d_5 =$	6	м						
44	$d_6 =$	1,6	м						
45		3							
46	Таким образом,								
47	$r_1 =$	4,5	м	Ближайшим к расчетной точке согласно [СНиП II-12-77, с. 5] является источник шума, у которого выполняется условие $r_i \leq 5$ км, где r_{min} – расстояние от расчетной точки до акустического центра ближайшего к ней источника шума. В нашем случае:					
48	$r_2 =$	2,12	м						
49	$r_3 =$	3,354101966	м						
50	$r_4 =$	4,74341649	м						
51	$r_5 =$	5,22	м						
52	$r_6 =$	2,121320344	м						
53	$r_{min} =$	2,12	м	Соответственно, $S_{r_{min}} =$		10,61	м		
54	Таким образом, ближайшим к расчетной точке является:								
55	$r_1 =$	4,50	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
56	$r_2 =$	2,12	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
57	$r_3 =$	3,35	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
58	$r_4 =$	4,74	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
59	$r_5 =$	5,22	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
60	$r_6 =$	2,12	м	<	$S_{r_{min}} =$	10,61	м	ближайший	
61	Число ближайших к расчетной точке источников шума $n =$ 6								
62	Подсчитываем площади воображаемых поверхностей S_i , окружающих i -й источник шума и проходящих через расчетную точку. $S_i = 2\pi r_i^2$. Площади соответствующих поверхностей равны:								
64	Площади поверхностей	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6		
65	м ²	127,23	28,27	70,69	141,37	171,22	28,27		
66	Определим постоянную помещения $V_{ин}$ с источником шума в каждой октавной полосе частот: $V = V_{ин} \cdot \alpha$ где $V_{ин}$ – постоянная помещения на среднем метрической частоте 1000 Гц, определяемая по таблице 3 СНиП II-12-77 в зависимости от объема V , м ³ , и типа помещения; α – частотный множитель, определяемый по табл. 4 СНиП.								
67	Объем помещения $V =$		441	м ³	Принимаем помещение тип 1 по табл. 3 для которого				
68					$V_{ин} = V/20$. В нашем случае: $V_{ин} =$ 22,05				
69	Частотный множитель α согласно табл. 4 СНиП								
70	Объемы	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
71	$V = 200 - 1900$ м ³	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
72									
73	Расчет постоянной помещения $V_{ин}$								
74	V , м ³ и Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
75	$V_{ин}$, м ³ Постоянная помещения для октавной полосы частот 1000 Гц					22,05			
76	Постоянная помещения $V_{ин}$ для каждой октавной полосы частот	14,3325	13,671	14,112	16,5375	22,05	33,075	52,92	92,61
Окончательный расчет уровней звукового давления при работе нескольких различных источников шума видим по формуле П.2, приведенной в разделе 1.2.2. Часть 1 РТ1. Часть 2 РТ2. Звукопоглощение в части 2.									

Рис. 6.7. Фрагмент 2 (тобто середина) розрахунку очікуваних рівнів шуму у РТ2.

Потрібне сполучення ревербераційних коефіцієнтів звукопоглинання $\alpha_{обл}$ вибирають, і вводять в комірку В25:І25 аркушу «Звукопоглинання в частині 2». Цим активізується початок розрахунку на цьому аркуші.

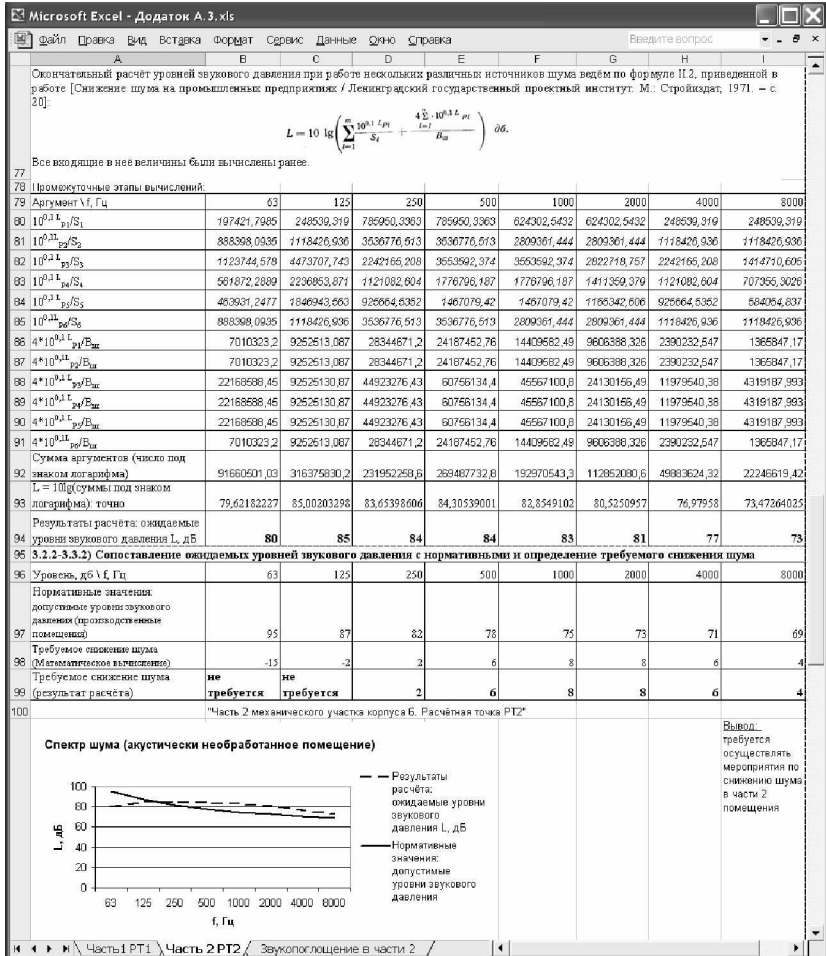


Рис. 6.8. Фрагмент 3 (только кінець) розрахунку очікуваних рівнів шуму у РТ2.

6.2.13. У випадку, якщо нормовані значення рівнів звукового тиску в досліджуваній частині приміщення відповідно до попереднього розрахунку перевищені, автоматично включається в дію інший блок програми: розрахунок звукопоглинання облицювання. Усі необхідні вихідні дані в нього подаються автоматично.

Microsoft Excel - Додаток А.3.xls									
файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка Введите вопрос									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	3.4) РАСЧЁТ звукопоглощения в помещении "Часть 2 льнянского участка корпуса 6. Расчётная точка РТ2"								
2	Расчёт по варианту 1- Обширное звукопоглощающее покрытие типами "Аксиларан" поддерживается только потолком								
3	Промысловый выход: площадь обшивки мала. Требуется увеличить $S_{об}$ за счёт акустической обработки не только потолка, но и стен.								
4	Расчёт по варианту 2- Обширное звукопоглощающее покрытие типами "Аксиларан" поддерживается не только потолком, так и стены части 2 помещения								
5	Исходные данные для расчёта:								
6	длина D, м,	15			Площадь пола	D*G	180		
7	ширина G, м,	12			Площадь потолка	D*G	180		
8	высота H, м,	4,2			Площадь стен	2*D*H+2*G*H	154,2		
9	$S_{ст.р.}$ - площадь общей площади ограждающих конструкций помещения в м ²				$S_{ст.р.} =$		514,2		
10	$S_{об.п.}$ - площадь обшивки м ² ,				$S_{об.п.} =$		254,2		
11	В нашем случае предусмотрено обшивка стен и потолка звукопоглощающими материалами. При этом за суммарной площади стен $2 * D * H + 2 * G * H$ и потолка $(D * G)$ вычитается площадь, на которую обшивке звукопоглощающими материалами, а именно площадь оконных $S_{окн}$ и дверей $S_{дверей}$ и звукопроема $S_{зв.проема}$								
	$S_{ст.р.} = 2 * D * H + 2 * G * H + D * G - S_{окн} - S_{дверей} - S_{зв.проема}$ м ²								
12	Принимаем $S_{окн} = S_{дверей} = S_{зв.проема} = 60$								
13	Внутренний проём - участок в обрамляемой перегородки, разделяющей части 1 и 2 ($S_{ст.р.} - S_{об.п.}$) = 260								
	При расчётах звукопоглощения в помещении характеризуется величиной B_1 , м ² , которая называется постоянной помещения после установки в нём звукопоглощающих конструкций:								
	$B_1 = \frac{A + \Delta A}{1 - \alpha}$								
	где: $(A + \Delta A)$ - эквивалентная площадь поглощения, м ² , представляющая собой сумму величин звукопоглощения ограждающих конструкций помещения, на которых нет звукопоглощающей обшивки; A_1 и величина звукопоглощения звукопоглощающими конструкциями ΔA (формула 44 СНиП),								
	При этом величина A_1 может быть вычислена как:								
	$A_1 = \alpha (S_{ст.р.} - S_{об.п.})$								
	$S_{ст.р.}$ - площадь общей площади ограждающих конструкций помещения в м ² , в нашем случае $S_{ст.р.} = 180,6$.								
	$S_{об.п.}$ - площадь обшивки м ² ,								
14	α - средний коэффициент звукопоглощения помещения со звукопоглощающими конструкциями								
	α - средний коэффициент звукопоглощения до устройства звукопоглощающей обшивки								
	$\alpha = \frac{\sum S_{i,0}}{S_{ст.р.}} + 1$								
15									
16	Величина α , ф. Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
17	Постоянная помещения B	14,3325	13,671	14,112	16,3375	22,05	33,075	52,92	92,61
18	$B/S_{ст.р.}$	0,028	0,027	0,027	0,032	0,043	0,064	0,103	0,180
19	α	0,027	0,026	0,027	0,031	0,041	0,060	0,093	0,133
20	Коэффициент ψ по графикам на рис. 3 СНиП	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	0,940	0,890	0,870
21	Определение величины A_1	$A_1 = \alpha (S_{ст.р.} - S_{об.п.})$							
22	Величина ΔA , Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
23	A_1	0,00010	0,00010	0,00010	0,00012	0,00018	0,00023	0,00038	0,00059
	Величина ΔA может быть вычислена по формуле:								
	$\Delta A = \alpha_{об} S_{об} + \alpha_{шт} n_{шт}$								
	где $\alpha_{об}$ - реверберационный коэффициент звукопоглощения звукопоглощающей конструкции обшивки в октавной полосе частот, определяемый по прил. 2 СНиП,								
	$S_{об}$ - площадь обшивки, м ² ,								
	$\alpha_{шт}$ - величина звукопоглощения штучного звукопоглотителя в м ² , определяемая по прил. 2;								
	$n_{шт}$ - количество штучных звукопоглотителей;								
	Исходия из конструктивных особенностей, принимаемых в качестве звукопоглощающих конструкций плиты типа "Аксиларан" или «Альвенто», материал: гнзель, размер 300 x 300, (ГОСТ 17913-73), с воздушным промежутком 30 мм (стр. 6 в таблице 1 приложения 2 СНиП). Средняя плотность звукопоглощающего материала улик $\rho_{улик} = 400$ кг/м ³ , толщина слоя звукопоглощающего материала $h = 20$ мм. Штучные звукопоглотители отсутствуют $\alpha_{шт} = 0$.								
24									
25	Расчёт ΔA (с учётом выбранной конструкции звукопоглотителя)								
26	Величина α , ф. Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
27	коэффициент								
28	звукопоглощения $\alpha_{об}$ по	0,01	0,2	0,74	0,88	0,81	0,74	0,79	0,68
28	ΔA	2,542	50,84	180,482	223,656	205,902	180,482	200,819	165,23
29	Определяем средний коэффициент звукопоглощения помещения со звукопоглощающими конструкциями								
30	Величина	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
31	$\alpha = (A_1 + \Delta A) / S_{ст.р.}$	0,004943805	0,098872228	0,3509959	0,435037184	0,40043205	0,35099617	0,390545233	0,321335253
Часть 1 РТ1 \ Часть 2 РТ2 \ Звукопоглощение в час									

Рис. 6.9. Початок розрахунку рівнів шуму у РТ2 із врахуванням звукопоглинання.

6.2.14. На обчисленні величин $V/S_{\text{отр}}$ і $V_1/S_{\text{отр}}$, на жаль, розрахунок тимчасово переривається. Користаючись графіком (мал. 3 СНиП II-12-77, с. 4), у кожній октавній смузі виявляють значення коефіцієнтів ψ і ψ_1 , і вводять їхнє значення в комірки B18:I18 і B37:I37 відповідно. По незалежним від автора причинам (функція залежності ψ від $V/S_{\text{отр}}$ у СНиП представлена не аналітично, а у вигляді графіка) цю операцію, на жаль, не можна автоматизувати. Це – типовий концептуальний недолік математичного моделювання акустичних процесів.

Для зручності користувачів вищезгаданий графік сканований із СНиП, і поміщений у тіло програми. Далі розрахунок знову продовжується автоматично.

6.2.15. Результати розрахунку відображаються в комірках A48: I51. Тут, раніше і пізніше можна бачити рядок «Требуемое снижение шума». Програма зроблена так, щоб вона автоматично виводила чисельне значення необхідного зниження в дБ при різниці нормативного й очікуваного рівня ≤ 0 ; і транспарант «Не требуется» у протилежному випадку. По цим даним автоматично будується графік.

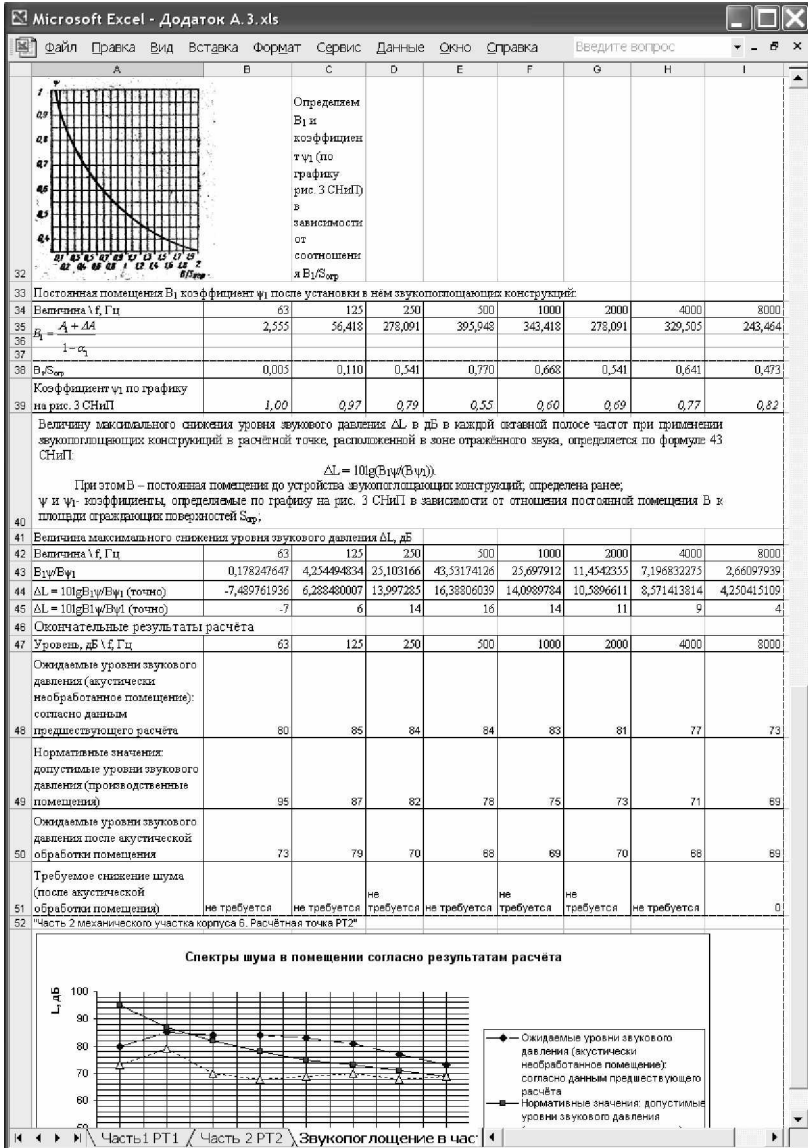


Рис. 6.10. Кінець розрахунку рівнів шуму у РТ2 із врахуванням звукопоглинання.

6.2.16. Передбачено 2 варіанти блоку розрахунку звукопоглинання:

1) коли звукопоглинальному облицюванню піддається тільки стеля: менш ефективний, зате – більш економічний;

2) коли звукопоглинальному облицюванню піддається і стеля, і стіни: більш діючий, але, разом з тим, і найдорожчий.

За замовчуванням передвічно прораховується перший варіант. Якщо він недостатній, тобто при наявності позитивних значень у рядку «Требуемое снижение шума», - (угорі виводиться рядок: «Промежуточный вывод: площадь облицовки мала. Требуется увеличить $S_{\text{обл}}$ за счёт акустической обработки не только потолка, но и стен»), - автоматично виконується перехід до другого варіанта. В значення « $S_{\text{обл}}$ - площа облицовки, м^2 », комірка Н8, - тоді автоматично вводиться скоректована (збільшена) площу по варіанту 2. І в тому, і в тому випадку площа підраховується автоматично, виходячи з раніше введених (на самому початку розрахунку частини 2) геометричних розмірів. Найменування відкинутого варіанта автоматично закреслюється (рядки 2 і 3 прикладу).

6.2.17. Якщо і цей захід недостатній, тобто простим збільшенням площі звукопоглинальних конструкцій проблему не вирішити, - потрібно вручну поміняти вид звукопоглинального облицювання (с. 42-44 СНиП II-12-77), прийнявши його більш ефективну конструкцію (при цьому математично змінюється сполучення ревербераційних коефіцієнтів звукопоглинання $\alpha_{\text{обл}}$).

6.2.18. Практика показує, що і цей захід в окремих виняткових випадках може виявитися не діючим (тобто звукопоглинання в даному випадку попросту не ефективно). Тоді застосовують інші види впливу на джерело шуму: конструктивні заходи щодо зниження

шуму в джерелі виникнення, і ін. Наша програма ці специфічні розрахунки сама безпосередньо не виконує; однак результати подібних (зовнішніх стосовно неї) шумозахисних мір враховуються їй в комірках таблиці «Уровни звуковой мощности в октавных полосах, в дБ на частоте в Гц», куди (заново) вводяться вихідні дані, що характеризують джерело шуму. Після зниження шуму в джерелі виникнення ці значення стануть нижче, ніж раніше; відповідно, пройшовши весь ланцюжок розрахунків, ми можемо розраховувати на зниження шуму і на самому кінцевому етапі обчислень.

6.2.19. Роблять визначення рівнів звукової потужності шуму, що проникає через уявлювану перешкоду (з 1 у 2 частину); потім складають раніше вираховані рівні в частині 1 з тільки що вирахованими власними рівнями в частині 2. Ця частина розрахунку реалізується автоматично.

6.2.20. Повторюють п. 6.2.3-6.2.10 для третьої розрахункової точки РТ3 (третьої частини приміщення). При необхідності прибігають до вказівок п. 13-17, у випадках крайньої необхідності - до вказівок п. 18. Потім, користаючись указівками п. 19, роблять підсумовування раніше обчислених рівнів у РТ2 з окремо обчисленими власними рівнями в РТ3.

6.2.21. Повторюють п. 6.2.20 необхідну кількість разів: по кількості розрахункових точок РТ_і (або частин, на які уявлюваними площинами розбите приміщення).

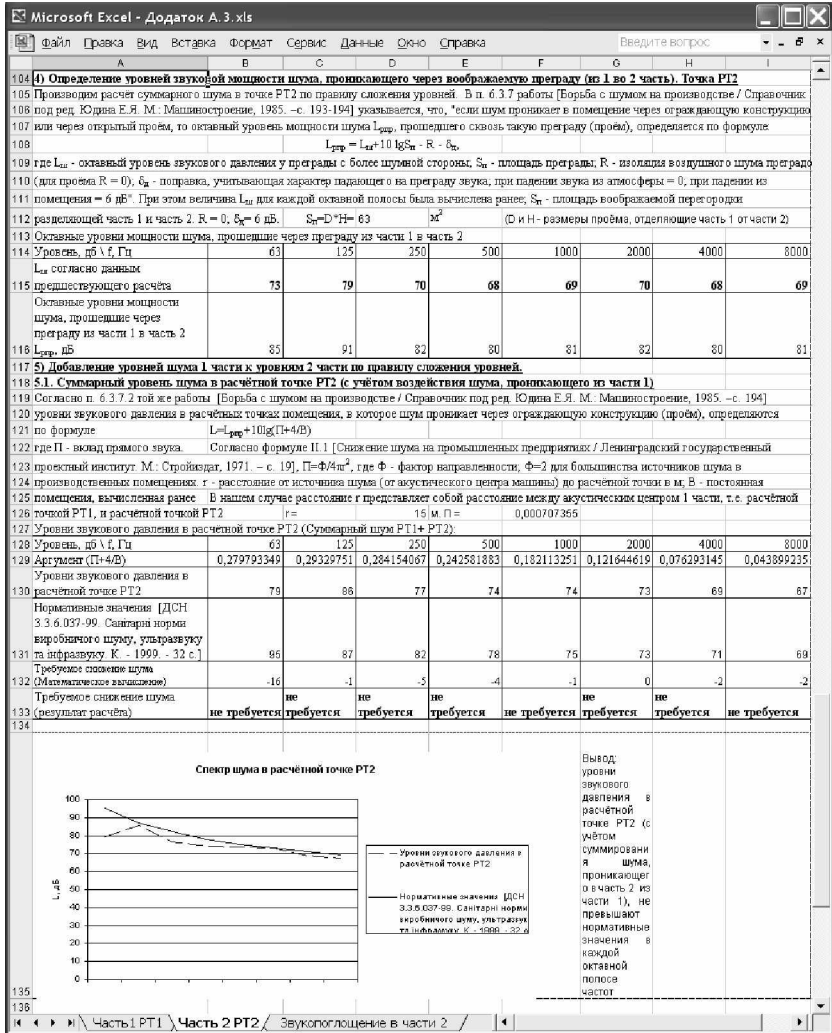


Рис. 6.11. Фрагмент розрахунку, де здійснюється складення рівнів шуму в розрахункових точках РТ1 та РТ2.

6.3. Шумозахисні та шумозахищені будинки

Проблема боротьби із шумом настільки гостро постала в останні роки в першу чергу в зв'язку зі значно зростаючою

інтенсивністю транспортного руху. Щодня на вулиці виїжджають тисячі автомобілів. Зросли потужності двигунів, швидкості, що також послужило причиною збільшення транспортного шуму. Його рівень у години «пік» на оживлених магістралях наближається до 75 дБ. При такій інтенсивності далеко не завжди вдається забезпечити припустимі санітарні норми: 55 дБ для території житлової забудови (двори, внутрішні проїзди і т.д.), 40 дБ в житловому приміщенні вдень і 30 дБ у нічний час.

Транспортний шум — це лише одна з проблем, зв'язана зі зростаючою інтенсивністю руху, перевантаженістю вулиць машинами, забрудненням повітря вихлопними газами. Для їхнього вирішення проводиться цілий комплекс заходів. Зокрема, йде велика робота по упорядкуванню транспортних потоків, заборонений проїзд транзитного транспорту через великі міста, обмежений в'їзд вантажних автомобілів на центральні вулиці і т.д. Конструктори ведуть роботи з зниженню шуму двигунів. І все-таки поки не вдається скільки-небудь значно знизити шум на оживлених магістралях. Тому особливого значення набуває розробка методів захисту від нього. Там, де дозволяє рельєф місцевості, дороги прокладають у виїмках, уздовж магістралей улаштовують спеціальні насипи-кавалєри, зводять шумозахисні стінки. Зелені насадження також створюють деяку перешкоду, але ефект її незначний [300, 301].

З архітектурних засобів захисту найбільш поширено зонування забудови, коли до проїзної частини виносяться будівлі установ, підприємств, що створюють ефект, що екранує, для розташованих поза ними житлових будинків. Однак можливості використання зонування обмежені [302].

Традиційним для шумозахисту селитьби від

транспортного шуму є таке архітектурне рішення — розміщення будинків на достатнім видаленні від проїзної частини. Однак не все просто та ефективно. Справа в тім, що звук з відстанню загасає незначно: при подвоєнні дистанції рівень шуму знижується усього на 3 дБА. Так, якщо в 7,5 м від проїзної частини рівень шуму досягає 75 дБА, те зниження шуму на 9 дБА відбудеться в 60 м, на 12 дБА - вже в 120 м від дороги і т.д. Сучасні масштаби будівництва і недолік вільної території, що змушують здійснювати забудову щільно до магістралей, роблять цей метод недостатнім. У цілому можливості архітектурних засобів захисту від шуму досить обмежені, особливо в районах із уже сформованою забудовою [303]. Чисельні значення зниження рівня звуку при застосуванні в якості екрану фронтальної забудови магістральної вулиці п'ятиповерховими шумозахисними будинками (висотою біля 15 м та шириною 12 м) без розривів надані в табл. 6.2.

Таблиця 6.2.

Зниження рівня звуку шумозахисними будинками

Відстань від осі вулиці до лінії забудови, м	Відстань від заднього фасаду до РТ, м	Поверх				
		Зниження рівня звуку, дБ А				
35	2	26	24	22	7	0
	20	26	22	18	11	9
	40	23	21	17	13	11
	60	22	20	17	14	12
	80	21	19	16	14	12
	100	20	18	16	14	12
55	2	22	21	18	3	0
	20	21	19	14	7	4
	40	19	18	13	8	6

Відстань від осі вулиці до лінії забудови, м	Відстань від заднього фасаду до РТ, м	Поверх				
		Зниження рівня звуку, дБ А				
60	18	17	13	9	7	
80	17	16	13	10	7	
100	16	16	13	10	7	

6.4. Нові конструкції шумозахисних вікон [304]

У цьому зв'язку наша увага звернулася до вдосконалення конструкції вікон. Треба сказати, що колись у будівництві широко використовувалися вікна роздільної конструкції з окремими віконними коробками для зовнішнього і внутрішнього плетінь. Ці вікна забезпечували гарну теплоізоляцію і непогану звукоізоляцію приміщень. Наприкінці 50-х років, коли почалося масове панельне будівництво, було освоєне виробництво спарених вікон: залучила простота виготовлення, економічність, зручність експлуатації. В даний час у будівництві використовується до 95% спарених вікон.

Але при усіх вигодах шумозахисні властивості вікон, застосовуваних у масовому будівництві, виявилися на сьогоднішній день зовсім недостатніми. Так, наприклад, стандартне спарене вікно будівель, зведених у радянський період містобудування, (таке, що згвинчується), знижує рівень звуку дуже незначно. Тепер, коли нові будинки зводяться повсюдно, у тому числі в районах старої забудови, на магістралях, коли різко зросла кількість транспорту, виникла необхідність обладнати будинки вікнами з підвищеними звукоізоляційними властивостями.

Чи можна підвищити шумозахисні властивості вікон? Виявляється, так, можна. Конкретні рекомендації надані в

[304, 305].

Роботи зі створення нових конструкцій шумозахисних вікон входять в задачу акустиків. Так, в рамках наших досліджень [304, 305] нами було досліджений вплив конструктивних елементів вікон на звукоізоляцію. З урахуванням результатів цих досліджень розроблено нові віконні блоки з подвійним і потрійним склом з різними повітряним проміжкам між стеклами і різною товщиною стекол.

У ході акустичних досліджень з'ясувалося, наприклад, що при влаштуванні потрійного віконного блоку установка третього скла посередині між зовнішнім і внутрішнім практично не поліпшує шумозахисні властивості вікон через резонанс на деяких частотах; третє скло повинне бути максимально зміщене до внутрішнього. Дуже важливу роль грає також герметичність притворів і установлення стекол. Позитивний вплив робить і звукопоглинаюча обкладка по внутрішньому периметру віконної коробки. Дослідження показали безперспективність спарених вікон з погляду можливості підвищення звукоізоляції. Спарена конструкція являє собою коливальну систему, у якій зовнішнє і внутрішнє стекла зв'язані між собою шаром повітряної товщини, а також через плетіння - загальну віконну коробку, і з цієї причини її удосконалення не може питомо підвищити шумозахисний ефект.

Найбільш кращі результати показують конструкції зі збільшеним проміжком між зовнішнім ранковим плетіннями, більшою товщиною стекол, подвійним притвором коробки, подвійним чи потрійним рядом ущільнювальних прокладок. Повітряний проміжок між стеклами підвищений з 57 мм до 90 мм. Товщина стекол також збільшена — зовнішнє до 4 мм і внутрішнє до 6 мм. Вікна такої конструкції знижують рівень шуму на 30 дБА:

цілком достатньо, щоб забезпечити норму в житлових кімнатах, що виходять на ці магістралі.

Широке поширення в останні роки одержали вікна, що мають рами із ПВХ) профілів (на основі полівінілхлориду) зі склопакетами, які можуть мати як одну, так і кілька камер. Якщо в дерев'яних вікон рама виконана з монолітної або склеєної деревини, то у вікнах із ПВХ профілів рама має багатокамерну конструкцію, що сприяє більше високої звукоізоляції. А оскільки площа ПВХ профілів становить порядку 20% вікна, з точки зору зменшення ними шуму це є позитивним.

Застосування склопакетів практично вирішило питання герметизації стекол у вікнах. Технологія їх виготовлення передбачає ретельну й, що важливо, надійну герметизацію скла у віконному блоці за допомогою профільних гумових або силіконових герметиків. Істотним конструктивним недоліком склопакетів, з погляду звукоізоляції, з'явилося зменшення відстані між стеклами, що підсилило в них резонансні явища, які знижують звукоізоляцію в певних областях частотного діапазону.

Створення шумозахисних вікон висунуло перед конструкторами іншу проблему — проблему вентиляції приміщень. Вентиляція за допомогою звичайної квартирки в даному випадку непридатна: зводиться на немає вся система звукоізоляції. Можна, звичайно, використовувати індивідуальні кондиціонери, але їхнє придбання й експлуатація — підходить далеко не всім (за економічними мотивами). До того ж самі кондиціонери служать джерелом шуму. Загальні системи кондиціонування також не позбавлені недоліків, тому що, крім їхньої високої вартості і складності експлуатації, повітропроводи необхідно розташувати в межах товщини стін житлових приміщень.

Нами розроблений спеціальний вентиляційний клапан-

глушитель для природного провітрювання приміщень. Він діє як кватирка, але значно послабляє шум, знижуючи його рівень на 25—35 дБА в залежності від моделі клапана. Вентиляційний клапан установлюється разом з віконним блоком і має досить компактні розміри. Розробка клапана-глушителя і використання його разом з новими вікнами дозволяють значною мірою вирішити проблему захисту приміщень від шуму.

Ці вікна знижують рівень шуму на 38—40 дБА і забезпечують сприятливий режим навіть на найбільш гучних магістралях. Застосування запропонованих конструкцій із (також розробленим у процесі авторських досліджень) звуковбирним матеріалом [306] дозволяє знизити шум у житлових приміщеннях до нормативних значень, обумовлених [12-18], забезпечити стан належного акустичного комфорту мешканців. Наші проектні пропозиції у вигляді оригінальних конструкцій, опис та ескізи яких наведені вище, з успіхом можуть бути застосовані в будівництві: в процесі побудови нових шумозахисних будинків, та, - (що найбільш важливо) – при реконструкції існуючого житлового фонду, оскільки потребують лише заміну застарілих, недосконалих віконних блоків, що відробили вже паспортний строк експлуатації, новими блоками у вигляді наших розробок.

ЧАСТИНА 7. БАГАТОРАЗОВІ ВІДБИТТЯ ЗВУКУ НА ЗОВНІШНІХ ТЕРИТОРІЯХ

7.1. Багаторазові відбиття звуку на вузьких вулицях міста та актуальність проблеми захисту житлових будівель від транспортного шуму

7.1.1. Постановка завдання. Міські квартали історичної забудови багатьох населених пунктів, (що були побудовані в дореволюційні, довоєнні роки), характеризуються такими ознаками [307]:

1. Розташування в центральній, найбільш респектабельній частині міста, велика історична цінність будинків (серед яких часто зустрічаються пам'ятники архітектури);

2. Багатоповерхова старовинна забудова (до 7 поверхів) 50-120-річної давності, з великою кількістю архітектурно-конструктивних елементів, що виступають поперед вертикальної площини фасадів наприклад, у вигляді чисельних балконів, декоративних елементів; (туди ж, в декілька меншому ступені, можна віднести ознаки сучасного життя - кондиціонери та ін.) [308];

3. Вузькі вулиці центральної частини міста, перенасичені транспортом;

4. Мала відстань між перехрестями проїзних частин (тобто між світлофорами, що регулюють дорожній рух);

5. Обмеженість або відсутність паркінгу автомобілів;

6. Велика вартість 1 м² житлової площі в будинках.

Прикладом таких місць є вулиці Пушкінська, Сумська, Римарська в м. Харкові та багато інших в різних містах України (див. фото). Автомобіль, показаний на фото, користуючись тимчасовою відсутністю іншого транспорту, намагається виконати розворот, однак надто мала ширина проїзної частини не дозволяє зробити йому це в один прийом.



Рис. 7.1. Стислі умови міської забудови в м. Харків. Фото зроблене з крайньої точки протилежного боку вулиці, від самого фасаду будинку, що розташований навпроти сфотографованих будівель. Таким чином, на фото представлена вся ширина вулиці Сумської (центральна вулиця в м. Харкові).



Рис. 7.2. Стислі умови міської забудови в м. Харків (інші вулиці).

З пункту 3 з вищевказаних випливає значна зашумованість таких "вузьких місць" в системі транспортних артерій сучасного міста за рахунок надвеликої кількості автомобілів, трамваїв та ін., що рухаються із малими швидкостями (згідно п.4 та п.5), та часто утворюють затори, тобто "пробки". Ситуацію ускладнюють пішоходи в великій кількості (на проїзній частині), що заважають вільному проїзду транспорту. Як відомо, при русі на найнижчих передачах, з великою кількістю зупинок, стоянці із невимкненим двигуном в заторі транспортні засоби випромінюють шум із найбільшими рівнями. Таким чином, ті вулиці - найбільш зашумовані. Це стверджується як даними натурних вимірювань, так і безпосереднім життєвим досвідом будь-якого міського мешканця. Потребується якимось чином зменшити шум до нормативних значень [309].

7.1.2. Пошук шляхів розв'язання проблеми. Тенденція збільшення кількості джерел шуму в таких зонах міста безупинна. Організаційні заходи боротьби із шумом тому ми не розглядаємо: (хоча зараз в містах із вузькими центральними вуличками активно влаштовують односторонній рух транспорту, різні обмеження, і т.п.) Архітектурно-планувальні заходи - також не підлягають реалізації. На вулиці із відстанню 10-15 м між "червоними лініями" забудови на протилежних її боках неможливо встановити якісь акустичні екрани, влаштувати шумозахисні зелені насадження тощо. Будинки неможливо "перемістити" вглиб їхніх дворів, розширивши відстань між ними, та ін. Вони до того ж не підлягають зносу, і розраховувати на перебудову центральних кварталів міста з дотриманням сучасних вимог до акустичного комфорту не передбачається можливим.

Мешканці таких будинків знають тільки один спосіб шумозахисту - а саме заміну старих вікон вікнами нової

конструкції з підвищеними акустичними властивостями. На такі вікна зараз є великий попит [304], див. також попередню главу.

Проте шумозахисні вікна зменшують шум в кожній конкретній квартирі, але ніяк не впливають на зовнішній, вуличний шум. Як саме зменшити шум на самій вулиці?

Слід зазначити, що інтенсивність звуку від одних і тих же джерел в вільному звуковому полі має менші значення, аніж у просторі, що обмежений елементами, що мають властивість відбивати звукову енергію. Інтенсивність звуку збільшується за рахунок складання енергії відбитих складових (попередніх хвиль) з енергією прямих променів. Оскільки відбитий промінь неодноразово перевідбивається, доки не загасне, а його енергія складається як із енергією нового прямого променя, так із енергією багатьох попередніх відбитих, слід говорити про "чисельні відбиті складові" (в несединному числі). Образно мовлячи, звук лунає в вузькому вуличному коридорі, обмеженому тротуарами, мостовою та фасадами будинків, маючи з нього вихід тільки наверх, до неба; та частково зменшується за рахунок пропущення через стіни та отвори (двері, вікна) будинків. В залежності від відстані між протилежними фасадами, збільшення рівнів звуку в такому просторі, за даними вимірів, досягає 3-10 дБА, - тобто, з врахуванням логарифмічних залежностей, звукова енергія збільшується більше, аніж в 2 рази!

7.1.3. Розгляд ходу звукових променів в стислих умовах міської забудови. Розглянемо відбиття звуку в тісному міжфасадному просторі. Задля зручності при тому зробимо деякі спрощення.

В якості джерела шуму приймаємо вуличний транспорт; тому в якості геометричної точки, звідки здійснюється випромінювання, прийmemo вісь однієї з смуг проїзної частини вулиці. На відстані R_1 та R_n розташовуються

фасади будинків, що обмежують простір розповсюдження шуму. Задля спрощення приймаємо їхню поверхню гладкою (без балконів, лоджій та ін. - про врахування цієї особливості див. далі). Будинки мають кінцеву висоту, ДШ випромінює шум в простір. В поперечному перерізі діаграма спрямованості передбачає випромінювання звуку з кутом $0 < \theta < 360^\circ$. Ми розіб'ємо отой кут на дві частини згідно з рис. 7.3, у верхню півкулю $0 < \theta < +180^\circ$ та у нижню півкулю $0 < \theta < -180^\circ$. Таке подання надає сумісність із чисельними літературними джерелами інших авторів, які говорять про випромінювання звуку в напівпростір, обмежений поверхнею ґрунту (розповсюдження звуку вглиб якого нікого не цікавить).

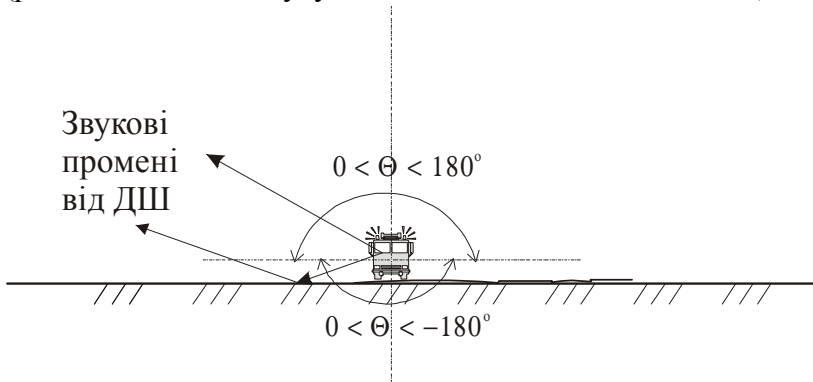


Рис. 7.3. Розрахункова схема розподілу кутів випромінювання звуку від транспортного джерела.

Можливі три випадки:

1. Звуковий промінь випромінюється від ДШ униз, у бік ґрунту ($0 < \theta < -180^\circ$); здійснює відбиття від його поверхні. Подалі можливі два випадки:

1а. Відбившись від поверхні ґрунту під визначеним кутом θ , він уходить вверх, у простір між будинками, і не відіграє суттєвої ролі в загальній картині зашумованості.

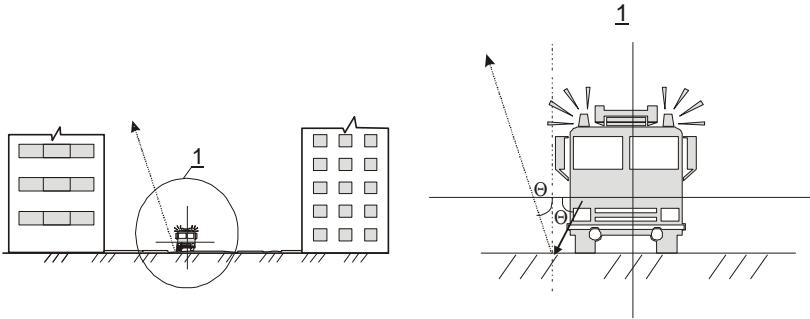


Рис. 7.4. Звуковий промінь після першого відбиття від поверхні ґрунту уходить над фасадами будинків до неба, не відіграючи суттєвої ролі в загальній зашумованості.

1.б. Відбившись від поверхні ґрунту під визначеним кутом θ , він спрямовується до фасаду ближнього будинку, здійснює від нього повторне відбиття, і т.д. При тому, повторно відбитий від поверхні ґрунту промінь відповідає вже умові $0 < \theta < +180^\circ$, тобто відноситься до випадку 2 або 3.

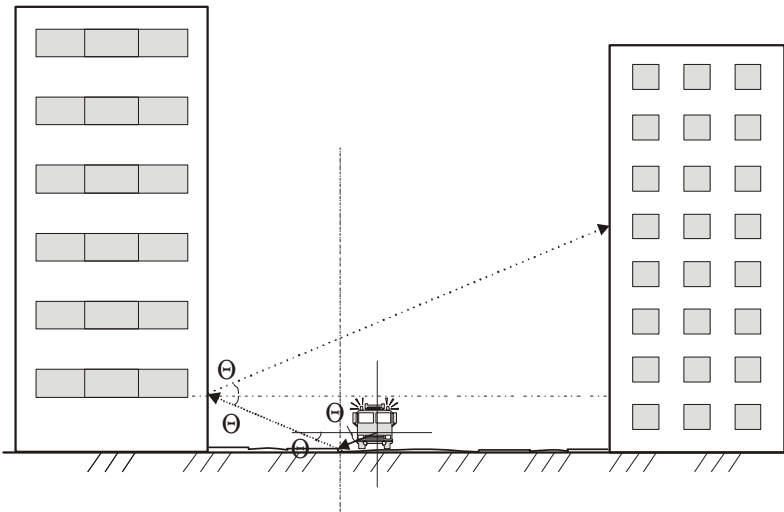


Рис. 7.5. Звуковий промінь після першого відбиття від поверхні ґрунту уходить до фасаду одного з будинків, де повторно відбивається

від їхніх поверхонь. Далі його хід аналогічний випадку 2.

Випадки 2 та 3 відповідають умові $0 < \theta < +180^\circ$.

2. Звуковий промінь випромінюється від ДШ убік, у бік фасаду будинку; здійснює відбиття від його поверхні. Далі можлива велика кількість випадків в залежності від кількості разів відбиття.

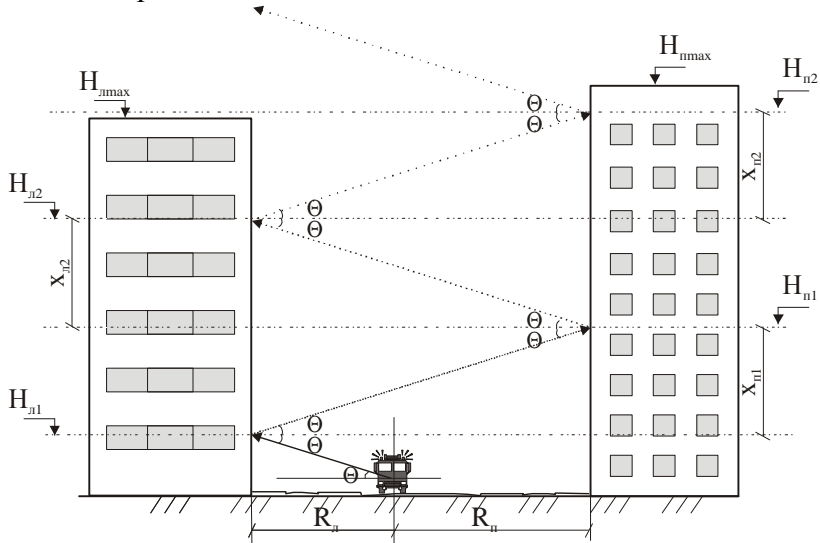


Рис. 7.6. Звуковий промінь після першого відбиття від фасаду одного з будинків повторно відбивається від фасаду іншого, і т.д. Мова йде саме про **багаторазові** відбиття.

3. Звуковий промінь випромінюється від ДШ уверх, у бік неба. Він не відіграє суттєвої ролі в загальній картині зашумованості.

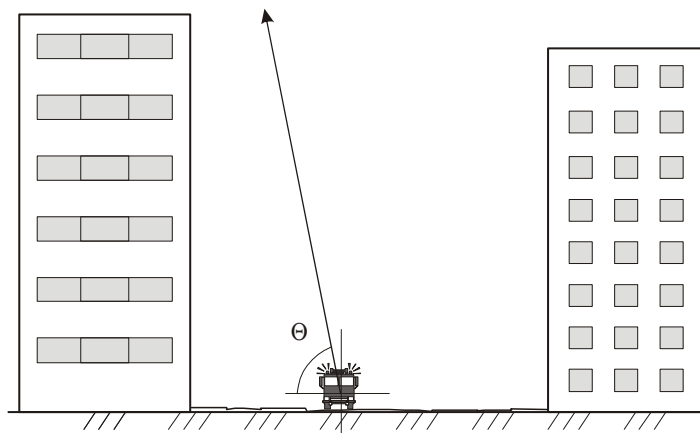


Рис. 7.7. Звуковий промінь випромінюваний під таким (надвеликим) кутом θ , що він уходить догори, у простір між будинками, та не відіграє суттєвої ролі в шумованості.

7.2. Методика розрахунку багаторазових відбиттів від акустичного екрану із змінним нахилом

7.2.1. *Розгляд багаторазових відбиттів від ДШ, що розташовано в вузькому коридорі між акустичним екраном та іншою перешкодою.* Розглянемо випадок 2 як найбільш поширений з інших випадків та найбільш важливий з точки зору шумованості. Точки відбиття звукових променів від фасадів одного з будинків позначимо індексом $л$ - (лівий); іншого - індексом $п$ - (правий). На додаток в такі індекси також введемо цифрове позначення кожного відбиття: наприклад $л_2$ - друге відбиття від фасаду лівого будинку; $п_1$ - перше відбиття від фасаду правого, і т.п. Також задля спрощення можна прийняти розташування ДШ безпосередньо на поверхні ґрунту: (це, звісно, не так, тому що двигуни машин розміщуються, зрозуміло, не на самій поверхні проїзної частини, а на деякій висоті над нею. Але, по-перше, при розгляданні в геометричних масштабах міської вулиці із її багатоповерховою забудовою точка ДШ вдало

апроксимується розташуванням безпосередньо на поверхні ґрунту; по-друге відстань між цією поверхнею та дійсним місцем розташуванням дуже мала, легко піддається обчисленню, і завжди може бути подалі введена в розрахунок як незначна додаткова корекція: величини $H_{лп}$ та $H_{пп}$ вже враховують розташування ДШ на деякій висоті над поверхнею ґрунту).

ДШ розташоване на відстані $R_л$, м від лівого будинку (що має максимальну висоту $H_{лmax}$) та на відстані $R_п$, м від правого будинку (що має максимальну висоту $H_{пmax}$).

Точка першого відбиття звукового променя, що вийшов з ДШ під кутом θ , на фасаді одного з будинків буде розташована на висоті $H_{л1}$. При тому (тут і далі див. рис. 7.6):

$$\operatorname{tg} \theta = H_{л1} / R_л. \quad (7.1)$$

Звуковий промінь падає на фасад, та відбивається від фасаду того будинку під тим же самим кутом θ . (Кут падіння дорівнює θ – це легко довести з геометричної подібності трикутників; кут відбиття згідно закону відбиття дорівнює куту падіння.)

Завжди можливо визначити висоту $H_{л1}$ першого відбиття від стіни одного з будинків (в даному випадку - лівого):

$$H_{л1} = R_л \operatorname{tg} \theta. \quad (7.2)$$

Слід зазначити, що при умові $H_{лmax} < H_{л1}$ відбиття не відбувається.

Висота першого відбиття того ж променя від іншого будинку (в даному випадку - правого) дорівнює сумі висот первісного відбиття $H_{л1}$ та деякої невідомої величини $x_{п1}$.

$$H_{п1} = H_{л1} + x_{п1}.$$

$x_{п1}$ являє собою катет більш великого трикутника,

розташований напроти куту (відбиття) θ . Інший катет - це сума відстаней $(R_{л}+R_{п})$, тобто відстань між фасадами будинків.

$$x_{п1} = (R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta$$

$$H_{п1} = R_{л}\text{tg}\theta + (R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta = (2R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta. \quad (7.3)$$

При умові $H_{п\text{max}} < H_{п1}$ відбиття не відбувається.

Висота другого відбиття від фасаду лівого будинку дорівнює сумі висот попереднього відбиття $H_{п1}$ та деякої невідомої величини $x_{л2}$.

$$H_{л2} = H_{п1} + x_{л2}.$$

$x_{л2}$ являє собою катет більш великого трикутника, розташований напроти куту (відбиття) θ . Інший катет - це сума відстаней $(R_{л}+R_{п})$, тобто відстань між фасадами будинків. Можна побачити, що обидва трикутники, і цей, і попередній, повністю конгруентні.

$$x_{л2} = x_{п1} = (R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta$$

$$H_{л2} = (R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta + (2R_{л}+R_{п})\text{tg}\theta = (3R_{л}+2R_{п})\text{tg}\theta. \quad (7.4)$$

При умові $H_{л\text{max}} < H_{л2}$ відбиття не відбувається.

За аналогією при умові $H_{п\text{max}} > H_{л2}$:

$$H_{п2} = x_{п2} + H_{л2} = (4R_{л}+3R_{п})\text{tg}\theta; \quad (7.5)$$

при умові $H_{л\text{max}} > H_{л3}$:

$$H_{л3} = (5R_{л}+4R_{п})\text{tg}\theta; \quad (7.6)$$

і т.д. За аналогією, якщо розглядати відбиття не від лівого, а від правого будинку, можуть бути виведені абсолютно адекватні формули, в яких (враховуючи дзеркальну симетрію геометричної побудови), просто замінюються відповідні індекси...

На якомусь етапі багаторазове відбиття зупиняється. Це станеться, коли висота однієї з точок відбиття перебільшить висоту однієї з будівель. Звуковому променю не від чого більш відбиватися, і він уходить в простір (до неба). Тому при описі кожного відбиття ми надаємо граничні умови його відбування.

7.2.2. Формула перевідбиттів в залежності від вищевказаних параметрів.

В загальному вигляді формула перевідбиттів буде мати вигляд:

$$\begin{cases} H_{\text{лпл}} = ((2+n_{\text{л}})R_{\text{л}} + (1+n_{\text{п}})R_{\text{п}}) \operatorname{tg} \theta \text{ при } H_{\text{лmax}} > H_{\text{лпл}}; \\ H_{\text{ппп}} = ((2+n_{\text{п}})R_{\text{л}} + (1+n_{\text{п}})R_{\text{п}}) \operatorname{tg} \theta \text{ при } H_{\text{ппmax}} > H_{\text{ппп}}; \\ n_{\text{л}} = n_{\text{п}} - 1. \end{cases} \quad (7.7)$$

де n - число відбиттів, відповідно для лівого $n_{\text{л}}$ та $n_{\text{п}}$ правого будинків. Коли йдеться про "мінус" в останньому рядку, то він, проміж іншого, обмежує саме перше відбиття, приводячи його до вищенаведеної формули щодо визначення $H_{\text{л1}}$.

В багатьох випадках можна вважати індекси л та п умовними, замінити їх іншими позначеннями, (наприклад, застосувати 1 замість л та 2 замість п), тобто замінити при складанні математичної моделі правий будинок на лівий, та навпаки. Перетворюючи формули, одержимо залежність для визначення куту відбиття:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \theta = \frac{H_{\text{лпл}}}{(2+n_{\text{л}})R_{\text{л}} + (1+n_{\text{п}})R_{\text{п}}} \text{ при } H_{\text{лmax}} > H_{\text{лпл}}; \\ \operatorname{tg} \theta = \frac{H_{\text{ппп}}}{(2+n_{\text{п}})R_{\text{л}} + (1+n_{\text{п}})R_{\text{п}}} \text{ при } H_{\text{ппmax}} > H_{\text{ппп}}; \\ n_{\text{л}} = n_{\text{п}} - 1. \end{cases} \quad (7.8)$$

Величини $H_{\text{лпл}}$ та $H_{\text{ппп}}$ позначені так тому, що мається на увазі висота $H_{\text{л}}$ при відбитті за № $n_{\text{л}}$; висота $H_{\text{п}}$ при відбитті за № $n_{\text{п}}$; (скорочений вигляд $H_{\text{лп}}$ або $H_{\text{пп}}$ був би не

коректний, оскільки тоді неясно, яке саме відбиття мається на увазі).

Оскільки в конкретній містобудівельній ситуації величини висоти двох будинків $H_{лmax}$ та $H_{пmax}$, що обмежують простір задля розповсюдження звуку, прекрасно відомі; відомі і відстані від ДШ до кожного з них $R_л$ та $R_п$, існує можливість визначити кут відбиття (розрахувати тангенс куту відбиття) на різних висотах $H_л$ та $H_п$ з такої умови, щоб не виконувалися умови $H_{лmax} > H_{лпл}$ чи $H_{пmax} > H_{ппп}$; тобто $H_{лmax} < H_{лпл}$ чи $H_{пmax} < H_{ппп}$.

7.2.3. А якщо поверхні, що відбивають звук, не вертикальні, а мають нахил? Фактично це означає наступне. Якщо ми виконаємо поверхні, що відбивають звук, не вертикальними, а під нахилом, то звук після першого ж відбиття буде уходити в небо. В наших попередніх розрахунках, досліджуючи багаторазові перевідбиття, ми враховували єдине значення куту відбиття θ для кожного з n -ої кількості відбиттів, що відповідає вертикальним поверхням фасадів будинків. Але значення куту відбиття на кожній висоті H може бути змінено. Ось як про це розповідається в нашій попередній роботі [40, с. - 127]: *«Одним из путей снижения шума в таких градостроительных ситуациях может быть устройство инвентарных отдельных элементов (фрагментов), закрепляемых на фасаде здания (например, ограждение и остекление лоджий и балконов), под углом $\angle \alpha$ к вертикали. Величина угла $\angle \alpha$ определяется такой, чтобы попавшая на наклонный элемент фасада звуковая энергия от источника шума, согласно лучевой теории звука, отразившись, вышла из межфасадного пространства вверх - мимо противоположного здания.*

Таким образом, звуковая энергия, поступающая от источника шума, попадая на наклонную плоскость элемента фасада и, отражаясь от нее, попадает не на

фасад протиположного здания, а рассеивается частично в межфасадном пространстве, а частично - над фасадом протиположного здания...»

Важливою відмінною рисою цієї роботи від [40] є **чисельне визначення** величини куту нахилу поверхні, що відбиває звук, що в [40] згідно з прийнятою там індексацією названо $\angle \alpha$.

7.2.4. Самокритика наших пропозицій. Таким чином, ми прийшли до ідеї проектування міських будівель не з вертикальними стінами, а стінами з нахилом. Прикладом такої споруди є, наприклад, прекрасно відома піраміда Хеопса в Єгипті. Існують будинки такої форми (у т.ч. - житлові) сучасного періоду побудови, але... Зрозуміло, міста із історичним чином складеною забудовою перебудовувати вже ніхто не стане. З нами погодяться, визнають чинність наших геометричних побудов, - проте...

Але це все, вищевикладене, - саме половина справи; інша половина - викладена нижче, в наступній главі.

7.2.5. Відповідь на самокритику

В [40] нами запропоновано "видаляти" звуковий промінь, спрямовуючи його до неба над протилежно стоячим будинком після першого ж відбиття. Розрахунок за винайденими нами формулами показує, що кут нахилу поверхні, що відбиває звук, в такому разі є дуже великим, та ускладнює побудову споруди (фактично перетворюючи її в піраміду). Винайдені формули дозволяють розрахувати кут відбиття в залежності від числа відбиттів n , і таке число не обов'язково повинне дорівнювати одиниці? Головна мета при тому - як можна зменшити його, але (особливо - на нижчих висотах) ми можемо підібрати якийсь оптимальний компроміс - невеличке число відбиттів та незначний нахил поверхонь, що відбивають звук. Таким чином, не треба вже будувати на вулиці нову "піраміду Хеопса", можливо влаштувати, (навіть на фасаді

будинку, що вже давно існує, наприклад, за рахунок оптимального розташування начіпних акустичних екранів), поверхні, що відбивають звук, з невеликим нахилом. Кут нахилу таких поверхонь може (і навіть - повинен!) бути неоднаковим по висоті, в кожній розрахунковій точці він може бути розрахований за винайденими нами залежностями.

Розроблена теорія розрахунку кутів нахилу поверхонь, що відбивають звук, з врахуванням багаторазових відбиттів лише в даному контексті для більшої наочності була подана на прикладі вузької міської вулиці із двома будинками та ДШ (у вигляді міського транспорту) на проїзній частині між ними. Це - лише частковий випадок застосування теорії. Фактично мова йде про **створення нової методики розрахунку акустичних екранів**, що використовує змінний (за всією його висотою) нахил екрану для відбиття звукових хвиль, та враховує якісь споруди та інші перешкоди на шляху звукових хвиль, встановлені навпроти акустичного екрану; дозволяє, на відміну від інших методик розрахунку, розрахувати при тому такий важливий (та часто невраховуваний) параметр, як кількість багаторазових відбиттів; а відстані між ДШ та екраном, а також між ДШ та протилежно стоячою перешкодою (що, звісно, ніколи не дорівнюють одне одного, тобто ДШ ніколи не знаходиться точно посеред ними), підлягають чисельному врахуванню!

Тому ще раз переписуємо наші формули:

$tg\theta = var$, (що означає, що мова йдеться про акустичний екран із змінним за висотою кутом нахилу);

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg}\theta = \frac{H_{\text{эпэ}}}{(2+n_{\text{э}})R_{\text{э}} + (1+n_{\text{э}})R_{\text{п}}} \quad \text{при } H_{\text{эмакс}} > H_{\text{эпэ}}; \\ \operatorname{tg}\theta = \frac{H_{\text{ппп}}}{(2+n_{\text{п}})R_{\text{э}} + (1+n_{\text{п}})R_{\text{п}}} \quad \text{при } H_{\text{ппмакс}} > H_{\text{ппп}}; \\ n_{\text{э}} = n_{\text{п}} - 1 \end{array} \right. \quad (7.9)$$

де індекс э означатиме належність до параметрів акустичного екрану (висота екрану $H_{\text{э}}$; кількість відбиттів звуку від екрану $n_{\text{э}}$); індекс п - до параметрів перешкоди (висота протилежно стоячої перешкоди $H_{\text{п}}$; кількість відбиттів звуку від перешкоди $n_{\text{п}}$), що протистоїть екранові на відстані $R_{\text{э}}+R_{\text{п}}$ від нього, - де $R_{\text{э}}$, $R_{\text{п}}$ відповідно, відстані від ДШ до екрану та від ДШ до перешкоди.

7.3. Хіба звук відбивають тільки вертикальні поверхні?

7.3.1. *Знову до вихідних умов.* Але відкинемо досі всі попередні міркування, і знову повернемося до проблеми, поставленій в самій первісній в даній частині глави. Звук розповсюджується в тісному коридорі між фасадами протилежно стоячих будинків від джерел транспортного шуму, - і неможливо, наприклад, реалізувати вищевикладені пропозиції відносно виконання поверхонь, що відбивають звук, із нахилом. Така перебудова – значна; навіть на те, щоб встановити на поверхнях фасадів начіпні екрани, ніхто не погоджується.

Сама простіша (за міркуванням) ідея зменшення як прямого звуку, так і перевідбиття складається в облицюванні вертикальних площин фасадів (тобто стін будинків) звукопоглинаючими матеріалами. Ідея стає найскладнішою за рахунок принципової неможливості змінити архітектурний образ даної вулиці, що складався десятиріччями. Прозорі звукопоглиначі ще не винайдені; а

облицювати звичайними звукопоглиначами фасад якогось пам'ятника архітектури ніхто не дозволить з-за порушення в такому разі його зовнішнього вигляду.

7.3.2. Вирішення поставленого завдання. А якщо розташувати звукопоглиначі не вертикально, а горизонтально?

Дослідження реверберації в шумних вузьких вуличних "коридорах" показують, що значна частина шуму перевідбивається не від вертикальних, а від горизонтальних площин фасадів будинків - наприклад, від нижніх поверхонь балконних плит (див. рис. 7.8). Більш того, в залежності від взаємного розташування джерела (вуличного транспорту) та балконів в будинках, що обмежують вуличний простір, можливі умови, коли ця "значна частина" становиться саме головною частиною відбитого шуму [311].

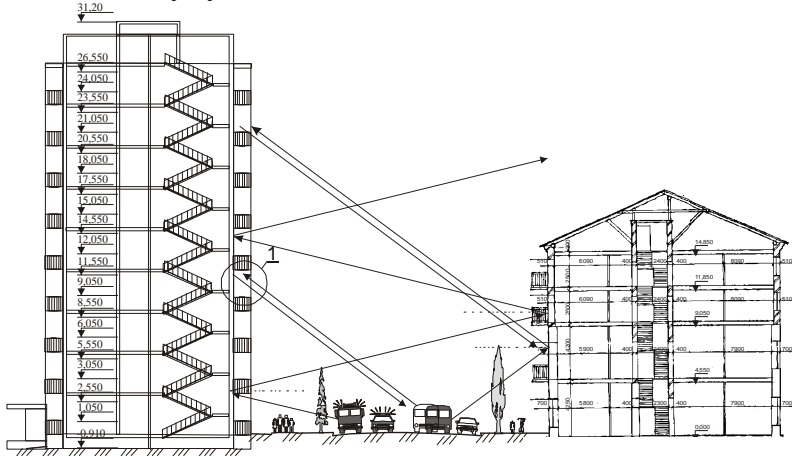


Рис. 7.8. Джерела шуму на міській вулиці. Стрілками позначені деякі шляхи розповсюдження звукових коливань в тісному міжфасадному просторі.

Внутрішній балконний простір тому слід розглядати як деяку "кишеню" для звуку, де він концентрується, та

виконує внутрішнє балконне перевідбиття.

1-1 (вузол 1) Балкон житлового будинку в перерізі

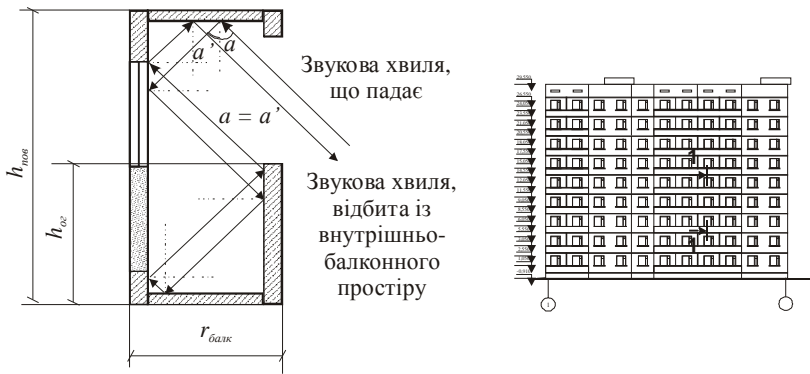


Рис. 7.9. Балкон на фасаді будинку в поперечному розрізі (вузол 1 з попереднього рис.); шлях звукових промінів всередині обмеженого його огороною простору; та перевідбиття звукових хвиль у цьому внутрішньому просторі. Геометрична побудова: кут падіння α згідно з законом відбиття завжди дорівнює куту відбиття α' .

З цієї схеми явно впливає - будь-який балкон є зоною значної інтерференції звуку. Тому саме їх: (тобто балкони, лоджії), – а не стіни, – задля зменшення негативної дії шуму та його розповсюдження, слід облицювати звукопоглинаючими матеріалами.

7.3.3. Технічна реалізація наших пропозицій.

В роботі запропоновано в якості інвентарного засобу захисту від шуму, що генеруються транспортними й ін. джерелами вуличного шуму, використати облицювання саме горизонтальних поверхонь фасадів звукопоглинаючими матеріалами (або, як про це докладніше вказано в [310], застосувати звукопоглинаючі панелі (наприклад, такі, як описані в [152], або інших, загальноприйнятих конструкцій).

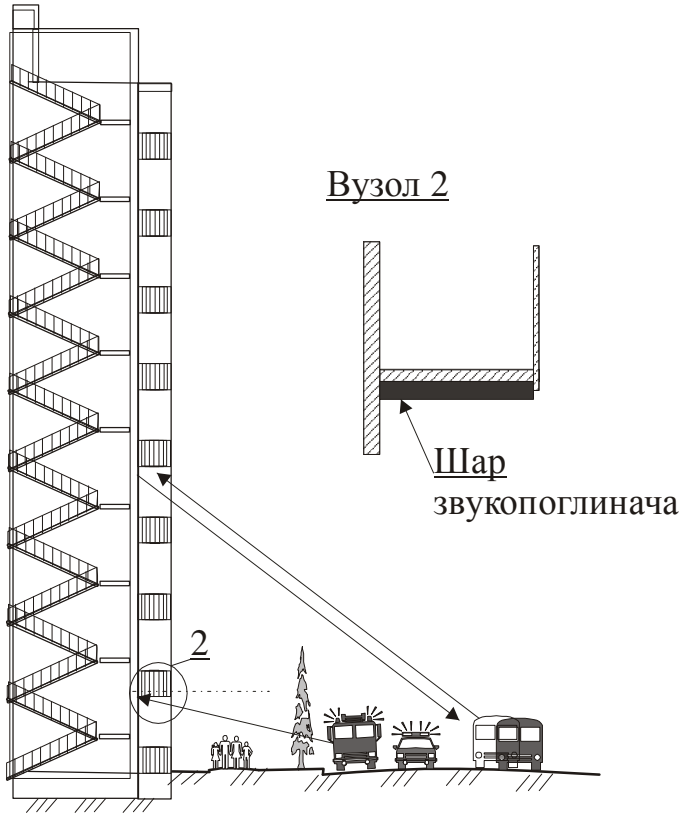


Рис. 7.10. Схема влаштування звукопоглинального облицювання за нашою пропозицією.

Звукова енергія, що поступає від джерел шуму, попадаючи на нижню поверхню балконних плит (плит лоджій, нижні поверхні кондиціонерів, підвіконники тощо, та усі ін. горизонтальні елементи, що виступають на деякій висоті над зашумованим простором), не відбивається від неї, - а, залежно від величини коефіцієнта звукопоглинання застосованого матеріалу, в тому чи іншому ступеню поглинається в шарі звукопоглинача, переходячи в теплову енергію.

Пропонований спосіб захисту від шуму реалізують

таким чином: нижню площину видимої частини плити балкону облицьовують шаром звукопоглинального матеріалу, закріплюючи його на плиті монтажними елементами, або закріплюючи клейовим розчином.

При цьому звукова енергія, що поступає від ДШ {транспортного потоку), потрапляючи на нижню площину плити балконів, не відбивається від неї на фасад і вікна будівлі, а поглинається шаром звукопоглинального матеріалу, переходячи в теплову.

7.3.4. Розгляд процесів відбиття звуку від горизонтальних поверхонь. На ділянку фасаду житлової будівлі, займану балконом, потрапляє звукова енергія від джерела шуму (транспортного потоку), частина якої, умовно позначена як $E_{огородж}$, відбивається від його огороження вгору під кутом, що лежить в межах кутів $\angle \theta \div \angle \beta$ до горизонту, частково випробуючи дифракцію за нього. Тут ми також застосуємо θ для позначення куту відбиття від фасаду будинку. Але це вже в нас – не деяка ідеалізована модель, що описана в попередній главі; фасад в нас вже не гладкий: ми маємо справу із увігнутостями на його поверхні. Тому додатково до нього надаємо позначення ще двох кутів відбиття β , та ϕ , від інших елементів фасаду, аніж його вертикальна поверхня; а також кут γ , що характеризує той самий кут відбиття, що і θ – але вже на рівні наступного поверху.

При типових значеннях висоти поверху будинку та висоти огороження його балконів площа передньої поверхні огороження балкону складає 43%. Отже, таким чином відбивається $E_{огородж} \approx 40\%$ звукової енергії.

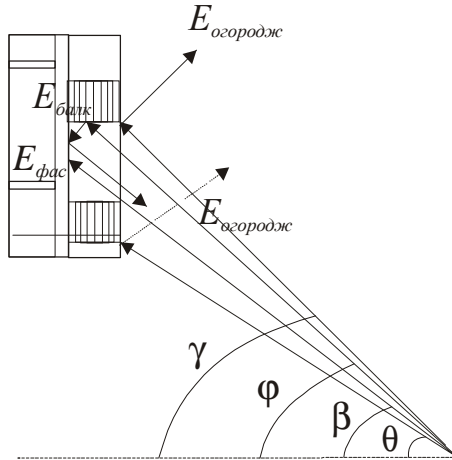


Рис. 7.11. Розподілення загальної енергії звукової хвилі на три її складові при попаданні на балкон одного з поверхів. Для наочності величина $E_{огородж}$ взята два рази: як та $E_{огородж}$, що відноситься безпосередньо к даному балкону, так і $E_{огородж}$ для балкону наступного поверху.

Частина звукової енергії, що залишилася ($\approx 60\%$), падає прямо у внутрішній балконний простір, а саме $E_{фас}$ - на фасад (віконні та дверні отвори) і $E_{балк}$ - на нижню площину видимої частини плити вищестоящего балкону, та розподіляється між собою у співвідношенні, рівному відношенню кутів, відповідно

$$\frac{E_{фас}}{E_{балк}} = \frac{\angle\phi - \angle\beta}{\angle\gamma - \angle\phi}$$

де $E_{фас}$ - частина звукової енергії, що потрапляє прямо на фасад будівлі, Дж; $E_{балк}$ - частина звукової енергії, що потрапляє на нижню площину плити лоджії, Дж;

$\angle\theta$ - кут нахилу до горизонту променя, що виходить з центра джерела шуму в точку, яка належить нижньому ребру огороження балкону у вертикальній площині, град;

$$\text{tg } \angle\alpha = \frac{H}{R};$$

$\angle\beta$ - кут нахилу до горизонту променя, що виходить з центра джерела шуму в точку, яка належить верхньому ребру огородження балкону, град;

$$\operatorname{tg} \angle\beta = \frac{H + h_{oz}}{R};$$

$\angle\phi$ - кут нахилу до горизонту променя, що виходить з центра джерела шуму в точку, яка належить ребру приєднування балкону до фасаду будівлі, град;

$$\operatorname{tg} \angle\phi = \frac{H + h_{пов}}{R + r_{балк}};$$

$\angle\gamma$ - кут нахилу до горизонту променя, що виходить з центра джерела шуму в точку, яка належить наступному ребру приєднування огородження вищестоящого балкону до балконної плити, град.

$$\operatorname{tg} \angle\gamma = \frac{H + h_{пов}}{R};$$

$h_{пов}$ - висота поверху, м; h_{oz} - висота огородження балкону, м; $r_{балк}$ - глибина балкону, м (тобто один з його габаритних розмірів); H - позначка поверху будинку, м (тобто висота розташування балконної плити над рівнем ґрунту). Змінна H визначає розташування розрахункової точки на тій або іншій висоті східчастим чином, в залежності від числа поверхів будинку (та висоти кожного поверху); R - відстань від джерела шуму до (крайньої точки) фасаду будівлі в плані, м. Оскільки ми розглядаємо відбиття тільки на одному фасаді, одного з будинків, індекси л та п ми тут не застосуємо. Але ж R - те ж саме, що R_l або R_p з викладок попередньої глави.

Наприклад, балкон багатоповерхового житлового будинку при висоті типового поверху $h_{пов} = 3,0$ м має $h_{oz} = 1,2$ м, при глибині балкону $r_{балк} = 1,2$ м. Змінні H зазначені на рис. 7.8 як позначки рівнів кожного поверху на перерізі будинку.

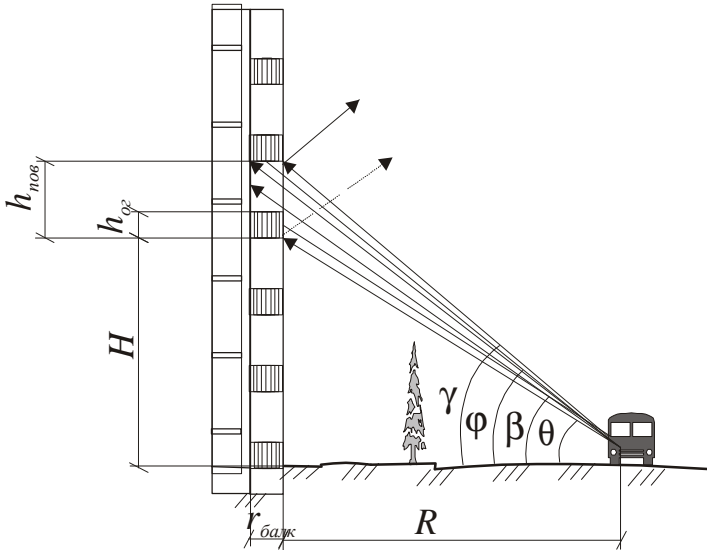


Рис. 7.12. Розрахункова схема щодо нашої пропозиції.

7.3.5. Ефект «етажерки» при відбитті. При збільшенні (змінної) величини H кути θ , β , γ , φ змінюються вбік збільшення. При цьому $\angle\beta$ збільшується швидше, ніж $\angle\varphi$, і при деяких визначених умовах вони стають рівними ($\angle\varphi = \angle\beta$). Фізичний зміст цього явища полягає в тому, що та частина звукової енергії ($\approx 60\%$), що не відбивається від огороження балкону, а відбивається саме від поверхонь внутрішнього балконного простору, падає тільки лише на нижню площину плити балкону, і, відбиваючись від неї, потрапляє на фасад будівлі, що захищається (віконні і дверні отвори), а також, згідно з рис. 7.8, відбивається назад у зовнішнє середовище. Таким чином, на деяких (відносно малих висотах) поверхнях внутрішнього балконного простору, що в найбільшому ступені відбивають звук, є як вертикальні поверхні фасадів (із балконними дверима, вікнами) та горизонтальна поверхня (нижня площина) плити вищестоячого балкону;

на інших, (більших) висотах поверхню, що відбиває, є тільки горизонтальна поверхня (нижня площина) плити вищестоящого балкону (рис. 7.13). Такий випадок є частковим випадком загальної схеми з рис. 7.12.

Умова $\angle\beta = \angle\phi$ здійснюється, коли:

$$\frac{H + h_{oz}}{R} = \frac{H + h_{нов}}{R + r_{балк}}$$

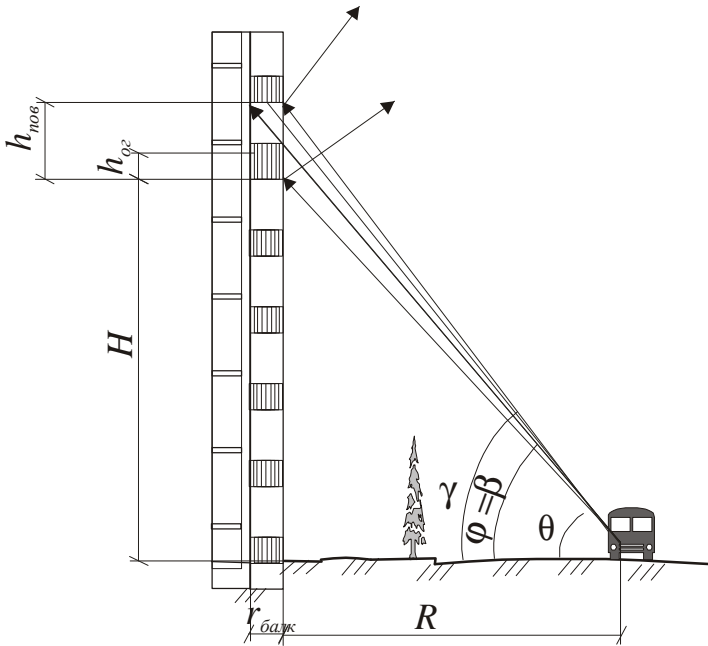


Рис. 7.13. На значній висоті над рівнем ґрунту та малій віддаленості джерела шуму від фасаду звук відбивається вже тільки саме від горизонтальних поверхонь (ефект «етажерки»)

Ми умовно назвали такий випадок відбиття звукових хвиль ефектом «етажерки»: вертикальні поверхні фасадів внутрішнього балконного простору перестають грати значимість при відбитті, а звук відбивається вже тільки саме від горизонтальних поверхонь. Побудова математичної моделі відбиття звукових хвиль від фасаду

будинку потребує обов'язкового його врахування: тому що при визначених значеннях H та R в акустичних розрахунках слід враховувати частину звукової енергії $E_{\text{фас}}$, що потрапляє прямо на фасад будівлі; а при інших значеннях H та R – не слід. Неможливо безпосередньо визначити якусь аналітичну формулу, тому підбір співвідношення H та R при побудові математичної моделі можна здійснити шляхом ітерації. Для дослідження ефекту «етажерки» при відбитті нами була створена спеціальна комп'ютерна програма.

Всі без винятку величини, що входять в (формулу «етажерки»):

$$\frac{H + h_{\text{ог}}}{R} \geq \frac{H + h_{\text{нос}}}{R + r_{\text{балк}}},$$

є варіативними параметрами. Це ускладнює побудову математичної моделі. Але для кожного будинку, виходячи з його архітектурних креслень, можна чітко визначити величини висоти поверху $h_{\text{нос}}$, висоти огороження балкону $h_{\text{ог}}$, та глибини балкону $r_{\text{балк}}$. Ці величини беруться безпосередньо з креслень (або даних обмірювальних робіт) і можуть, звісно, варіюватися, - але в значно меншому ступені (наприклад, якщо в одному тому ж будинку різна висота різних поверхів; балкони із різними геометричними параметрами – глибиною та висотою огороження). Створена нами комп'ютерна програма дозволяє змінювати такі вихідні дані для всіх випадків.

Основна роль створеної програми, однак, полягає в тому, щоб обчислити співвідношення величин H та R , - тобто висоти розташування розрахункової точки над поверхнею ґрунту та її (горизонтальній) відстані від джерела шуму (в площині поверхні ґрунту). Програма дозволяє вводити варіативні дані в комірки, обведені рамкою. Найголовнішу роль при цьому відіграє введення величин H та R , тобто величин, що характеризують

розташування розрахункової точки в просторі (при побудові карти шуму кількість таких розрахункових точок вимірюється тисячами, і, звісно, в деяких випадках в залежності від геометрії розташування ефект «етажерки» треба враховувати, в деяких - ні). Програма видає кінцевий результат розрахунку у двох видах: чисельний, тобто обчислені значення тангенсів кутів β і φ ; та логічний – саме результат її порівняння. Якщо $\beta < \varphi$, тобто ефект «етажерки» при даних геометричних параметрах не має місця, і в акустичних розрахунках потребується враховувати як $E_{фас}$, так і $E_{балк}$, програма відображає результат «ИСТИНА»;

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Програма для обчислення ефекту 'етажерки'.xls". The spreadsheet contains the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ПРОГРАМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПІВВІДНОШЕНЬ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВНУТРІШНЄ БАЛКОННЕ ВІДБИТТЯ, ШЛЯХОМ ІТЕРАЦІЇ									
2										
3	Формула:	$\angle \beta$	\leq	$\angle \varphi$	Досліджуються умови перевищення куту β над кутом φ					
4										
5	Формула:	$\frac{H + h_{балк}}{R}$	\leq	$\frac{H + h_{фас}}{R + r_{фас}}$						
6										
7										
8		$h_{балк} =$	1,2 м		$h_{фас} =$	3 м		$h_{балк} =$	1,2 м	
9										
10										
11	Формула (із подстановкою	$\frac{H+1,2}{R}$	\leq	$\frac{H+3}{R+1,2}$						
12	чисельних значень)									
13										
14	Змінні величини (варіативні дані вводяться в комірки, обведені рамкою)									
15		$H =$	17 м							
16		$R =$	13 м							
17										
18	Підстановка	18,2	\leq	20						
19	чисельних значень	13		14,2						
20										
21	результат розрахунку	1,4	$<$	1,406451						
22										
23	логічний результат	ИСТИНА								
24										
25										
26										

Рис. 7.14. Результати розрахунків за створеною нами програмою.

якщо ж $\beta > \varphi$, тобто вся звукова енергія відбивається тільки-но від горизонтальних площин $E_{балк}$, настає ефект «етажерки», і $E_{фас}$ не має місця, програма відображає результат «ЛОЖЬ».

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ПРОГРАМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПВІДНОШЕНЬ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВНУТРІШНЄ БАЛКОННЕ ВІДБИТТЯ, ШЛЯХОМ ІТЕРАЦІЇ									
2										
3	Формула:	$\angle \beta$	\leq	$\angle \varphi$	Досліджуються умови перевищення куту φ над кутом β					
4										
5	Формула:	$\frac{H + h_{\text{кор}}}{R}$	\leq	$\frac{H + h_{\text{кор}}}{R + r_{\text{визл}}}$						
6										
7										
8		$h_{\text{кор}} =$	1,2 м		$h_{\text{роз}} =$	3 м		$r_{\text{визл}} =$	1,2 м	
9										
10	Формула (із подстановкою	$\frac{H+1,2}{R}$	\leq	$\frac{H+3}{R+1,2}$						
11	чисельних значень)									
12										
13										
14	Змінні величини (варіативні дані вводяться в комірки, обведені рамкою)									
15		$H =$	20 м							
16		$R =$	13 м							
17										
18	Підстановка	21,2	\leq	23						
19	чисельних значень	13		14,2						
20										
21	результат розрахунку	1,630769	$<$	1,519718						
22										
23	логічний результат	ЛОЖЬ								
24										
25										

Рис. 7.15. Результати розрахунків за створеною нами програмою.

З рис. 7.14, 7.15 явно випливає, що для однієї й тієї ж розрахункової точки, що знаходиться на відстані 13 м від фасаду багатоповерхового будинку (вісь однієї з смуг дорожнього руху на проїзній частині), на висоті до 18,2 м над рівнем ґрунту (тобто приблизно до 6 поверху найближчого будинку), ефект «етажерки» не має місця; але з висоти 18,2 м (тобто вже на рівні сьомого поверху) в акустичних розрахунках обов'язково потрібно його враховувати.

7.3.6. Ефект від облицювання горизонтальних поверхонь. Таким чином, шар звукопоглинального матеріалу на плиті балкону або лоджії з коефіцієнтом поглинання $\alpha = 0,8$ здатний затримати в собі 48% всієї звукової енергії, що потрапляє на ділянку, займану лоджією, або

$$\Delta L = 10 \lg \frac{1}{0,48} \approx 3,0 \text{дБА}$$

де ΔL - величина зниження рівня звуку, що потрапляє на фасад (віконні, дверні отвори) будівлі, що захищається, за рахунок облицювання нижньої площини видимої частини плити лоджії шаром звукопоглинального матеріалу із загальним коефіцієнтом поглинання звуку, рівним $\alpha = 0,8$.

Слід зазначити, що найефективніше пропонується спосіб шумозахисту може бути застосований в умовах вузьких вулиць ($R \rightarrow \min$) і високих поверхів ($H \rightarrow \max$), а так само на будівлях з великою кількістю балконів та лоджій, особливо там, де вони є суцільним поясом по всій ширині фасаду.

7.3.7. Висновки. Облицювання нижніх горизонтальних поверхонь фасадів не порушує традиційний архітектурний образ будинку, не впливає суттєвим чином на погіршення його дизайну, і не може викликати суперечливих виразів та акцій протесту навіть у самих ревних охоронців давнини. На відміну від облицювання вертикальних поверхонь, істотно покращуються умови захисту звукопоглинання від атмосферної корозії: бо горизонтальні поверхні, про яких говориться, орієнтовані униз, тобто не випробують шкідливої та руйнівної дії дощу, снігу, вітру та ін. атмосферних явищ. В технічному плані облицювання великої кількості таких поверхонь: (наприклад, плити балконів, лоджій), - виконуються з нижчестоящого балкону або лоджії, що має штатне огороження - тобто не потребує великих зусиль та витрат ресурсів, технологічно нескладні (на відміну від облицювання вертикальних поверхонь фасадів, що вимагають встановлення риштувань, використання монтажних коликів та ін.), не пов'язане із небезпекою за фактором розташування робочого місця облицювальника на значній висоті. Дані

соціологічних опитувань свідчать, що володарі навіть найбільш багатокоштовних та цінних квартир, що розташовані в найбільш престижних районах міста, (особливо, коли їм пояснено про концентрацію звукової енергії внаслідок перевідбиття на їхньому власному балконі), дуже позитивно ставляться до ідеї зменшення там шуму на рахунок облицювання нижньої частини вищестоящої балконної плити (тобто - стелі їхнього власного балконного простору) звукопоглинаючим матеріалом, і, не чинячи перешкод, навпаки, самі особисто наполягають на тому!

7.3.8. *Додаткові відомості (випадок із життя)*

Один з мешканців, великий бізнесмен, навів додатково ще один неочікуваний, неврахований первісно мотив. Справа в тому, що він неодноразово проводив важливі конфіденційні ділові переговори по мобільному телефону під час тютюнопаління на власному балконі, (що розташований на висоті третього поверху, тобто достатньо далеко від рівня земної поверхні). Хід звукових променів в такому випадку показаний на рис. 7.16.

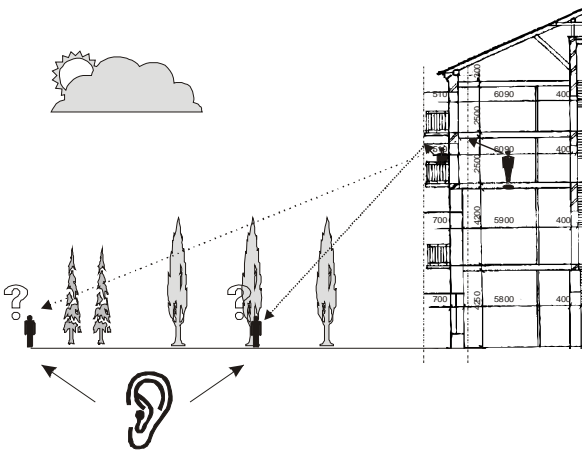


Рис. 7.16. Хід звукових променів з квартири на третьому поверсі через відбиття на стелі до вуличного простору.

Представники конкурентів, (що знаходилися, звісно, поза його квартирою), перебували внизу, на тротуарі - де здійснювали промисловий шпіонаж, просто ... підслуховуючи висловлення необачливого бізнес-діяча з його вищестоящего балкону, внаслідок чого він випробував збитки за рахунок розкриття комерційної таємниці...

Після того, як таємниця підслуховування була розкрита, бізнесмен не міг вжити ніяких заходів проти своїх конкурентів, тому що ніхто не може заборонити якійсь людині просто "прогулюватись" по тротуару загального користування під чийсь вікнами. Бізнесмен тільки перестав проводити важливі переговори під час паління на своєму балконі, обмеживши місце їх проведення кімнатою у тій же власній квартирі на третьому поверсі, (що мала двері для виходу на той балкон). Але підслуховування продовжилось! Слухачі тільки перемістилися в іншу, декілька віддалену точку спостереження на поверхні ґрунту, (але приблизно в тому ж самому місці міської території під балконом)

Виявилося, що в літню пору, коли двері, що ведуть на балкон, були відчинені, звук з кімнати, відбиваючись від стелі кімнати, випурхував у зовнішній простір, і був прекрасно чутний небажаним слухачам внизу. Однак облицювання звукопоглинаючим матеріалом стелі балкону мало справжній ефект: звуки загасали, і не відбивалися.

7.3.9. Самокритика і відповідь на неї. Отже, ідея про облицювання горизонтальних поверхонь фасадів, а саме – нижніх поверхонь балконних плит є простим і дійсним способом значного зниження шуму на міських вулицях в тісному між фасадному просторі, що не потребує великих витрат, і не вимагає істотних втручань в архітектурний проект будь-якої будівлі.

Єдиний мотив, що тільки й може бути висунутий проти

ідеї облицювання, полягає в тому, що володарі багатьох квартир вкривають склом власні балкони, тобто в таких місцях поверхні, що відбивають звук, є вертикальними (і виконані із віконного скла). Але Державні будівельні норми України не передбачають покриття склом балконів (тобто їх переробку в еркери тощо), - що, якщо здійснюється на практиці, - виконується за рахунок непередбаченої **будь-яким** проектом перебудови, цілком самовільно.

Частина 8. Конструювання ревербераційних камер

8.1. Уява про ревербераційні камери

«...Вот мы оказываемся в огромном помещении, стены и потолок которого увешаны огромными «матрасами». Разговор смолкает, и воцаряется небывалая тишина. Мы в большой полубезэховой акустической камере отдела исследования шума и виброкомфорта. Абсолютно ровный пол оказывается еще и звукоотражающим, а «матрасы» – звукопоглощающей облицовкой стен и потолка кулисного типа из супертонкого базальтового волокна. Камера оказывается «камерой внутри камеры». Бетонная оболочка камеры виброизолирована от стен и фундамента корпуса здания установкой по периметру пола специальных пружин и демпферов, а под поверхностью пола в машинном отделении на массивном, тоже виброизолированном, фундаменте базируется автоматизированный динамометрический стенд с независимым приводом на каждую из осей. Вдоль стен по периметру – на треногах – расположились десятки микрофонов. В этой «тихой» лаборатории возможно досконально идентифицировать источник шума или вибрации и довести его до нормального акустического уровня.»

Замість епіграфа. Цитата з [312]; супроводжується (в своєму періоджерелі) фотографіями.

Ревербераційна камера являє собою приміщення для акустичних вимірів, у якому звук по можливості повністю відбивається від поверхонь, що обгороджують, і в кожній точці якого звуковий тиск у середньому однаковий, а прихід звукових хвиль із різних напрямків має рівну ймовірність. Стіни такого приміщення виготовляють із залізобетону й цегли, а внутрішню поверхню ревербераційної камери облицовують матеріалами з

мінімальним звукопоглинанням (цементним розчином високої марки, мармуром й ін.). Дифузність звукового поля досягається неправильністю форми камери (непаралельність поверхонь, що обгороджують; спеціально створені нерівності на стінах), а також розвішуванням у них у випадковому порядку елементів, що відбивають, у вигляді вигнутих пластин. Звичайно ревербераційну камеру ізолюють від зовнішніх звуків і вібрацій; а звукове поле в ній створюється 2-4 гучномовцями, спрямованими в кути приміщення.

У ревербераційних камерах обсягом $\sim 200 \text{ м}^3$ роблять виміри коефіцієнта звукопоглинання матеріалів, градування вимірювальних мікрофонів і шумомірів, виміри потужності випромінювання гучномовців, акустичної віддачі машин й ін. ДШ, суб'єктивні дослідження слуху, виміру рівня гучності шумів. Іноді ревербераційною камерою можуть користуватися також для виміру характеристик електромагнітних хвиль; у цьому випадку її обробляють зсередини мідною фольгою. Два суміжні ревербераційна камери обсягом $\sim 50 \text{ м}^3$ кожна із загальним прорізом в одній зі стін застосовуються для вивчення звукоізолюючих властивостей різних матеріалів і конструкцій в архітектурній і будівельній акустиці (декілька збільшений аналог лабораторного стенду, що був наданий раніше на рис. 2.14).

Якість ревербераційної камери (та придатність її до своєї мети) характеризується часом реверберації і рівномірністю звукового поля.

На сайті [313] надані результати виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт в галузі створення ревербераційних камер (пряме цитування): *"Реверберационная камера представляет собой специально оборудованное шумо- и виброизолированное помещение, в котором звуковые волны при падении на*

отражающие поверхности почти полностью отражаются. Камера должна быть расположена на первом этаже внутри производственного цеха или в отдельно стоящем здании. Она имеет самостоятельную строительную коробку, расположенную на отдельном фундаменте. Ограждающие конструкции камеры не должны быть жестко связаны с конструкциями основного корпуса. Для уменьшения распространения вибрации реверберационная камера располагается на сплошной массивной фундаментальной плите. Плита одновременно служит и основанием для установки испытываемых машин. Толщина плиты 1,7 м. Для обеспечения надлежащей изоляции от воздушного шума стены камеры выбраны толщиной 51 см (в два кирпича), а потолок из монолитного железобетона толщиной 40 см. Для потолка можно использовать стандартные железобетонные перекрытия при условии тщательной заделки швов с покрытием рулонной шлаковатой и засыпкой шлаком или керамзитом.

Важнейшим фактором получения хороших акустических характеристик реверберационной камеры является обеспечение малого коэффициента звукопоглощения (не более 0,06 в диапазоне частот измерения) внутренних ограждающих поверхностей. Обычно это достигается нанесением на поверхность кирпичных стен, потолка и пола слоя цементной штукатурки толщиной 1-2 см с последующим железнением и покраской тонким слоем масляной краски. Для создания звукового поля в каждом трехгранном углу камеры должны быть установлены кронштейны для крепления акустических колонок или громкоговорителей. В стены и потолок камеры через равные промежутки замурованы металлические кронштейны для крепления вспомогательных устройств.

Для измерения шумовых характеристик выбирают наиболее целесообразный метод, исходя из условий наибольшей точности измерения, вида и размера звукомерной камеры, размера машины, способа ее монтажа, условий эксплуатации и пр. Методы измерения шума, излучаемого машинами, применяют для определения шумовых характеристик машин при установленных испытательных или эксплуатационных условиях. При этом устанавливаются требования только акустического характера, оказывающие влияние на точность измерений и позволяющие определить результаты, не зависящие от выбранного метода и звукомерных камер.»

Ось як описують один з комплексів існуючих ревербераційних камер, що призначені для промислових потреб, в [314] (пряме цитування): «Комплекс реверберационных камер введен в эксплуатацию в 1966 году. Обеспечивает экспериментальные исследования звукоизоляции различных типов перекрытий.

Важнейшие темы научных направлений, реализуемых на установке:

- исследования звукоизоляции панелей различных типов размером 2,5x2,5 м²;*
- измерение звукоизоляции замкнутых оболочек в диффузном поле;*
- измерение звукоизоляции различных элементов, панелей для автомобилей с целью разработки наиболее эффективных средств звукоизоляции и звукопоглощения;*
- измерения акустической мощности, излучаемой различными машинами и механизмами;*
- проведение сертификационных испытаний оборудования, приборов, оценка эффективности пассивных средств увеличения звукоизоляции конструкций.*

Основные технические параметры установки:

- камера высокого уровня - размеры $4 \times 9 \text{ м}^2$ со скошенными элементами потолка, объем камеры 160 м^3 ;
- камера низкого уровня - размеры $4 \times 4 \text{ м}^2$ со скошенными элементами потолка, объем камеры 60 м^3 ;
- размер проема для строительных элементов $2,5 \times 2,5 \text{ м}^2$. Предусмотрено дополнительное устройство для испытания образцов других размеров;
- камера низкого уровня - для испытания потолочных строительных элементов, размерами $3 \times 3 \times 3,5 \text{ м}^3$, объемом 30 м^3 ;
- аппаратная камеры - площадью 23 м^2 .

Аппаратная оснащена современной отечественной и импортной аппаратурой, персональной ЭВМ, приемно-передающей, анализирующей и регистрирующей аппаратурой, оснащена излучающими системами, обеспечивающими в камере звуковое поле близкое к диффузному. Вся аппаратура аттестована.

Камера высокого уровня - тамбур аппаратной снабжены кран-балкой грузоподъемностью 2 т, для перемещения испытуемых элементов. Предусмотрены ворота для ввоза в камеру габаритных испытуемых элементов. Все камеры соединены между собой линиями связи.

Главные преимущества установки - большой объем реверберационных камер, обеспечивающих исследования широкой гаммы испытуемых конструкций в строго контролируемых условиях.»

Фірма LG також проводить тестування шумових характеристик кондиціонерів, що виготовляє, у ревербераційній камері (інформацію про яку вони надають на веб-сторінці [315]).

Існує нормативна база для проведення таких робіт –

наприклад, [316-318]; а, особливо [319] та [320], що надають вимоги для влаштування ревербераційних камер та до їхнього обладнання.

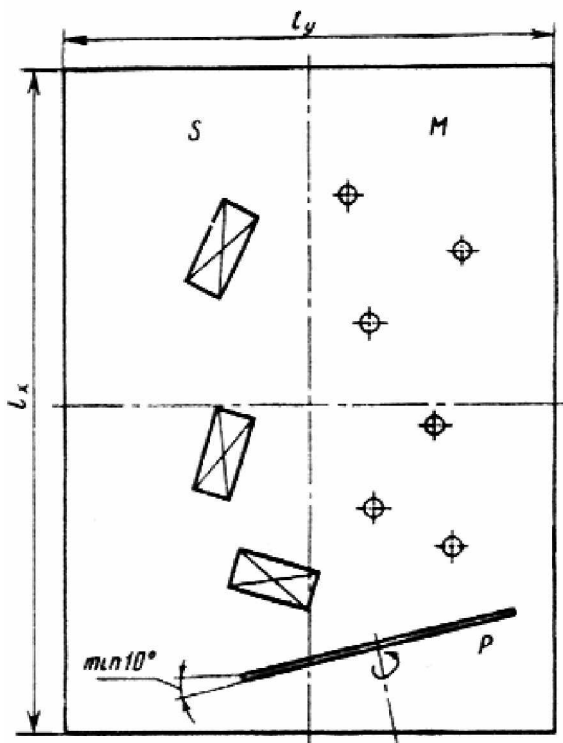


Рис. 8.1. Схема розташування джерел шуму й точок виміру в ревербераційній камері розміром $L_x \times L_y$ за [320]: S - місця розташування джерел шуму; M - точки виміру; P - обертовий розсіювач.

Важливим моментом при цьому є таке положення з [320] (цитата): «1.4 Объем испытываемого источника шума не должен превышать 1% объема реверберационной камеры.» Оскільки ДШ, що досліджуються, мають досить значні розміри, звідси випливає, що камера для їх дослідження повинна бути в 100 разів більше (за обсягом).

Таким чином, мова йде про дуже великі приміщення.

Вважаючи на це, треба казати, що конструювання ревербераційних камер являє собою дуже важливе (і досить складне) технічне завдання.

8.2. Звукоізолюючий тамбур згідно [40, 310] (власна розробка)

Звукоізолюючий тамбур (рис. 8.2), призначений для якісної звукоізоляції вхідних вузлів ревербераційних камер [40, 310]. У зв'язку з конструюванням спеціальних приміщень для випробувань акустичних засобів виникає необхідність у шумозахисному тамбурі, що, згідно за нашими розробками [40, 310], являє собою каркас 2 із обшиванням 1, виконаний у формі чохла з листового полімерного матеріалу товщиною 2 - 3 мм із вхідним і вихідним прорізами, перекритими шумозахисними шторами, розташованими на відстані 1,0 - 1,5 м одна від іншої. Тамбур встановлюють біля дверей у ревербераційну камеру задля запобігання додаткового проникнення шуму в її середину. Тамбур працює в такий спосіб: при пересуванні людини усередині тамбура, при відкритті вхідного прорізу 3, проріз 4 залишається закритим шумозахисною шторою 5, що являє собою надійна перешкода на шляху проникнення звукової енергії. При наступному пересуванні людина, що виходить з тамбура, відкриває проріз 4, у той час коли вхідний проріз 3 виявляється вже закритим шторою, що 5 дублює захисну перешкоду.

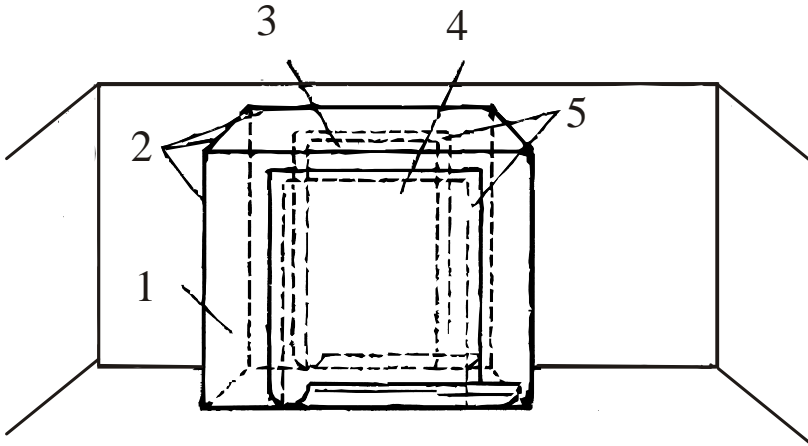


Рис. 8.2. Звукоізолюючий тамбур згідно [40, 310]: 1 – чохол із полімерного матеріалу (обшивання); 2 - каркас; 3 - вхідний проріз (до ревербераційної камери); 4 - вхідний проріз (до тамбуру); 5 – шумозахисна штора.

Таким чином, дешевий легкозбірний і розбірний шумозахисний тамбур може бути використаний багаторазово в умовах тимчасово діючих джерел шуму. При цьому його шумозахисна ефективність не уступає стаціонарним спареним дверним блокам.

8.3. Застосування звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю згідно [290] в якості огорожувальних конструкцій ревербераційних камер (власна розробка автора)

Винахід відноситься до технічних засобів боротьби із шумом на шляху його поширення шляхом звукоізоляції, тобто до звукоізолюючих панелей.

Найбільш ефективним є використання таких панелей як конструкція, що огорожує, в так званих ревербераційних камерах, де потрібно забезпечити як можна більше багаторазове відбиття звуку (тобто великий коефіцієнт відбиття і малий коефіцієнт пропущення звуку через

конструкцію, що обгороджує).

Прототипом винаходу є пристрій, що має дві стінки з розміщеною між ними по периметрі пружною прокладкою, з можливістю вакуумування внутрішнього простору, причому стінки виконані у виді частини сфери, зверненій опуклістю назовні, а між стінками і прокладкою розміщені віброізольовуючі опори у виді жорстко з'єднаних зі стінками металевих рамок [321]. Як звукоізольовуюче середовище в ньому використаний вакуум. Пружна прокладка прототипу еквівалентна звукоізольовуючій прокладці пропонованого пристрою (виконує подібні функції).

Прототип винаходу має цілий ряд недоліків, а саме: невелика звукоізольовуюча здатність і неможливість у технічній реалізації відповідно до опису, тому що в матеріалах прототипу:

- відсутній опис вузлів кріплення такого звукоізольовуючого елемента до будівельних конструкцій спорудження, до яких він кріпиться, а при довільному їхньому виконанні створюються сприятливі умови для поширення через них так названого структурного звуку, що робить безглуздим підвищення звукоізольовуючої здатності інших структурних елементів прототипу,

- відсутня яка-небудь характеристика вакууму у внутрішньому просторі, а з непрямої вказівки на те, що вакуум погано проводить звук, яка мається в описі прототипу, випливає, що, мабуть, у прототипі використаний низький вакуум, що володіє малою звукоізольовуючою здатністю, можливість використання середнього вакууму не передбачена, відсутній взаємозв'язок між найменшою відстанню між стінками внутрішнього простору і довжиною λ вільного пробігу молекул,

- зменшення тиску у внутрішній порожнині до діапазону тисків середнього вакууму неможливо, тому що

корпус прототипу не цільний, а складений (у цьому випадку буде мати місце втрата герметичності пружною прокладкою, розміщеної по периметрі стінок корпусу),

- має місце втрата здібностей, що демпфірують, цією пружною прокладкою через виникнення в ній напруження стиску (прокладка надмірно стиснута через велику різницю в тисках між зовнішньою атмосферою і вакуумом у внутрішньому просторі).

Крім того, область застосування прототипу обмежується ілюмінаторами в літаках, кабінах управління і кожухом машин (обмежується формулою прототипу, а саме заданою формою його корпусу, у той час як ця форма ніяк не впливає на величину звукоізолюючої здатності прототипу, але утрудняє експлуатацію, погіршує дизайн і т.п.)

Найголовнішим критерієм, що визначає ефективність заходів боротьби із шумом, є підвищення звукоізолюючої здібності шумозахисних засобів.

Завданням нашого винаходу є підвищення звукоізолюючої здатності до максимально можливої величини.

Поставлене завдання досягається тим, що звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю відповідно до формули винаходу [290] має корпус панелі, виконаний цільним і герметичним, зі звуковбирною прокладкою, розташованій як на лицьовому, так і на тильному боках панелі; у корпусі і на несучих конструкціях спорудження, до яких прикріплена панель, розміщені магніти, що утворюють безконтактні вузли кріплення (магнітну підвіску), параметри зазначених магнітів (полярність і напруженість полю магнітів) підібрані таким чином, що між корпусом панелі і несучими конструкціями спорудження, до яких закріплена панель, утворений проміжок, заповнений

атмосферним повітрям, а у внутрішній порожнині панелі забезпечена наявність середнього вакууму, що характеризується рівністю чи незначним перевищенням довжини вільного пробігу молекул l над найменшою відстанню d між стінками внутрішньої порожнини.

Також завдання досягається тим, що в конструкції безконтактних вузлів кріплення використані електромагніти.

Також завдання досягається тим, що корпус панелі виготовлений із фторопласта, армованого металом, причому арматура корпусу використовується в якості частини безконтактного вузла кріплення як обмотка вхідного в його склад електромагніта.

Під підвищенням звукоізолюючої здатності розуміється в першу чергу зменшення τ . Як вже згадувалося вище, (наприклад, згідно [118, с. 58]), всяке огороження характеризується величиною звукоізолюючої здатності, що пов'язує R та τ .

Технічний результат винаходу - повна мінімізація коефіцієнта пропущення звуку через внутрішню порожнину $\tau = 0$, що призводить до забезпечення максимально можливої звукоізолюючої здатності $R = \infty$ дБ. Крім того, за рахунок обговореної конструкції безконтактних вузлів кріплення запобігається передача структурного звуку на несущі конструкції спорудження, до яких прикріплена панель. Середній вакуум у внутрішній порожнині забезпечує неможливість пропущення звуку скрізь неї. Коли тиск газового середовища поширення звукових хвиль зменшується в порівнянні з атмосферним (низьким вакуум), передача звукової енергії зменшується, але не припиняється цілком (прототип). Коли ж у середовищі поширення звуку створений середній вакуум, воно втрачає властивість пружності, і пропущення звуку через нього припиняється цілком. Це теоретичне

положення цілком підтверджується роботою [322, с. 84], де прямо зазначено, що за умови середнього вакууму, тобто при рівності довжини вільного пробігу молекул і характерного розміру процесу (відстані між стінками судини), – імпульс, що переноситься, пропорційний числу молекул, здатних його переносити, і звертається в нуль при повному вакуумі.

Цільний і герметичний корпус пропонованої панелі забезпечує підтримку в її внутрішній порожнині середнього вакууму на весь розрахунковий термін її експлуатації.

Оскільки частина звукової енергії може поширюватися через корпус у виді так названого структурного звуку і через вузли кріплення переходити на несучі конструкції спорудження, до яких прикріплена панель, передбачені безконтактні вузли кріплення з повітряним проміжком між корпусом панелі і несучими конструкціями, що запобігає поширенню структурного звуку.

Додаткове зниження шуму забезпечується звуковбирною прокладкою, розміщеною як на лицьовій (куди спочатку попадає звукова хвиля), так і на тильній (протилежній) сторонах панелі (де вона запобігає переходу звукової енергії в заповнений повітрям проміжок між корпусом і несучими конструкціями спорудження).

У конструкції безконтактних вузлів кріплення можуть бути використані як постійні магніти, так і електромагніти (що більш технологічно і зручно), але їхні параметри повинні бути підібрані таким чином, щоб забезпечувалася відсутність прямого механічного контакту між корпусом панелі і несучими конструкціями спорудження (за зазначеними вище причинами). Корпус панелі виготовлений з матеріалу з великим коефіцієнтом звукопоглинання (що збільшує ефективність панелі), а саме фторопласта, що до того ж є ідеальним матеріалом

для вакуумних судин (традиційно використовується для їхнього виготовлення через малу газопроникність і ін.), у який для забезпечення більшої міцності замурована арматура. Ця арматура може бути використана як обмотка електромагніту, що входить до складу безконтактного вузла кріплення.

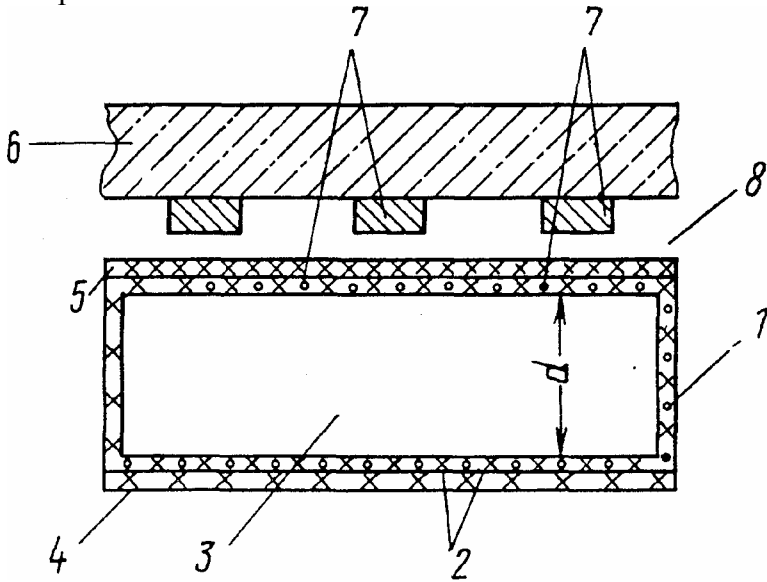


Рис. 8.3. Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю згідно [290], розріз.

До складу звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю входять цільний і герметичний корпус 1, виготовлений із фторопласта, у який замурована арматура 2 з металу, із внутрішньою порожниною 3 (що характеризується найменшою відстанню d між її стінками), у якій забезпечена наявність середнього вакууму з дотриманням умови $l \geq d$, що має (корпус 1) звуковбирні прокладки на лицьовій 4 і тильній 5 сторонах, при цьому в корпус 1 і несучі конструкції спорудження, до яких він прикріплений 6, установлені

магніти (електромагніти) 7, їхня полярність і напруженість магнітного поля підібрані таким чином, щоб був відсутній прямий механічний контакт - між корпусом 1 і несущими конструкціями 6 і між ними був утворений проміжок 8, заповнений повітрям.

Пристрій працює в такий спосіб. Загальний вхідний потік звукової енергії $\Phi_{\text{вх}}$, що попадає на лицьову сторону корпуса панелі, згідно закону збереження енергії частково відбивається назад у навколишнє середовище: $\Phi_{\text{відб}}$, частково поглинається речовиною корпуса 1 панелі і звуковбирною прокладкою 4, спеціально встановленою на ній: $\Phi_{\text{погл}}$, частково пропускається крізь панель: $\Phi_{\text{проп}}$.

$$\Phi_{\text{вх}} = \Phi_{\text{відб}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{проп}}. \quad (8.1)$$

Задача винаходу - зменшення $\Phi_{\text{проп}}$, виконується за рахунок того, що основна частина $\Phi_{\text{проп}}$ загасає при улученні у внутрішню вакуумовану порожнину 3 через відсутність у ній елементів пружного середовища, тобто умов поширення звуку.

Однак частина $\Phi_{\text{проп}}$ у виді структурного звуку поширюється по інших елементах панелі, тобто по корпусі 1. Оскільки корпус 1 виготовлений із фторопласта, тобто матеріалу з великим α , ця частина $\Phi_{\text{проп}}$ переходить у $\Phi_{\text{погл}}$. Крім того, на тильній стороні панелі мається звуковбирна прокладка 5, що запобігає поширенню звуку з тильної сторони.

Недолік прототипу - поширення структурного звуку через вузли кріплення виправлений за рахунок наявності безконтактних вузлів кріплення (у виді магнітної підвіски). Оскільки параметри магнітів підібрані таким чином, що між тильною стороною корпуса 1 і несущими конструкціями спорудження 6 утворений проміжок 8, заповнений повітрям, умови, сприятливі для поширення в ньому звуку, відсутні. Коливання панелі щодо нерухомих

несущих конструкцій б гасяться магнітами 7. У такий спосіб забезпечується повна мінімізація коефіцієнта пропущення звуку $\tau = 0$ і максимально можлива звукоізолююча здатність $R = \infty$ дБ. Додатково можливо установити звуковбирні прокладки не тільки на лицьовій і тильній сторонах, але і на бічних сторонах панелі.

Звукоізолююча панель з максимальною можливою звукоізолюючою здатністю можлива в технічній реалізації.

Магнітна підвіска (безконтактні вузли кріплення) відомі, наприклад, стосовно до рейкового транспорту [116, с. 267]. Відомі також подібні вузли кріплення предметів щодо спорудження, але не з метою боротьби із шумом [323]. Так, засновник ісламу пророк Мухаммед був похований у залізній труні. В усипальниці пророка знаходиться нібито «особливий камінь», (тобто магніт), що і тримає в ширяючому стані залізну труну. Ясніше говорячи, сила магнітного притягання повинна бути такою, щоб її вистачило підняти труну над підлогою, і було недостатньо, щоб притягти залізну шухляду з порохом до стелі, у якій захований магніт.

Корпус 1 пропонованої панелі виготовлений з дотриманням вимог, пропонованих до пристроїв вакуумної техніки, тобто забезпечує герметичність внутрішньої порожнини (для міцності армований металом).

Передача звукової енергії, тобто енергії пружних хвиль при цьому здійснюється за рахунок зіткнень сусідніх часток при їх коливаннях. Фізичний зміст явища полягає в тому, що звукові хвилі здатні поширюватися практично в будь-якому середовищі, що володіє властивістю пружності, тобто в будь-якому відомому матеріалі. У зв'язку з цим боротьба із шумом на шляху його розповсюдження стає скрутною.

Єдиною перешкодою на шляху звуку може бути середовище, позбавлене пружності, тобто вакуум. Ця ідея

реалізована в цілому ряді відомих звукоізолюючих пристроїв (звукоізолюючих панелей), що містять порожнину з вакуумом усередині твердого корпуса (наприклад, [297]). Згідно [116, с. 67 - 68] вакуум являє собою стан укладеного в судину газу з тиском значно нижче атмосферного, і поведження його визначається співвідношенням між довжиною вільного пробігу молекул l , (середньою відстанню, що проходить частка між двома її послідовними зіткненнями з іншими частками), і розміром d , характерним для даної вакуумної судини чи процесу. Причому для забезпечення коефіцієнта пропущення звуку $\tau = 0$ необхідна наявність, щонайменше, середнього вакууму, коли виконується умова $l = d$ (тиск порядку $10^2 > P > 10^{-1}$ Па) по досягненні якого припиняється пряма передача енергії звукових коливань від однієї частки пружного середовища до іншої між стінками судини. У роботі [97] наводиться формула для розрахунку довжини вільного пробігу молекул l :

$$l = KT / (\pi \sqrt{2} D^2 P), \quad (8.2)$$

де l - середня довжина вільного пробігу молекул, м; $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; P - шуканий тиск газу, Па; D - діаметр молекули речовини, м; T - абсолютна температура, К.

Вищевказане теоретичне положення цілком підтверджується роботою [322], де зазначено, що якщо газ настільки розріджений, що виконується умова $d \leq l$, то *“молекулы непосредственно переносят импульс от одной пластинки к другой, ни с чем не сталкиваясь по дороге, и переносимый импульс пропорционален числу молекул, способных его переносить, и обращается в нуль при полном вакууме”*. Як уже відзначалося вище, ці принципи використовують при конструюванні звукоізолюючих

пристроїв з вакуумом.

Необхідний тиск у його внутрішній порожнині 3 може бути обчислений в такий спосіб (щоб забезпечити умову $l \geq d$). Згідно [97, с. 204] відомо, що довжина вільного пробігу молекул відповідно до кінетичної теорії газів визначається за формулою (8.2). При цьому $K/\pi\sqrt{2} = 3,11 \cdot 10^{-24}$ Дж/К. Знаючи реальну величину для умови $l \geq d$ згідно (8.2) розраховують необхідний тиск у внутрішній порожнині для газу (в основному повітря), підставляючи у формулу (8.2) відому величину діаметра молекули, і температури газу, характерної для умов експлуатації. Як правило, необхідний тиск лежить у діапазоні $10^2 > P > 10^{-1}$ Па. У конструкції використані будь-які види звукобірних матеріалів з відомих.

8.4. Багаторазові відбиття та самоузгодження хвильового поля в проміжку між двома шарами матеріалу [324]

В 1997 р. автором цієї роботи зроблений винахід "Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю" [290]. Таким чином, здійснене рекордне технічне досягнення, (яке сміливо може претендувати на те, наприклад, щоб бути занесеним в відому "Книгу рекордів Гіннеса"). В якості внутрішнього середовища в [290] застосований вакуум, що не пропускає звук. Між тим, конструкції різного роду звукозахисних пристроїв, що містять всередині вакуум, були відомі ще задовго до [290] (аналоги, прототип нашого винаходу, та ін. ([297]))? Але досягнути саме максимальної звукоізолюючої здатності вони виявилися не в змозі. Слабким місцем тих конструкцій є проходження структурного звуку в конструкціях корпусу (або оболонки), що містить вакуум. Звук, дійсно, зовсім не проходить крізь вакуумований простір, - зате проходить

повз нього по твердому середовищу його оболонки. Наявність такого обхідного шляху нівелює всі переваги затримання звуку вакуумом у внутрішній порожнині, - бо принципово неможливо утворити таку порожнину без її оболонки? Таким чином, є потреба в зменшенні структурного звуку на стінках.

Між тим, в конструкції панелі [290] переборено упередження фахівців про неможливість досягнення такого вагомого, граничного технічного результату, як *максимально можлива* звукоізолююча здібність. Але ж чим відрізняється, наприклад, [290], від інших своїх аналогів, наприклад, [297], що також застосують вакуум задля підвищення своєї звукоізолюючої здатності?

Умови технічного завдання зменшення структурного шуму в оболонці вакуумованої порожнини полягали в тому, що звукова хвиля падає з атмосферного повітря під кутом Θ на поверхню звукоізолюючої конструкції, що складається з декількох шарів матеріалу, при тому третій шар матеріалу є таким, що абсолютно відбиває. Потребується зменшити проходження структурного звуку в першому та другому шарах матеріалу [324]. Такій умові, наприклад, відповідає конструкція [290], що має стінки з твердого матеріалу (шар 2, (а також і шар 4)), між якими міститься вакуум (шар 3). На передній поверхні стінки, згідно за формулою винаходу, нанесене додаткове звукопоглинаюче покриття (шар 1).

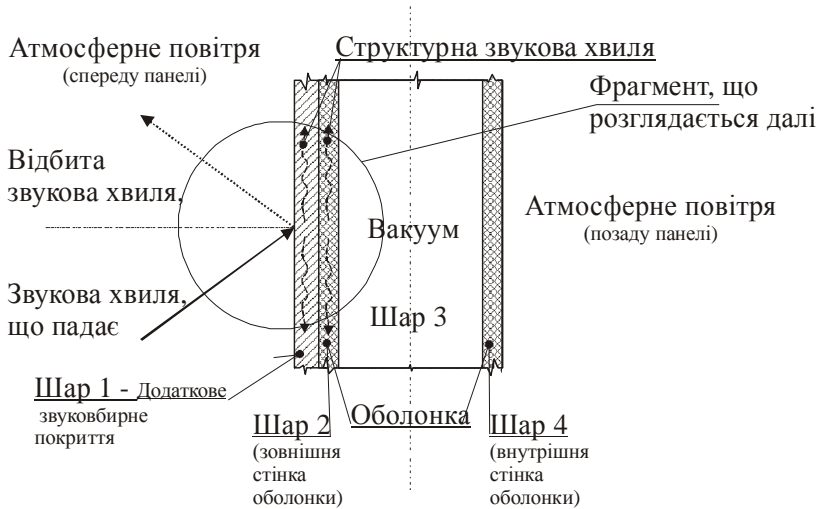


Рис. 8.4. Фрагмент звукоізолюючої панелі з максимально можливою звукоізолюючою здатністю [290] в поперечному розтині. З такої чотирьохшарової конструкції далі розглядаємо тільки половину (шари 1-3), оскільки джерело шуму знаходиться із одного боку панелі; а з іншого – об’єкт, що захищається; і зворотний напрямок (у т.ч. шар 4 – зворотний бік оболонки, що показані на кресленні, та дійсно необхідні задля зберігання вакууму) нас не цікавить. В будь-якому разі вакуум (шар 3) затримує звук всередині. Мова в цій роботі йде про зменшення саме структурного звуку на стінках корпусу.

Таким чином, конструкція поверхні, куди влучає звукова хвиля, має три шари: звукопоглинаюче покриття (перший шар; індекс 1); твердий матеріал (другий шар; індекс 2); вакуум (третій шар; індекс 3). Звукові хвилі в вакуумі не розповсюджуються, тобто третій шар є таким, що абсолютно відбиває всю енергію звукової хвилі. Товщини шарів позначені як d_1 , d_2 , d_3 ; (при тому товщина d_3 для розглядуваного в цій главі випадку не відіграє ролі; (але: за формулою винаходу [290] у внутрішній порожнині панелі забезпечена наявність середнього вакууму, що характеризується рівністю чи незначним перевищенням довжини вільного пробігу молекул l над найменшою

відстанню d_3 між стінками внутрішньої порожнини)).

Якщо амплітуда звукового тиску в хвилі, що падає, дорівнює $P_{\text{початк}}$, то при перетинанні першої границі розподілу середовищ, тобто при падінні з повітря на шар 1 (початок тривимірної системи координат $ХОУ$ розташовано на границі розподілу середовищ 2 та 3, оскільки d_3 тут не відіграє ролі):

$$P_{1\text{пад}} = P_{\text{початк}} \cdot e^{i k_0(-x \cdot \sin \Theta + y \cos \Theta)},$$

$$P_{1\text{відб}} = \rho_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i k_0(-x \cdot \sin \Theta - y \cos \Theta)},$$

$$P_{1\text{проп}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i k_0(-x \cdot \sin \Theta + y \cos \Theta)}$$

Несуттєве зауваження: $P_{1\text{пад}}$ та $P_{1\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «повітря – шар 1»; а $P_{1\text{проп}}$ - позаду неї, тобто у шарі 1. За аналогією, $P_{2\text{пад}} (= P_{1\text{проп}})$ та $P_{2\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «шар 1 – шар 2», тобто в шарі 1; а $P_{2\text{проп}}$ - позаду неї, тобто у шарі 2. $P_{3\text{пад}} (= P_{2\text{проп}})$ та $P_{3\text{відб}}$ розповсюджуються попереду границі розподілу «шар 2 – шар 3», тобто в шарі 1; а $P_{3\text{проп}}$ (що дорівнює 0) - позаду неї, тобто у шарі 3.

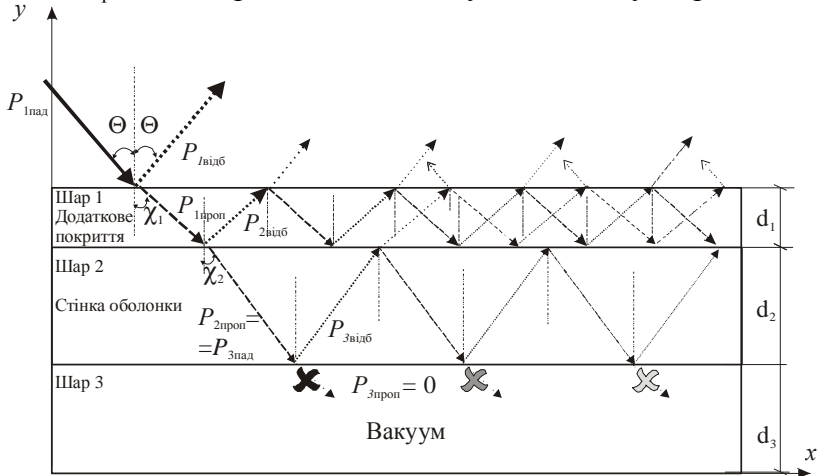


Рис. 8.5. Складна хвильова картина всередині стінок [290]. Всього одна хвиля, що падає, розбивається на значну кількість пропущених, переломлених, відбитих компонент. Багаторазові відбиття проходять в

межах шарів 1 та 2.

Яким чином будуть розповсюджуватися звукові хвилі в шарі 1? Тут хвильове поле, за аналогією за попередніми побудовами, сформуєть хвилі $P_{2\text{пад}}$, $P_{2\text{відб}}$, та їхні наступні багаторазові відбиття. При тому $P_{2\text{пад}} = P_{1\text{проп}}$ (задля спрощення ми відкидаємо надмірне позначення $P_{2\text{пад}}$ - воно зайве). Компонент $P_{2\text{проп}}$ пройде крізь границю розподілу. На другій границі розподілу «шар 1- шар 2» усередині твердого матеріалу корпусу процес відбувається повторно; та хвильове поле в шарі 2 сформуєть хвилі $P_{3\text{пад}}$, $P_{3\text{відб}}$. При тому $P_{3\text{пад}} = P_{2\text{проп}}$.

$P_{3\text{проп}}$ буде дорівнювати 0, оскільки третій шар являє собою вакуум, і звукові хвилі, як відомо, в ньому не розповсюджуються.

$$P_{3\text{відб}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta - y \cdot \cos \Theta)}.$$

Іншим чином, $P_{3\text{відб}} = P_{2\text{пад}}$, тобто це означає, що цей компонент хвилі, що пропущений скрізь шар 1 в товщу шару 2, але повністю відбитий від шару 3, містить в собі всю енергію звукової хвилі.

Розглянемо далі, що ж з ним станеться? При тому координата по осі $y = d_2$:

$$\begin{aligned} P_{2\text{проп}}(y = d_2) &= \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)}; \\ P_{3\text{відб}}(y = d_2) &= \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta - y \cdot \cos \Theta)}. \end{aligned}$$

Чому ж ми спочатку кажемо, що $P_{3\text{відб}} = P_{2\text{проп}}$, а потім розрізняємо їх між собою? Справа в тому, що ми розглядаємо не короткочасний звуковий імпульс, а надходження звукової енергії у шари панелі протягом деякого проміжку часу. При тому $P_{3\text{відб}}$ характеризує енергію попередньої хвилі, а $P_{2\text{проп}}$ - наступної; вони рівні між собою, це природно; але ж вони існують одночасно, доки $P_{3\text{відб}}$ не згасла, а $P_{2\text{проп}}$ ще надходить; отже, вони накладаються одна на одну, та взаємодіють?!

Якщо розглянути відношення цих хвиль для площини y

$= d_2$, то можемо одержати:

$$P_{\text{звідб}} / P_{\text{2проп}} = e^{-z \cdot i \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \Theta}.$$

Згідно визначення, відношення відбитої енергії хвилі до тієї енергії, що падає, є коефіцієнт відбиття. Отже, ми одержали коефіцієнт відбиття в площині d_2 , тобто в шарі 2.

Модуль коефіцієнта, що одержаний, дорівнює одиниці, а фаза компоненти хвилі в шарі 2:

$$\phi = 2 \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \Theta.$$

Це являє собою накладання фаз при розповсюдженні хвилі в хвильовому проміжку, тобто від поверхні $y=0$ (границя розподілу середовищ "шар 2 - шар 3" до границі розподілу "шар 1 - шар 2" ($y=d_2$) и в зворотному напрямку, після відбиття від границі "шар 1 - шар 2". Промінь випробує багаторазове відбиття, та при тому, природно, переміщується вздовж осі x . Таке переміщення визначається як

$$\Delta = \frac{\partial \phi}{\partial k_{x_x}}; \quad \phi = 2 \cdot k_2 \cdot d_2, \quad \frac{\partial \left(\sqrt{k_0^2 - k_x^2} \right)}{\partial k_{x_x}} = y d_2 \operatorname{tg} \Theta.$$

При геометричній побудові виходить точно такий же результат, тобто

$$\Delta = y d_2 \operatorname{tg} \Theta.$$

Адекватні результати при вивченні подібного явища одержані іншими дослідниками [325], [326]; а також [327].

Можливо підібрати товщину шару d_2 таким чином, щоб промінь $P_{\text{звідб}}$, при зворотному русі всередині шару 2, влучив у вузол коливань шару d_1 . Це буде залежати, насамперед, від первісного куту падіння Θ на границю "повітря - шар 1", кутів переломлення χ_1 та χ_2 на границях розподілу середовищ "повітря - шар 1"; "шар 1- шар 2".

Якщо шар 2 має однакову товщину, тобто поверхні шарів 1 та 3 паралельні, одержимо повторне влучення повторно відбитого променю у відповідний вузол. Слово

«кожний», звісно, до цих «променів» та «вузлів» не застосовуване: (з нашого рис. 2 явно впливає що лише третій з відбитих променів в шарі 2 влучає в місце влучення четвертого відбитого променю в шарі 1. Це обумовлено тим, що кут первісного падіння Θ та кути падіння на кожну подальшу границю розподілу не рівні між собою; то є загальновідомі наслідки закону Снеліуса). Але все ж таки має місце таке влучання деяких променів; завдання конструктора звукоізолюючого засобу – зробити їх як можна частішими?!

Ці ділянки (тобто самі місця вузлів коливань) не випробують коливань; коливання (у формі вигинових та інших форм хвиль йдуть по шару 1 в інших місцях (між вузлами). Таким чином, інтерференційні явища, тобто збільшення/зменшення коливань шару 1, не будуть мати місце.

Хвиля, що туди падає, відбиватиметься назад із тією ж амплітудою та фазою. Це є самоузгодження хвильових полів, що призводить до виникнення хвиль, що стоять, із немінучими резонансними явищами в товщі шару 2, - і, в кінцевому разі - до збільшення щільності звукової енергії.

Це є керований процес, а примусове управління їм здійснюється за рахунок підбору товщі шару d_2 . При різній товщині шару d_2 місце відбиття променю знаходиться у відповідних різних місцях границі розподілу середовищ "шар 2 - шар 3", змінюючись за координатою по осі x .

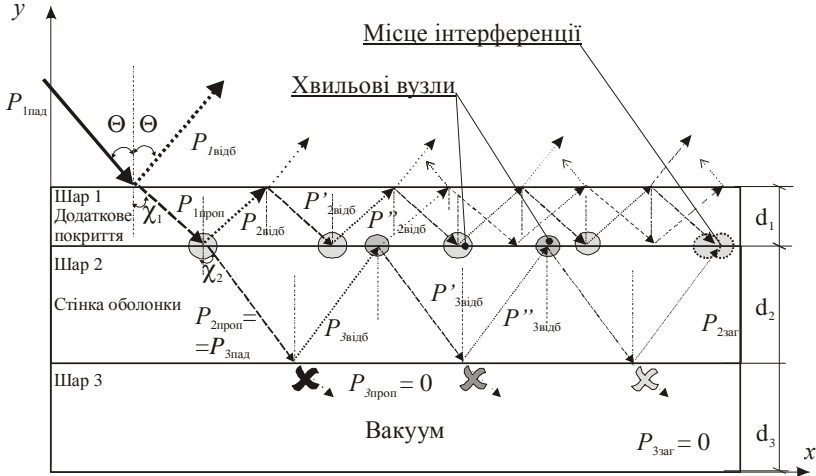


Рис. 8.6. Самоузгодження хвильових полів в середнім шарі тришарової конструкції за рахунок накладення різних відбитих променів один на одного.

Амплітудні характеристики звуку в шарі 2 визначаються амплітудними характеристиками $P_{2\text{проп}}$ та $P_{2\text{відб}}$. Загальна амплітудна характеристика $P_{2\text{заг}}$, розрахована із зменшенням $P_{2\text{відб}}$ при кожному повторному відбитті ($P'_{2\text{відб}}$; $P''_{2\text{відб}}$; ...) за рахунок інтерференційних явищ (влучення в місця попадання променів ($P'_{1\text{відб}}$; $P''_{1\text{відб}}$):

$$P_{2\text{заг}} = P_{2\text{проп}} + P_{2\text{відб}} = \\ = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} [e^{i \cdot k_0 \cdot (-x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)} + e^{i \cdot k_0 \cdot (x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta)}] ;$$

$$P_{2\text{заг}} = \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} [e^{i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos \Theta} + e^{-i \cdot k_0 \cdot y \cdot \cos \Theta}] ;$$

$$P_{2\text{заг}} = 2 \cdot \tau_1 \cdot P_{\text{початк}} \cdot \cos \theta \cdot (k_0 \cdot y \cdot \cos \theta) \cdot k_0 \cdot d_2 \cdot \cos \theta \cdot \cos(k_0 \cdot y \cdot \cos \theta) \cdot \\ e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} = P_{(y)} \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin \Theta} .$$

Таким чином, амплітудні параметри звукової хвилі всередині шару твердого матеріалу 2 є функцією просторової координати y . Щоб знайти екстремальне значення цієї амплітуди, проводимо диференціювання за y :

$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 P_{\text{початк}} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta)$$

Для умови екстремуму

$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P(y)}{\partial y} = -2 \cdot \tau_1 \cdot k_0 P_{\text{початк}} \cdot \cos\theta \cdot \sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

$$\sin(k_0 \cdot y \cdot \cos\theta) = 0$$

Умова максимуму амплітуди $k_0 \cdot y \cdot \cos\theta = \pi \cdot K$, де K – любе ціле число: ($K = 0; 1; 2; 3; \dots n$) – (що являє собою умову інтерференції).

Задля знайдення куту повного внутрішнього відбиття хвилі $\theta = \Theta_{\text{граничне}}$ необхідно дорівняти $y = d_2$:

$$k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\theta = \pi \cdot K$$

$$k_0 \cdot d_2 \cdot \cos\theta = \cos\theta \frac{\pi \cdot \hat{E}}{k_0 \cdot d_2}$$

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішнім відбитті хвиль (в загальному вигляді) описано в роботах [58, 210, 212]

Російський дослідник А.А. Кочкін вирішував завдання, що має деяку віддалену аналогію з нашим – а саме – досліджує самоузгодження хвильового поля в заповненому атмосферним повітрям проміжку між двома сферами твердого матеріалу. При тому в роботі [327], наприклад, її автор будує саме якусь умовну модель на підставі умопобудов, не в змозі наділити її наведеними нами раніше реальними властивостями. Він досліджує самоузгодження хвильового поля в повітряному проміжку всередині тришарової конструкції, перший шар якої – тверде середовище (в нашій реальній, а не гіпотетичній моделі це шар твердого матеріалу 1); другий шар (як це впливає з самої назви [327]) – повітря (в нашій реальній моделі еквівалентом його є шар 2 твердого матеріалу, з

якого виготовлений корпус [290]); третій шар (в нашій реальній моделі еквівалентом якого є вакуум у внутрішньому просторі [290] згідно з запатентованою в 1997 р. формулою винаходу) автор [327] при побудові його моделі досліджень іменує "поверхность ... абсолютно отражающая" (але, на відміну від нас, він ніяк не пояснює, що ж це може значити, не наділяє свою "абсолютно отражающую поверхность" реальним змістом. Тому тут ми використаємо для викладок [327] саме термін "умопобудови"; це не є наміром якось образити автора [327]).

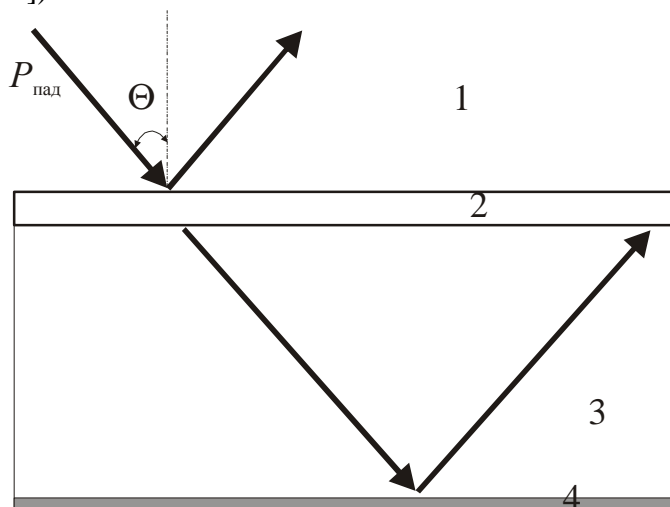


Рис. 8.7. Розрахункова схема досліджень А.А. Кочкіна, в деякому віддаленому ступеню еквівалентних нашим: 1 – атмосферне повітря; 2 – «пластина в формі полоси» (еквівалент шару 1 твердого матеріалу в наших дослідженнях); 3 – «воздушний проміжок» (еквівалент шару 2 твердого матеріалу в наших дослідженнях); 4 – «абсолютно отражающая поверхность» (еквівалент шару 3 (вакуум) в наших дослідженнях). За рахунок підбору товщини повітряного проміжку А.А. Кочкін також досягає самоузгодження хвильового поля в ньому.

Незважаючи на такі значні відмінності (насамперед, шар повітря [327] в тришаровій конструкції замість нашого

шару твердого матеріалу 2), результат теоретичних побудов [327] збігається з нашим. Таким чином, на підставі власних досліджень, а також адекватного ствердження незалежного дослідження А.А. Кочкіна, можна констатувати, що самоузгодження хвильового поля в проміжку між двома шарами матеріалу, при дотриманні вищеназваних умов, цілком можливе та може бути досягнуто. За рахунок того само узгодження значно зменшується частка структурного звуку в елементах конструкції, і, таким чином, підвищується її звукоізолююча здатність. Це в офіційному порядку зафіксовано патентом Росії [290].

Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здатністю є найбільш ефективним засобом звукоізоляції з можливих засобів.

ЗАКІНЧЕННЯ

На закінчення хотілося б надати цитату з власної же роботи [40]⁵: *«По нашему мнению, сегодня нет децибелов техногенного происхождения, которые невозможно было бы "вогнать" в пределы нормируемых параметров. Вот только какой ценой это удастся сделать? Именно этот вопрос определяет сегодняшнее (принятое называть временем тяжелой экономической нестабильности) стояние или чуть заметное топтание на месте нашей отечественной градостроительной акустики. Именно этот вопрос порождает кажущуюся непреодолимой глубину антагонизма между желаемым и действительным в науке, объединяющей в Украине выдающихся ученых и талантливого молодого поколения...»*

⁵ Робота написана в співавторстві. Ці чудові строки є відображенням почуттів **всіх** її творців, є їхнім колективним висловом, є їхнім сумісним побажанням щодо очікування нових, майбутніх досягнень акустичної науки.

Список використаних джерел

1. Конституція України: Прийнята на п'ятій сесії Верховної Ради України 28 черв. 1996 р. – К.: Преса України, 1997. – 80 с.
2. Закон України "Про охорону праці". К., 2002.
3. Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення".
4. ГОСТ 12.0.003-74*. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
5. Охорона праці в Україні. Нормативна база. (3-є вид., змін. і доп.) / Роїна О.М. - К.: КНТ, 2007. - 548 с.
6. <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi> - Вся база «Законодавство України». (Добірка діючих законодавчих документів в електронному вигляді).
7. <http://www.dnopr.kiev.ua/> - Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду (Офіційний сайт).
8. <http://dnopr.com.ua>. Державні нормативні акти з охорони праці.
9. <http://www.document.org.ua/dnaop/> - Реєстр ДНАОП. (Повний перелік всіх діючих законодавчих та нормативних документів в галузі охорони праці станом на сьогоднішню дату в електронному вигляді. Щоденно обновлюється).
10. <http://www.nau.kiev.ua/index.php>. НАУ - Нормативні акти України. (Добірка всіх діючих нормативних актів в Internet).
11. <http://aist.com.ua/products/zodchiy/base/zak/> «Зодчий». Законы, постановления, указы, соглашения, документы министерств и ведомств (ЗАК)
12. ДСТУ 2325-93. Шум. Терміни та визначення.
13. ДСТУ 2867-94. Шум. Методи оцінювання виробничого шумонавантаження. Загальні вимоги.
14. ГОСТ 12.1.003-83*.ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

15. ГОСТ 12.1.029-80 (СТ СЭВ 1928-79) ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
16. ГОСТ 12.1.036-81. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях.
17. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. К. - 1999. - 32 с.
18. СНиП II -12-77.Защита от шума. Нормы проектирования.
19. Самойлюк Е.П., Гилёв В.В., Трошин М.Ю. Качество жизни и градостроительство. / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. - Дн-ск, ПГАСА, 2006. - С. 119-124.
20. Алексеев С.В., Хаймович М.А., Кадыскина Е.Н., Суворов Г.А. Производственный шум. Л.: Медицина, 1991. – 185 с.
21. Janousek M., Gruberova I., Sviter D. Sledovanie vestiburaneho aparatu v risiku hluku a ultrazvuku // Pr. Lec., 1985. - Vol. 37.- P. 369-374.
22. Lober A. Lärm-Belastung in der Arbeitwelt and Umwelt. // Zbl. Bacteriol., 1984. - Bd 179.- S. 1-33.
23. Mantysalo S., Viori I. Effects of impulse noise and continuous Stlady state noise oh hearing // Brit. I. Industr. Med., 1984. - Vol. 41. - P. 122-132.
24. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций / Г. А. Суворов, Л. Н. Шкаринов, Э. И. Денисов. - М. : Медицина, 1984. - 240 с.
25. D.Stein. Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage. Ernst und Sohn: 1988. – 940 s.
26. <http://iso.staratel.com/index.html> Первый регулярно обновляемый сайт, посвященный серии стандартов ISO 9000 и ISO 14000, вопросам менеджмента качества и сертификации. (Публ. в Internet).
27. Абракітов В.Е. Актуальність проблеми боротьби із шумом, і створення засобів акустичного моделювання, як

один із способів рішення даної проблеми // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 63. К.: Техніка, 2005. – С. 316 -320.

28. Дідковський В. С., Акименко В. Я., Запорожець О. І., Савін В. Г., Токарев В. І. Основи акустичної екології: Навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів / В. С. Дідковський (ред.). — Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ "Імекс ЛТД", 2002. — 519 с.

29. Богданов Ю.В., Прохватило О.И. Строительная площадка - активный источник городского шума / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. Днепропетровск, ПГАСА, 2006. - С. 161 -165.

30. Абракітов В., Карпалюк І. Безпека праці і її вплив на фінансово-економічну діяльність промисловості України // Україна: аспекти праці. Науковий економічний та суспільно-політичний журнал. К.: Праця, 1996.- № 4.- С. 48 - 49.

31. <http://abrakitov.narod.ru/Monograph/1-6.htm> Абракітов В.Э. Использование системного подхода для решения проблемы борьбы с шумом . (Публ. в Интернет).

32. Методология исследования сложных развивающихся систем / Под ред. А. В. Ахлибинского. - СПб.: ЛЭТИ, 2003. - 182 с.

33. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/102/641.htm>. Юдин Б. Г. Системный анализ. (Публ. в Интернет).

34. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/102/642.htm> Блауберг И. В., Юдин Э. Г. Системный подход. (Публ. в Интернет).

35. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. - М.: Советское радио, 1973. - 440 с.

36. Хомяков Д.М., Хомяков П.М. Основы системного анализа. М.: Изд-во мех.-мат.ф-та. МГУ, 1996. - 107 с.

37. Елфимов Г. М., Красников В. С. Основы системного анализа. СПб.: Северо-Западная академия гос. службы, 1998. - 108 с.
38. Гагин В.В. Лезвие жизни (системный анализ). - Одесса, 2001. - 332 с.
39. Данова К.В. Теорія систем в дослідженні шуму пасажирських транспортних засобів / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. - Дн-ск, ПГАСА, 2006. - С. 92-97.
40. Сафонов В.В., Богданов Ю.В., Абракитов В.Э., Мелашич В.В., Диденко Л.М., Стрежекуров Э.Е. Шум реконструкции зданий и сооружений, проблемы его снижения на прилегающих территориях / Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 121 – 130.
41. Сафонов В.В., Богданов Ю.В., Абракитов В.Э., Стрежекуров Э.С., Просандеев А.И. Проблеми зниження шуму на об'єктах і територіях, які прилягають до будівель і споруд, що реконструюють. // Програма Другої Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства». Дніпропетровськ, 14-15 червня 2007. – С. 15.
42. Сафонов В.В., Богданов Ю.В., Абракитов В.Э., Диденко Л.М., Мелашич В.В. Уменьшение шума на реконструируемых территориях / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. Днепропетровск, ПГАСА, 2006. - С. 260-267.
43. Карпов Ю.В., Дворянцева Л.А. Защита от шума и вибрации на предприятиях химической промышленности. М.: Химия, 1991. – 120 с.
44. Елизаров Ю.М. Снижение шума и вибрации при формировании сборного железобетона. М.: Стройиздат, 1970.

– 175 с.

45. Поспелов П.И. Борьба с шумом на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1981. – 88 с.

46. Самойлюк Е.П., Сафонов В.В. Борьба с шумом и вибрацией в строительстве и на предприятиях строительной индустрии. К., 1979. - 152 с.

47. Справочник по судовой акустике, под ред. Ключкина И.И. и Боголепова И.И. Л.: Судостроение, 1978 с. 315-323.

48. Асланов О. Є. Інтерпретація акустичних даних у задачах моніторингу виробничих шумів: Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / О. Є. Асланов Донец. нац. ун-т. - Донецьк, 2005. - 18 с.

49. Федоров В.В. Покращення екологічних показників автотранспортних засобів за рахунок зменшення їх рівня зовнішнього шуму: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02/В.В.Федоров;Нац. трансп. ун-т. К. , 2004. - 19 с.

50. Мякшин В. Н. Борьба с шумом и вибрацией на предприятиях пищевой промышленности. - К.: Техніка, 1985. - 142 с.

51. Лагунов Л. Ф., Осипов Г. Л. Борьба с шумом в машиностроении.- М.: Машиностроение, 1980. - 150 с.

52. Петренко Ю.А. Моделі і методи автоматизації проектування об'єктів будівництва з урахуванням шуму: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.13.12 / Харьк. держ. ун-т радіоелектроніки. - Х., 2000. - 16 с.

53. Пітельгузов М.А. Засоби захисту від шуму та вібрації в машинобудуванні/ М.А.Пітельгузов; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. Луганськ :СНУ, 2003. - 155 с.

54. Новак С.М., Логвинец А.С. Защита от вибрации и шума в строительстве. – К.: Будивэльник, 1990. – С. 32.

55. Малая медицинская энциклопедия: в 6-ти томах / Гл. ред. В.И. Покровский. М.: Изд-во Большая советская энциклопедия, 1992. – тома 1 – 6.

56. Antony A., Ankerman E. Effects of noise on the blad

eosinophil levels and adrenals of mice. // J. Acoust. Soc. Amer. - 1955. - P. - 1144-1149.

57. Суворов Г.А., Шкаринов Л.Н., Денисов Э.И., Овакимов В.Г. Теоретические основы гигиенического нормирования шума. - Вестник АМН СССР, 1981. - С. 62-66.

58. Абракитов В.Е. На шляху до наукових відкриттів. Монографія. Х.: Парус, 2007.

59. Конюшая Ю.П. Открытия советских ученых. М.: Моск. рабочий, 1979. - 688 с.

60. Абракитов В.Е. Маловідома причина негативного біологічного впливу шуму на серцево-судинну систему людини. // Матеріали VI міжнародної науково-методичної конференції 15-16 березня 2007. Київ, 2007. - С. 125-126.

61. Сериков Я.А., Абракитов В.Э. Совершенствование акустического метода контроля надежности железобетонных перекрытий зданий и сооружений коммунального хозяйства // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. № 6. К.: Техніка, 1996.- с. 80 - 81.

62. Абракитов В.Э. На какой частоте измеряется барометрическое давление? // Материалы II международной научно-практической конференции «Стратегические вопросы мировой науки – 2007». Том 11. Химия и химические технологии. Экология. Днепропетровск: Наука и образование, 2007. – С. 60-65.

63. Абракитов В.Е. Акустичне забруднення навколишнього середовища як фактор руйнування інженерних систем і будівельних конструкцій // Програма семінару "Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур", Харків, жовтень-листопад 2006. - С. 7.

64. Абракитов В.Э. Акустическое загрязнение окружающей среды как фактор разрушения инженерных систем и строительных конструкций // Науковий вісник будівництва. Вип. № 38. Харків, ХТУБА ХОТВ АБУ, 2006.

- С. 151-154.

65. <http://abrakitov.narod.ru/Monograph/1-3.htm> Абракітов В.Э. Акустическое загрязнение окружающей среды как фактор разрушения инженерных систем и строительных конструкций (Публ. в Интернет).

66 Бишоп Р. Колебания: Пер. с англ. / Под ред. Я. Г. Пановко. - 3-е изд. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. - 192 с.

67. <http://forum.radeon.ru/viewtopic.php?p=298265>
Занимательные новости из мира техники: Radeon.ru.

68. Н.Е.Boyer, editor, "Atlas of Fatigue Curves," American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073, 1986.

69 Абракітов В.Е. Акустична корозія будівельних конструкцій // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007 - 71(94). - С. - 130-139.

70. <http://www.safework.ru:1888/iloenc?> Энциклопедия по охране и безопасности труда. (Публ. в Internet).

71. <http://www.abrakitov.narod.ru> Безпека життєдіяльності, екологія та охорона праці: Енциклопедичний словник./ Абракітов. В.Е. (Публ. в Internet).

72. Лаврут Т.В., Поночевна Л.Л. Термінологічний словник з основ охорони праці, безпеки життєдіяльності та екології. – Полтава: Видавництво ПВІЗ, 2006. - 120 с.

73. <http://ohrana-bgd.narod.ru/temi.html>. Охрана труда. (Публ. в Internet).

74. Українсько-російський екологічний тлумачний словник / Упор. А. М. Котляр; Пер. В. М. Копоруліна. - Х.: Факт, 2005. - 336 с. (Словник фахівця)

75. Сафонов В.В., Діденко Л.М., Мелашевич В.В., Стрежекуров Е.С., Абракітов В.Е., Піліпенко А.В., Гасило Ю.А., Бровченко К.А., Папірник Р.В. Охорона праці під час виготовлення та монтажу будівель і споруд з

металевих конструкцій / (За ред. В.В. Сафонова). К.: Основа, 2004. – 384 с.

76. Ильичев А.В. Устойчивое развитие и безопасность сложных систем. - М.: Вычисл. центр РАН, 2001. - 189 с.

77. Буравльов Є. П., Гетьман В. В. Сучасний погляд на технологічну безпеку // Стратегічна панорама. - 2005. - № 1.

78. Чирков В.Г. Выбор рациональных технических решений. К.: Техніка, 1991. – 159 с.

79. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др.; Под общ. Ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

80. Дахно И.И., Лало В.Н., Песков Б.С. Определение экономической эффективности изобретений и рационализаторских предложений. К.: Техніка, 1989. - 168 с.

81. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. – 432 с.

82. Физический энциклопедический словарь. - М.: Сов. энцикл., 1987. - 944 с.

83. Справочник по технической акустике / [Х. Г. Дистель, К. Гайке, Р. Герлих и др.]; Перевод с нем. Б. Д. Виноградова, Н. М. Колянцева Л. : Судостроение, 1980 . - 438 с.

84. Справочник по технической акустике / Под ред. Хекла М. И Мюллера Х.А. Пер. с нем. Л.: Судостроение, 1980. – 440 с.

85. Подольный Р.Г. Нечто по имени Ничто. М.: Знание, 1983. – С. 34.

86. Крикунов Г.Н., Беликов А.С., Залуин В.Ф. Безопасность жизнедеятельности. Ч. 1, 2. - Днепропетровск: Пороги, 1992. - 412 с.

87. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/WHY_ZAYCY_NOT_GREEN.htm. В.Э. Абракитов. Почему зайцы не зелёные?

(Публ. в Интернет).

88. Абракітов В.Е. Каустики хвильових фронтів, і їхні метаморфози // Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. трудов. Вып. 28. – Дн-ск, ПГАСиА, 2004. – с. 237-241.

89. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/006/292.htm> К. А. Наугольных. Волновое сопротивление (в акустике). (Публ. в Интернет)

90. www.acoustic.ru/Article_28.html Акустическая энциклопедия. (Публ. в Internet).

91. http://www.acoustic.ru/Article_43.html. Шумомер. Акустическая энциклопедия. (Публ. в Internet).

92. Блинова Л.П., Колесников А.Е., Ланганс Л.Б. Акустические измерения. М.: Изд-во стандартов, 1971. – 272 с.

93. Клюкин И.И., Колесников А.Е. Акустические измерения в судостроении. М.: Судостроение, 1982. – 255 с.

94. Осипов Г.Л., Лопашев Д.З., Федосеева Е.Н. Акустические измерения в строительстве. М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.

95. Брюль и Кьер. Электронная аппаратура. Каталог 1989/90 р. Печать: К.Ларсен и сын А/О, ДК-2600, Глоstrup, Дания. – Рус. - Описание моделей 7005, 7006, 7007.

96. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. Прохоров А. М. – 4-е изд. М.: Сов. Энциклопедия, 1989. – 1632 с.

97. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1985. – 520 с.

98. <http://www.mexanik.ru/136/ann136.htm> Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1985 (Публ. в Интернет 97).

99. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. К.: Наукова

думка, 1989. – 864 с.

100. Абракитов В.Э. Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Дисс.... канд. техн. наук. Днепропетровск, 1995.- 157 с.

101. http://www.abrakitov.narod.ru/Diser/cand_diser.djvu
Абракитов В.Э. Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Дисс.... канд. техн. наук. Днепропетровск (Публ. в Интернет [100]).

102. Абракитов В.Э. Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Автореферат дисс. канд. техн наук. Днепропетровск, 1995.- 16 с.

103 http://www.abrakitov.narod.ru/Diser/aref_cand_diser.djvu.
Абракитов В.Э. Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Автореферат дисс. канд. техн наук. Днепропетровск, 1995. (Публ. в Интернет [102])

104. Абракітов В.Е. Вперше в світі – акустичний лазер створено в Харкові! // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. сборник "Новые решения в современных технологиях". Вып. 47. Харьков, 2004. – С. 83-87.

105. <http://nkj.ru/news/5584/> Акустический лазер | Новости и события | Журнал "Наука и Жизнь".

106. Решение о выдаче патента по заявке № 94032106/03 (031463) (Россия). Способ ослабления интенсивности звуковых волн / Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. - МПК⁶ E 04 B 1/82, E 04 B 1/74. - Оpubл. 27.05.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 15. - С. 110.

107. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/acoustic_lazer.htm
Акустический лазер - изобретение В.Э. Абракитова. (Публикация в Интернет).

108. Абракитов В.Э. Акустический лазер - принципиально новый вид излучателей акустического сигнала // Тезисы докладов XXVIII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ.

Харьков, 1996.- С.85.

109. Абракітов В.Э. Перспективы применения акустических лазеров в науке и технике // Тезисы докладов 1-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- С. 40.

110. Абракітов В.Е. Винайдення акустичних лазерів - як створення нового напрямку в науці і техніці// Матеріали II Міжнародної научно-практичної конференції "Ключевые аспекты научной деятельности - `2007". Том 7. - Естественные науки. - Днепропетровск: Наука и образование, 2007. - С. 19 - 23.

111. <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/sazer.htm> В.Э. Абракітов - Создание акустических лазеров - новое направление в науке и технике.

112. Абракітов В.Е. Математичний опис процесів випромінювання високосфокусованих звукових хвиль вузькоспрямованим джерелом звуку. // Восточно-европейский журнал передовых технологии. N 1/4(25) 2007. Харьков, 2007. - С. 47-54.

113. Абракітов В.Е. Створення акустичних лазерів - новий напрямок в науці і техніці // Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 2006. - С. 6 - 7.

114. Метаморфози

115. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94032106&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 94032106. Способ ослабления интенсивности звуковых волн. (Публ. в Интернет пат. док. [106]).

116. Политехнический словарь / Под ред. Артаболевского И.И. М.: Сов. энциклопедия, 1977. – 608 с.

117. Майер В.В. Полное отражение света в простых опытах. М.: Наука, 1986.- 128 с.

118. Снижение шума на промышленных предприятиях /

Ленинградский государственный проектный институт. М.: Стройиздат, 1971. – 168 с.

119 Трофимова Т.И. Курс физики. Колебания и волны. Учебное пособие. М.: Академия, 2003. - С. 284-291.

120. http://www.acoustic.ru/Article_38.html ЗАО Акустические Материалы и Технологии - Акустическая энциклопедия. (Публ. в Интернет)

121. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/095/885.htm> Реверберация. (Публ. в Интернет).

122 Embleton T.F.W., Olson N., Piercy I.E., Rollin D.F. Inflation in the propagation of sound near the ground // J. Acoust. Soc. Am., 1974. № 55. - p. 485.

123. Piercy I.E., Embleton T.P.W., Sutherland L.C. Review of noise propagation in the atmosphere // J. Acoust. Soc. Am., 1977. - p. 1403-1413.

124.

<http://www.springerlink.com/index/KL56305R484Q1427.pdf>
Trendelenburg P., Einflihrung in die Akustik, Springer Verlag Berlin- Gottingen- Heidelberg, 1961.

125. Коржик Б.М., Абракитов В.Э. Влияние фронтов поверхности распространения звуковой энергии на расчеты уровней звукового давления в целях прогнозирования шумового режима городов // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. №3. К.: Техніка, 1994.- С.105-110.

126. Абракитов В.Э. Типичные формы волновых фронтов разнообразных видов излучений // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Вып. № 38. К.: Техніка, 2002. – С. 215 – 219.

127. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Осипова Г.Л. и Юдина Е.Я. М.: Стройиздат, 1987. – 558 с.

128. Градостроительные меры борьбы с шумом / Осипов Г.Л. и др. М.: Стройиздат, 1975. – 215 с.

129. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л.: Энергия, 1973. – 200 с.
130. Чунгузов И.П. Длинные акустические волны в движущейся атмосфере. Автореферат дисс. д. ф.-м. н. М., 1992.- 28 с.
131. Патент № 2077826 (Россия). Акустический лазер Абракитова / Абракитов В.Э. - МПК⁶ G10K 5/00; Оpubл. 20.04.97, Бюл. № 11.
132. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2077826&mpkcls=G10K005&sort=2> Патент № 2077826 (Россия). Акустический лазер Абракитова. Официальная публикация в Интернет патентного документа [131].
133. <http://www.install-pro.ru/archive/008/64-69.shtml> «Акустические Материалы и Технологии» - Три взгляда на акустику помещений. / А. П. Ефимов. Три взгляда на акустику помещений. (Публ. в Интернет).
134. Порядков В.И. Проектирование малошумных механизмов. М.: Машиностроение, 1991. – 64 с.
135. Абракітов В.Е. Утилізація звукової енергії – новий напрямок в науці і техніці. – Харків, Парус, 2007. - 80 с.
136. Конарева Н.Е. Обеспечение акустической безопасности на территориях прилегающих к промышленным предприятиям. Автореферат дисс. канд. техн наук. Днепропетровск, 1992. - 16 с.
137. Маслов Н.В. Градостроительная экология / Н.В.Маслов; Под ред.: М.С.Шумилов. М. :Высшая школа, 2002. - 284 с.
138. Осипов Г.Л., Коробков В.Е., Климухин А.Л. Защита от шума в градостроительстве / Под ред. Осипова Г.Л. - М.: Стройиздат, 1993. - 95 с.
139. Осипов Г.Л., Юдин Е.Я., Хюбнер Т. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Осипова Г.Л. - М.:

Стройиздат, 1987. - 96 с.

140. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в градостроительстве. К.: Будівельник, 1975. – 126 с.

141. Самойлюк Е.П., Денисенко В.И., Пилипенко А.П. Борьба с шумом в населенных местах. К.: Будівельник, 1981. – 144 с.

142. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / В.И. Заборов, М.И. Могилевский, В.Н. Мякшин, Е.П. Самойлюк; Под ред. В.И. Заборова. – К.: Будивэльник, 1989. – С. 85.

143. Крейтан В.Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах. М.: Стройиздат, 1990. – 260 с.

144. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/106/823.htm> Г. Л. Осипов. Строительная акустика. (Публ. в Internet).

145. Дидковский В.С., Карачун В.В., Заборов В.И. Проектирование ограждающих конструкций с оптимальными звуко- и виброизоляционными свойствами. К.: Будивэльник, 1991. - 120 с.

146. Борисов Л.П., Гужас Д.Р. Звукоизоляция в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

147. Борьба с шумом методами звукоизоляции / Заборов В.И., Клячко Л.Н., Росин Г.С. М.: Стройиздат, 1964. – 122 с.

148. Осипов Л.Г., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. Звукоизоляция и звукопоглощение: [Учеб. пособие для вузов "Пром. и гражд. стр-во" и "Теплоснабжение и вентиляция"/Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др.]; Под ред.: Г.Л. Осипов, В.Н. Бобылев. М. :АСТ, 2004. - 450 с.

149. Борисов Л. Объёмные (функциональные) поглотители звука. Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: Науч.-исслед. ин-т строит. физики, 1966. - 22 с.

150. Абракитов В.Э. Микроструктура пористых материалов и их звукопоглощающая способность // Тезисы

докладов XXVII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХИИГХ. Харьков: ХИИГХ, 1994.- С. 59 - 60.

151. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/INFLUENCE_MIKROSTRUKTURU_PORISTYN_MATERIAL.htm

Абракитов В.Э., Данова К.В. Влияние микроструктуры пористых материалов на их звукопоглощающие свойства. (Публ. в Интернет).

152. Абракитов В.Э., Русова В.А. Многослойная звукопоглощающая панель // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 58. К.: Техніка, 2004. – С. 239 – 243.

153 http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Laminated_anti-sound_panel.htm . Абракитов В.Э., Русова В.А. Многослойная звукопоглощающая панель. (Публ. в Интернет [152]).

154. Сметанин И. С. Исследование и применение пен с жидкой дисперсионной средой для снижения шума: Автореферат дис. канд. техн. наук / ВНИИ охраны труда. Л., 1989. - 16 с.

155. Юрьев А.А. Комбинированное шумопонижение. Автореферат дисс. канд. техн. наук. К.: Киевский... политехн. ин-т. Кафедра акустики и звукотехники, 1955. - 17 с.

156. Абракітов В.Е., Карпалюк И.Т. Шум перетворюється в... електроенергію // Міське господарство України: Масовий інформаційний виробничо-технічний журнал. К., 1996, № 4 (136).- С. 35.

157. Заявка на патент № 94028633/33 (Россия) Способ утилизации звуковой энергии и звукоутилизирующая панель / Абракитов В.Э., Абракитова Л.А., Коржик Б.М., Сериков Я.А. - МПК⁶ Е 04 В 1/86. - Опубл. 20.05.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 14. - с. 108.

158. [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Salvaging to sound](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Salvaging_to_sound)

energy - a new direction in science and technology.htm.
Абракизов В.Э. Утилизация звуковой энергии - новое направление в науке и технике. (Публ. в Интернет).

159. Патент № 10836А (Україна). Спосіб перетворення звукової енергії та звукоперетворююча панель / Абракізов В.Е., Абракізова Л.О., Коржик Б.М., Сериков Я.О. - МКВ⁵ Е04В 1/86. Опубл. 25.12.96. К.: Промислова власність: Офіційний бюлетень, 1996.- № 4.

160. Решение о выдаче патента по заявке № 94028633/33 (Россия) от 14.01.97. Звукоутилизирующая панель / Абракизов В.Э., Абракизова Л.А., Коржик Б.М., Сериков Я.А. - МПК⁶ Е04В 1/86.- Опубл. 20.05.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 14. - с. 108.

161. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94028633&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 94028633. Звукоутилизирующая панель. (Публ. в Интернет пат. док. [160]).

162. Решение о выдаче патента по заявке № 94028915/03(028717) (Россия). Звукопоглощающая панель "Утилизатор звуковой энергии" / Абракизов В.Э., Сериков Я.А. - МПК⁶ Е 04 В 1/86. Опубл. 29.07.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996, № 14.- с. 108.

163. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94028915&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 94028915. Звукопоглощающая панель "Утилизатор звуковой энергии". (Публ. в Интернет пат. док. [162]).

164. Абракизов В.Э., Карпалюк И.Т. Утилизатор звуковой энергии. Информационный листок ИЛ №53-95 Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

165. Абракизов В.Э., Русова В.А. Звукоотражающая

- панель // Науковий вісник будівництва. Вип. №. 28. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2004. – с. 277-281.
166. Абракитов В.Э. Новые средства борьбы с шумом // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности Международный экологический конгресс. Санкт-Петербург 16-18 июня 1999 г. - т.3. – С. 186.
167. Коржик Б.М., Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. Поляризация звуковых волн в строительных конструкциях и материалах // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ІСДО, 1994.- С. 132 - 135.
168. Абракитов В.Э. Новый способ борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях // Науковий вісник будівництва. Вип. № 18. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2002. – С. 204-206.
169. Заявка на открытие № ОТ ОВ 56 (Россия). Зависимость коэффициентов звукопоглощения и отражения звука от характеристик среды распространения падающей и пропущенной звуковой волны / Абракитов В.Э. – Заявл. 25.05.94.
170. Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. Глобальная научная теория, объясняющая процессы снижения шума при переходе звуковой волной границы раздела сред. // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. №. 64. К.: Техніка, 2005. – С. 63-70.
171. <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/theory.mht> Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. Глобальная научная теория, объясняющая процессы снижения шума при переходе звуковой волной границы раздела сред.
172. Абракитов В.Э. Глобальная научная теория снижения шума при пересечении звуковой волной границы раздела сред. // Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 2005. - С. 123 - 124.
173. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Polarization_of_the

[sound.htm](#) В.Э. Абракизов. Поляризация звука – один из наиболее перспективных путей борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях. Сущность предлагаемой научной теории поляризации звука (Публ. в Internet).

174. Абракизов В.Э. Поляризация звука – один из наиболее перспективных путей борьбы с распространением структурного шума в строительных конструкциях // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип.. № 8. Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 2002. – С. 189 – 196.

175. Патент № 21251А (Україна). Карбюраторний електроагрегат / Абракізов В.Е. - МПК⁵ Н 02К 35/00. Опубл. 27.02.98. Бюл. № 1.

176. Заявка на пат. № 94037124 (Россия). Электроагрегат «Абракизов» / Абракизов В.Э. - МПК⁶ F01B001/12 H02K035/00, F01B023/10.- Опубл. 20.08.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 23.

177. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94037124&sort=2&flsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> . Пат. отд.: № публ. пат. 94037124. Электроагрегат «Абракизов». (Публ. в Интернет пат. док. [176]).

178. Горик О.В., Школяр Т.А. Експериментальні дослідження тришарової панелі із м'яким середнім шаром // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Випуск № 3. Одеса: ВМК «Місто майстрів», 2001 р. – С. -161-166.

179. Абракізов В.Е. Алгоритм розрахунку конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку // Науковий вісник будівництва. Вип. № 19. Харків:

ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2002. – С. 113-117.

180. Абракітов В.Е. Програма для обчислення конструктивних параметрів багатошарових звукоізолюючих панелей типу «сандвіч» з використанням явища поляризації звуку // Науковий вісник будівництва. Вип. №. 29. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2004. – С 226-230.

181. А.с. № 1187286 СССР, МКИ Н04R 1/10, 1985.

182. Патент № 2078483 (Россия). Головной телефон Абракітова / Абракітова Л.А., Абракітов В.Э. - МПК⁶ Н04R 1/10; Опубл. 27.04.97, Бюл. № 12.

183. http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2078483&sort=2&fls_ob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432. Пат. отд.: № публ. пат. № 2078483. Головной телефон Абракітова. (Публ. в Интернет пат. док. [182]).

184. Заявка на пат. N ВЗА06569 (Україна). Головной телефон Абракітова / Абракітов В. Е.- Заявл. 20.10.93. МПК Н04R1/10.

185. Скларов В.Е. Стереофонические головные телефоны и их применение. М.: Энергия, 1977. – с. 13 – 17.

186. ГОСТ 12.4.051-87. ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов слуха. Общие технические требования и методы испытаний.

187. Гліненко Л.К., Сухоносів О.Г. Основи моделювання технічних систем. - Львів, 2003. - 176 с.

188. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука: Пер. с англ. - М.: Мир, 1978. - 302 с.

189. Abrakítov V.E., Zakharov Yu.I., Safonov V.V. Methods of evaluation and prediction of the noise environment in building constructions // Noise-93 International Conference. St. Peterburg, May 31 - June 5, 1993.- p.163.

190. Александров Л.В., Карпова Ю.А., Шевелев Н.П. Роль изобретений в охране окружающей среды. М.: ВНИИПИ,

1991. – 84 с.

191. <http://www.silencelab.ru/13.html>. Silencelab.ru - Лаборатория тишины. Раздел проекта звукоизоляция и акустика. (Публ. в Интернет).

192. <http://octavams.ru/solutions/virtual/acoustics/intro/overview/>

Акустическое моделирование: составная часть процесса проектирования. (Публ. в Интернет).

193. <http://rav.sio.rssi.ru/shkola/67.html>. Акустическое моделирование морских акваторий. Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН. (Публ. в Интернет).

194. <http://foroff.phys.msu.su/phys/programs/nn/mas/fiz.htm> Физическое моделирование распространения и рассеяния акустических волн. (Публ. в Интернет).

195. Абракітов В.Е. Моніторинг шумового забруднення сучасних міст. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний соціокультурний простір». 20-25.12.2004, Київ, 2004. – ч. 1. – 1 с.

196. Абракітов В.Е. Роль моделювання акустичних процесів при оптимізації шумового режиму сучасного міста. // Науковий вісник будівництва. Вип. 30. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2005. - Т. 2. - С. II-190 - 195.

197. Абракітов В.Э. Совершенствование методов прогнозирования шумового режима урбанизированной среды с целью обеспечения акустического комфорта жителей современного города // Програма роботи секції № 7 „Проблеми будівництва та міського господарства” Першій обласній конференції молодих науковців „Тобі, Харківщино, - пошук молодих”, що проводилась в межах форуму „Освіта, наука, виробництво – шляхи інтеграції”, 19-20 березня 2002 р. – С. 4.

198. Абракітов В.Е. Удосконалювання методів прогнозування шумового режиму з метою забезпечення акустичного комфорту жителів сучасного міста // Тезиси

докладов XXXII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ. Харьков, 2004. - С.86.

199. www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/090/378.htm С. Л. Вишневецкий. А. Н. Колмогоров. Подобия теория. (Публ. в Интернет).

200. Ногид Л.М. Теория подобия и размерностей. М.: Судпромгиз, 1959. – 96 с.

201. Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. – 432 с.

202. Соколов Э.Т., Коваленко В.Е. Зеркало, или Путешествие в мир подобных явлений. Минск, Вышэйшая школа, 1985.- 237 с.

203. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/077/388.htm>. Моделирование физическое. (Публ. в Интернет).

204. Абракітов В.Е. Моделювання шуму від транспортних потоків та промислових об'єктів великої довжини при оптимізації шумового режиму сучасного міста // Науковий вісник будівництва. Вип. № 39. Харків, ХТУБА ХОТВ АБУ, 2006. - С. 287 – 291.

205. Патент № 2102793 (Россия). Линейный источник шума / Сафонов В.В., Абракітов В.Э. - МПК⁶ G 10 K 1/00. Оpubл. 20.01.98, Бюл. № 2.

206. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2102793&sort=2&flsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 2102793. Линейный источник шума. (Публ. в Интернет пат. док. [205]).

207. Патент № 19442А (Україна). Лінійне джерело шуму. /Сафонов В.В., Абракітов В.Е., Захаров Ю.І. - МПК⁶ G10R 1/00. Оpubл. 25.12.97, Бюл. № 6.

208.

[http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Linear source of the noise. htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Linear%20source%20of%20the%20noise.htm) В. Абракітов: Патент № 2102793. Линейный источник шума. (Публ. в Internet)

209. Абракитов В.Э., Коржик Б.М. Совершенствование методов физического моделирования звука в целях повышения надежности систем городского хозяйства // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ИСДО, 1993. - с.84-91.
210. Абракитов В.Э. Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. – Харьков: АО ХГПИ, 1997. – 40 с.
211. <http://abrakitov.narod.ru/Monograph/abrakitov-brochure.djvu> Абракитов В.Э. Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. (Публ. в Интернет).
212. Абракітов В.Э. Аналогове та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об'єкті, що захищається. Друге видання, перероблене та доповнене. – Харків: Парус, 2007. – 108 с.
213. Гардашьян В.М. Условия тождественности акустических свойств помещения и модели. // Труды НИКФИ, № 28, М., 1959.
214. Ильина Н.А., Карпалюк И.Т., Абракитов В.Э. Смещение физических параметров при аналоговом моделировании процессов распространения света в целях повышения эффективности и надежности систем городского хозяйства // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ИСДО, 1994.- с.122-125.
215. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/OFFSET_PARAMETER_AT_MODELING_of_the_PHYSICAL_PROCESSES.htm. Абракитов В.Э. Смещение параметров

при моделировании физических процессов (Публ. в Internet).

216. Борьба с шумом / Под ред. Юдина Е.Я. М.: Издательство литературы по строительству, 1964. – 701 с.

217. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/053/328.htm>. И. Г. Русаков. Импеданс акустический. (Публ. в Интернет).

218. Патент № 22943А (Україна). Спосіб досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів / Сафонов В.В., Абракітов В.Е, Захаров Ю.І. - МПК⁶ G 09 В 23/14. Опубл. 05.05.98.

219. Абракітов В.Э. Система констант подобия при моделировании физических явлений материального мира // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 35. К.: Техніка, 2002. – С.38-43.

220. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/SYSTEM_of_the_CONSTANTS_of_the_RESEMBLANCE.htm. Абракітов В.Э. Система констант подобия при моделировании физических явлений материального мира (Публ. в Интернет).

221. <http://abrakitov.narod.ru/Monograph/abrakitov2.djvu> Абракітов В.Э. Аналогове та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об'єкті, що захищається. Друге видання, перероблене та доповнене. (Публ. в Интернет).

222. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/077/387.htm> Моделирование аналоговое (Публ. в Интернет).

223. Кнудсен Верн О. Архитектурная акустика. Пер. с англ. Я.А. Копиловича. Харьков - Киев: ГОНТИ, 1936. - 526 с.

224. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. – 384 с.

225. www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/125/952.htm Электроакустические и электромеханические аналогии. (Публ. в Интернет).

226. Kudriavtsev E.P., Safonov V.V., Abrakитov V.E. Calculations of the noise propagation by means of electroacoustic analogy method // Noise-93 International Conference. St. Peterburg, May 31 - June 5, 1993.- P.165.
227. Леушин П.И. Исследования по противошумовому благоустройству городов. Дисс. канд. техн. наук. Л., 1952.
228. Вулис Л.А., Гуревич А.М., Клиндер В.Г. Световое моделирование лучистого теплообмена. // „Теплоэнергетика“-1961.-№2.
229. Авторское свидетельство 1019480 СССР, МКИ G 09 B 23/14. Опубл. 1983.
230. Брэгг У.Г. Мир света. Мир звука.: Пер. с англ. / Под ред. акад. И.В. Обреимова. М.: Наука, 1967. - 335 с.
231. Жигулев В.Н., Киркинский А.И. Общие свойства волн. Элементы акустики. М.: МФТИ, 1981. – 69 с.
232. Крауфорд Ф. Волны.— М.: Наука, 1976.— 528 с.
233. Кок У. Звуковые и световые волны. / Пер. с англ. М.: Мир, 1966. - 160 с.
234. Абракітов В.Е., Сафонов В.В. Аналогія хвильових характеристик звукового та оптичного випромінювання // Інтенсифікація будівництва: Зб. наук. праць. К.: ІСДО, 1994.- С. 15-20.
235. Абракітов В.Э., Коржик Б.М. Аналогия волновых явлений звукового и оптического излучений // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. № 4. К.: Техніка, 1995.- С.36-37.
236. Абракітов В.Э. Взаимосвязь сходственных параметров модели и природы при аналоговом моделировании процессов распространения шума// Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності" Харків, 2004. – С. 82.
237. Абракітов В.Э., Сафонов В.В. Применение логарифмического масштаба в измерениях световых

величин / Днепропетровский инженерно-строительный институт - Днепропетровск, 1992.- 9 с. Деп. в Укр. НИИНТИ 02.07.92 № 979-Ук 92.

238. Сокуренок В.И., Крадожен В.И. Методика светового моделирования излучающих систем // Тези доповідей четвертої міжнародної конференції "Наука і освіта 2001". Том 14. Технічні науки. - Дніпропетровськ.: Наука і освіта 2001.- С. 24-25.

239. Самойлюк Е.П., Сокуренок В.И. Исследование акустических характеристик шумозащитных мероприятий на световых моделях. // Материалы международного симпозиума „Безопасность жизнедеятельности» в XXI веке . - Днепропетровск: Украина, 2001. – С. 60.

240. Сокуренок В.И., Мосин И.В. Применение световой аналогии к исследованию характеристик шумозащитных мероприятий. // Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. Трудов. Вып. 28. – Дн-ск, ПГАСиА, 2004. – С. 232-236.

241. Абракитов В.Э. Устройство для визуализации зон зашумленности на территории городской застройки. Информационный листок ИЛ №79-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

242. [http://discovery.h11.ru/Abrakitov/VISUALIZATION of the PICTURE ZASHUMLYONNOSTI TOWN ZASTROYKI WAY of ANALOG MODELING.htm](http://discovery.h11.ru/Abrakitov/VISUALIZATION_of_the_PICTURE_ZASHUMLYONNOSTI_TOWN_ZASTROYKI_WAY_of_ANALOG_MODELING.htm) Абракитов В.Э.; Сафонов В.В. Визуализация картины зашумлённости городской застройки способами аналогового моделирования. (Публ. в Интернет).

243. Абракитов В.Е., Дмитрієв С.Л. Пристрій візуалізації зон зашумованості міської забудови // Тези доповідей науково-методичної конференції „Безпека життєдіяльності”. Харків, 2002. – с. 58-60.

244. Сафонов В.В., Абракитов В.Э. Визуализация распространения шума за преградами. Сборник трудов

научно-практической конференции “Охрана труда в промышленности”. К., 1996 г.

245. Деклараційний патент на винахід № 69935А (Україна). Пристрій для візуалізації зашумованості міської забудови. / Сафонов В.В., Абракітов В.Е., Богданов Ю.В., Бауліна Г.Ю. - Заявл. 16.12.2003., МПК⁷ G01H17/00. Опубл. 15.09.2004. Бюл. № 9.

246. Патент № 20369 (Україна). Пристрій візуалізації картини зашумованості міської забудови / Сафонов В.В., Захаров Ю.І., Абракітов В.Е. - МПК⁶ G01H 9/00. Опубл. 15.07.97.

247. Патент № 2058601 (Россия). Устройство для визуализации картины зашумленности городской застройки / Сафонов В.В., Захаров Ю.И., Абракитов В.Э. - МПК⁶ G10K 1/00.- Опубл. 20.04.96. Бюл. № 11.

248. http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2058601&sort=2&fls_ob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432 Пат. отд.: № публ. пат. 2058601. Устройство для визуализации картины зашумленности городской застройки. (Публ. в Интернет патентного документа [247]).

249. Абракітов В.Э., Сафонов В.В. Визуализация картины зашумленности городской застройки способами аналогового моделирования // Збірник наукових праць інституту безперервної фахової освіти. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2002. – с. 3-8.

250. Патент № 10589А (Україна). Люмінесцентна лампа / Карпалюк І.Т., Абракітов В.Е. - МКВ⁵ Н 01 J 61/30; Опубл. 25.12.96. Бюл. № 4.

251. Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. Компактная люминесцентная лампа. Информационный листок ИЛ №76-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

252. Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. Газоразрядная лампа низкого давления, безопасная по фактору растекания

ртутных паров.// Тезисы докладов 1-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 52.

253. Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т. Газорозрядна лампа низького тиску, безпечна з фактору розтікання ртутної пари // Питання соціоекології: Матеріали Першої всеукраїнської конференції "Теоретичні та прикладні аспекти соціоекології. Львів, 7 - 11 жовтня 1996 р. Львів, 1996.- т.2.- с. 231 - 232.

254. Ильина Н.А., Журавлев В.А., Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э., Корлюка О.Ю. Малогабаритное осветительное устройство медицинского назначения // Тезисы докладов 2-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 7.

255. Корлюка О.Ю., Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э. Метод расчета освещенности с повышенной точностью // Тезисы докладов 2-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 8.

256. Заявка на пат. N 96101618 (Россия). Самодемеркуризирующаяся газонаполненная лампа низкого давления / Карпалюк И. Т., Абракітов В. Э. Заявл. 29.01.96.

257. Заявка на пат. N 96102120. Люминесцентная лампа (Россия). / Карпалюк И. Т., Абракітов В. Э. Заявл. 12.02.96.

258. Заявка на пат. N 96102463 (Россия). Светильник. / Карпалюк И. Т., Абракітов В. Э. Заявл. 9.02.96.

259. Заявка на пат. N 95117274 (Россия). Фара. / Карпалюк И. Т., Абракітов В. Э. Заявл. 18.10.95.

260. Заявка на патент № 94076397 (Україна). Пристрій квазіаналогового моделювання процесів розповсюдження звуку на території міста / Абракітов В.Е., Захаров Ю.І., Сафонов В.В. – Заявл. 26.07.94.

261. Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э. Устройство отображения информации. Информационный листок ИЛ

№51-95 Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

262. Патент № 12373А (Україна). Кінескоп / Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т. - МПК⁶ Н01J 31/08. Опубл. 28.02.97. К.: Промислова власність: Офіційний бюлетень, 1997.- № 1.

263. Заявка на патент № 94031610/ 07(031480) (Россия). Кінескоп / Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. - МПК⁶ Н 01 J 31/08.- Опубл. 20.07.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996, № 20.- с. 131.

264. Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. Кінескоп. Інформаційний листок ІЛ №52-95.Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

265. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94031610&sort=2&flsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 94031610. Кінескоп. (Публ. в Интернет пат. док. [262, 263]).

266. Патент № 2081490 (Россия). Заземляющее устройство в электрических сетях с изолированной нейтралью / Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т. - МПК⁶ Н02В 1/16, Н01 4/66. Опубл. 10.06.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996, № 16.- с. 126.

267. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2081490&sort=2&flsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432>. Пат. отд.: № публ. пат. 2081490. Заземляющее устройство в электрических сетях с изолированной нейтралью. (Публ. в Интернет пат. док. [266]).

268. Патент № 24461А (Україна). Заземляющий пристрій в електричних мережах з ізольованою нейтраллю / Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т. - МКВ⁵ Н 02 Н 3/22. Опубл. 30.10.98. Бюл. № 5.

269. Абракітов В.Э. Защитное заземление электроустановок в трехфазных сетях электрического тока напряжением до 1000 В // Тезисы докладов XXVIII

научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 1996. - с.85.

270. Патент № 15299А (Україна). Пристрій занулення електроустановок в мережах із заземленою нейтраллю / Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т. - МКВ⁵ Н02Н 3/22. Опубл. 30.06.97. Бюл. № 3.

271. Заявка на пат. N 96110566 (Россия). Устройство зануления электроустановок в сетях с заземленной нейтраллю / Абракітов В. Э., Карпалюк И. Т. Заявл. 27.05.96.

272. Патент № 15212А (Україна). Спосіб аналогового моделювання процесів розповсюдження звукових хвиль /Абракітов В.Е., Коржик Б.М., Серіков Я.О., Карпалюк І.Т. - МПК⁶ G09В 23/14, Опубл. 30.06.97, Бюл. № 3

273. Заявка на патент № 94018110 (Россия) Способ аналогового моделирования процессов распространения звуковых волн / Абракітов В.Э., Коржик Б.М., Серіков Я.А., Чеботарева А.В. - МПК⁶ G 06 G 7/48.- Опубл. 27.02.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 1 - с. 116.

274. Абракітов В.Э. О возможности аналогового моделирования процессов распространения звуковых волн радиоволнами // Тезисы докладов XXVIII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 1996.- с.84.

275. Заявка на патент № 94018168/12 (Россия) Устройство аналогового моделирования процессов распространения звука на территории города / Абракітов В.Э., Коржик Б.М., Серіков Я.А., Чеботарева А.В.- МПК⁶ G 09 В 23/14.- Опубл. 10.01.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 1.- ч.1.-с. 126.

276. Заявка на патент № 9407398 (Україна). Пристрій аналогового моделювання процесів розповсюдження звуку на території міста / Сафонов В.В., Абракітов В.Е., Коржик

- Б.М., Серіков Я.О. – Заявл. 26.07.94.
277. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/ANALOG_MODELING_of_the_PROCESSES_of_the_SPREADING_the_SOUND.htm. Абракітов В.Э., Нестеренко С.В. Аналоговое моделювання процесів розповсюдження звуку на території міста. (Публ. в Інтернет)
278. Веретина И.А., Калашникова Н.К., Руднева Е.А., Лазаренко Н.В., Прохода А.С., Любельский В.В., Гончаренко И.А. Программное обеспечение акустических расчётов // Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 91-94.
279. Абракітов В.Е. Точність, вірогідність та оцінка погрешності при моделюванні акустичних процесів // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. №. 60. К.: Техніка, 2004. – С. 251-256.
280. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/075/018.htm>. Г. А. Гольдберг, В. В. Фурдурев. Архитектурная акустика. (Публ. в Інтернет)
281. Кремер Л. Объем информации, необходимый для акустической характеристики помещения // Проблемы современной акустики. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. - С. 137-140.
282. <http://www.major-strogino.ru/punt/a6105.html>. Акустик. (Публ. в Інтернет)
283. Абракітов В.Е., Коржик Б.М. Розрахунок часу реверберації звуку за методикою Абракітова / Харківський інститут інженерів міського господарства - Харків, 1994.- 10 с. - Деп. в ДНТБ України 25.11.1994 №2242-Ук94.
284. Абракітов В.Е. Методика розрахунку часу реверберації звуку в приміщеннях // Науковий вісник будівництва. Вип. 41. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2007. - С. 305-311.
285. Абракітов В.Е. Тринадцятирічний досвід розрахунку

часу реверберації в приміщеннях за методикою Абракітова // Збірник матеріалів ІV міжрегіональної науково-практичної конференції "Психологічні та технічні аспекти безпеки праці, життя та здоров'я людини". 15 травня 2007 року. Полтава, 2007. - С. 5 - 7.

286. <http://www.audiostop.ru/wso/sound44.html>.

Звукоізоляція студій звукозаписи. Строительство. Акустическое проектирование. (Публ. в Интернет).

287. Патент № 9518А (Україна). Спосіб оперативного регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях (варіанти) / Абракітова Л.О., Абракітов В.Е. - МПК⁶ G10K 15/08. Опубл. 30.09.96. Бюл. № 3.

288. Абракітов В.Е. Оперативне регулювання часу реверберації звуку в приміщеннях // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип.. № 7. Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 2001. – С. 279 - 285.

289. Авторское свидетельство СССР N 1516585, кл. E 04 B 1/82, 5/52.

290. Патент № 2083775 (Россия). Звукоизолирующая панель с максимально возможной звукоизолирующей способностью / Абракітов В.Э. - МПК⁶ E04B 1/82. Опубл. 10.07.97. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1997, № 19.

291. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2083775&sort=2&fIsob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> . Пат. отд.: № публ. пат. 2083775.

Звукоизолирующая панель с максимально возможной звукоизолирующей способностью. (Публ. в Интернет пат. док. [290]).

292. Заявка на пат. N В42 00682 (Україна). Звукоізолююча панель з максимально можливою звукоізолюючою здібністю. / Абракітов В.Е. - Заявл. 25.02.94.

293. Патент № 2084968 (Россия). Шумоизолирующий коффердам судна / Абракитов В.Э., Абракитова Л.А. - МПК⁶ G 10 K 11/00. Оpubл. 20.07.97. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1997, № 20.
294. Заявка на пат. N B3A 06560 (Україна). Шумоізолюючий коффердам. / Абракітов В.Е., Абракітова Л. О. - Заявл. 20.10.93.
295. http://discovery.h11.ru/Abrakitov/Invention_2084968.htm В.Э. Абракитов: Шумоизолирующий коффердам. (Расширенная публ. в Интернет [293]).
296. http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2084968&sort=2&fls_ob=%u0410%u0431%u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432 . Пат. отд.: № публ. пат. 2084968. Шумоизолирующий коффердам судна. (Официальная публ. в Интернет пат. док. [293]).
297. Абракитов В.Э., Карпалюк И.Т. Звукоизолирующий элемент. Информационный листок ИЛ №75-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.
298. Рішення про видачу патенту по заявці № 94051488 (Україна) від 26.06.96. Звукоізолююча панель / Абракітов В.Е., Коржик Б.М., Серіков Я.О. - МПК⁵ E04B 1/82. Оpubл. 29.12.94. К.: Промислова власність: Офіційний бюллетень, 1994.- № 8.
299. Заявка на пат. N B43 00812 (Україна). Пристрій контролю та вимірювання звукоізолюючої здібності шумозахисних засобів. / Абракітов В.Е., Абракітова Л. О. - Заявл. 21.04.94.
300. Абракитов В.Э. Система эргономической оценки реконструируемых территорий городов по критерию их акустического комфорта // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. Международный экологический конгресс. Санкт-Петербург 14-16 июня 2000 г. – т. 2. – С. 252.
301. Абракитов В.Э. Эргономическая оценка

реконструируемых территорий городов по критерию их акустического комфорта // Тезисы докладов XXX научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 2000.- С.75.

302. Абракітов В.Е. Вдосконалення методів і засобів боротьби з шумом, випромінювання звуку та моделювання процесів його розповсюдження // Тези доповідей науково-методичної конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 2001. – С. 62-63.

303. Абракітов В.Э., Нестеренко С.В. Аналоговое моделирование процессов распространения звука на территории города // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Вып. № 121. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2002. – С. 87 – 94.

304. Абракітов В.Е. Конструювання шумозахисних вікон для захисту квартир та інших приміщень від акустичного дискомфорту // Науковий вісник будівництва. Вип. 31. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2005. - С. 210-214.

305. <http://discovery.h11.ru/Abrakitov/rekonstr.htm> Абракітов В.Е. Шумозахисні вікна як один з заходів захисту квартир та інших приміщень від акустичного дискомфорту. (Публ. в Інтернет).

306. Абракітов В.Э., Данова К.В. Влияние микроструктуры пористых материалов на их звукопоглощающие свойства. // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 42. К.: Техніка, 2002. - С. 190-194.

307. Адамсон А.А. Исследование транспортного шума г. Таллина. Автореферат дисс ... канд. техн. Наук. Таллин, 1965 . – 26 с.

308. Ваель Х.Ф. Айш. Забезпечення безпеки примігстральної території з малоповерхневою забудовою

за чинником шуму: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01/Х.Ф. Айєш Ваель; Придніпр. держ. акад. буд-ва та архіт. Дніпропетровськ, 2005. - 22 с.

309. Селіванов С.Є., Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку на вузьких вулицях міста та захист житлових будівель від транспортного шуму // Науковий вісник будівництва. Зб. наук. праць. Вип. № 40. - С. 208-214.

310. Сафонов В.В., Абракітов В.Е., Богданов Ю.В. Моделювання акустичних процесів методом аналогії/ Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вип. 38. Днепропетровск, ПГАСА, 2006. - С. 124 - 133.

311. Селіванов С.Є., Абракітов В.Е. Захист житлових будівель від транспортного шуму // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вип. №. 76. К.: Техніка, 2007. – С. 391-399.

312. <http://www.asph.ru/2005-06-01/3/> Автосфера | В недрах лабораторий Госстандарта. (Публ. в Інтернет).

313.

<http://www.sibpatent.ru/default.asp?khid=24467&code=550181&sort=1> Информация о технологии. Код ГРНТИ: 550181. Реверберационная камера для измерения шума машин. Дата регистрации: 27.11.2003. Область применения: Измерение, испытания, контроль и управление качеством. (Публ. в Інтернет).

314. http://www.akin.ru/r_rever.htm.

Комплекс реверберационных камер. (Публ. в Інтернет).

315. <http://airs.ru/articles/conditioning/technologies-conditioners-lg> Технологии кондиционеров LG. (Публ. в Інтернет).

316. ГОСТ 28100-89. (СТ СЭВ 6085-87) Защита от шума в строительстве. Глушители шума. Методы определения акустических характеристик.

317. СТ СЭВ 1929-79 Шум. Метод измерения

звукопоглощения в реверберационной камере.

318. ГОСТ 26417-85. Материалы звукопоглощающие строительные. Метод испытаний в малой реверберационной камере.

319. ГОСТ 12.1.027-80. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в реверберационном помещении.

320. ГОСТ 12.1.025-81. Шум. определение шумовых характеристик источников шума в реверберационной камере.

321. Авторское свидетельство СССР N 1270251, кл. E 04 B 1/82, 1986.

322. Компанец А.С. Законы статистической физики. Ударные волны. Сверхплотное вещество. М.: Наука, 1976. – 286 с.

323. Мезенцев В. Чудеса. Популярная энциклопедия. Алма-Ата: Главная редакция казахской советской энциклопедии, 1990. - С. 8 – 10. - Т. 2.

324. Абракітов В.Е. Хитрощі звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю... // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 40. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - С. 126-132.

325. Юферов А.П. Повышение звукоизоляции двухстенных конструкций в зданиях. Дисс....канд. техн. наук. - Нижний Новгород, 1997. - 136 с.

326. Beranek L., Work G. Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets // J.Acoust. Soc.Amer. - 1949. - 21. - P. 419.

327. Кочкин А.А. Процесс самосогласования волнового поля воздушного промежутка // Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. – С. 41 – 44.

ДОДАТКИ

Додаток 1.

Взаємодія хвильових характеристик амплітудних, тимчасових, частотних, просторових і середовища поширення, що визначають хвильові явища

Група характеристик	Хвильові явища
$P \rightarrow C \rightarrow A$	Взаємозв'язок коефіцієнтів відбиття ρ , поглинання α і пропусчення τ
$C \rightarrow P$	Відбиття
$C \rightarrow \chi$	Дисперсія
$C \rightarrow P$	Дифракція
$C \rightarrow \chi$	Дихроїзм
$P \rightarrow \chi$	Доплера ефект
$A \rightarrow T$	Імпульс хвильовий
$P \rightarrow A$	Інтерференція
$\chi \rightarrow T$	Когерентність
$A \rightarrow C$	Люмінесценція
$T \rightarrow$ (всі інші характеристики)	Модуляція коливань
$C \rightarrow P$	Обертання площини поляризації
$C \rightarrow P$	Переломлення
$C \rightarrow \chi$	Плеохроїзм
$C \rightarrow P$	Повне внутрішнє відбиття
$C \rightarrow (P \rightarrow) A$	Поглинання
$C \rightarrow P$	Подвійна променезаломлюваність
$C \rightarrow P$	Поляризація
$P \rightarrow P$	Принцип Гюйгенса-Френеля
$P \rightarrow T (\rightarrow A)$	Реверберація, луна - (багаторазові відбиття)
$C \rightarrow P$	Рефракція
$\chi \rightarrow A$	Резонанс
$C \rightarrow A$	Розсіювання
$C \rightarrow P \rightarrow A$	Самофокусування
$C \rightarrow A, \chi; P = \text{const}$	Солітони
$C \rightarrow (P \rightarrow) A$	Спад інтенсивності випромінювання
$A \rightarrow$ (всі інші характеристики)	Суперпозиції принцип
$C \rightarrow P \rightarrow T$	Ферма принцип
$C \rightarrow P \rightarrow A$	Фокусування
$C \rightarrow P \rightarrow A$	Хвилевід в середовищі розповсюдження

Примітка. Розшифровка скорочень до табл. 0:

Група характеристик	Умовні позначення в табл. 0
амплітудні	А
тимчасові	Т
частотні	Ч
просторові	П
характеристики середовища поширення	С

Взаємодія характеристик найкраще виражається формою хвильового фронту, про що говорилося в гл. 2.1.

Якщо випромінювання здійснюється просторовим джерелом у формі прямокутного паралелепіпеда розмірами $A \times B \times C$, який опирається однією з граней, зокрема, гранню $A \times B$ на границю розподілу середовищ, він характеризується хвильовим фронтом форми, показаної нижче (рис. Д.1). Окремими випадками хвильового фронту такого просторового джерела випромінювання у формі прямокутного паралелепіпеда є:

- Точкове джерело ($A \rightarrow 0, B \rightarrow 0, C \rightarrow 0, R = var$)
- Лінійне джерело ($B \rightarrow 0, C \rightarrow 0, R = var, A = var$)
- Плоске джерело ($C \rightarrow 0, A = var, B = var, R = var$).

Площі S, m^2 і форма хвильових фронтів

Вид джерела	Фронт у вигляді:	у вільному просторі	в напівпросторі
Точкове	сфери радіуса R	$S = 4\pi R^2$	$S = 2\pi R^2$
Лінійне нескінченної довжини	циліндра радіусом R, m , і висотою A, m ,	$S = 2\pi RA$	$S = \pi RA$
Лінійне кінцевої довжини		$S = 2\pi RA + 4\pi R^2$	$S = \pi RA + 2\pi R^2$
Плоске розмірами $A \times B$	вироджений еліпсоїд обертання	$S = 2AB + 4\pi R^2 + 2\pi RA + 2\pi RB$	$S = 2AB + 4\pi R^2 + 2\pi RA + 2\pi RB$

Таким чином, точкове, лінійне, і плоске джерело є вираженими просторовими джерелами у формі прямокутного паралелепіпеда.

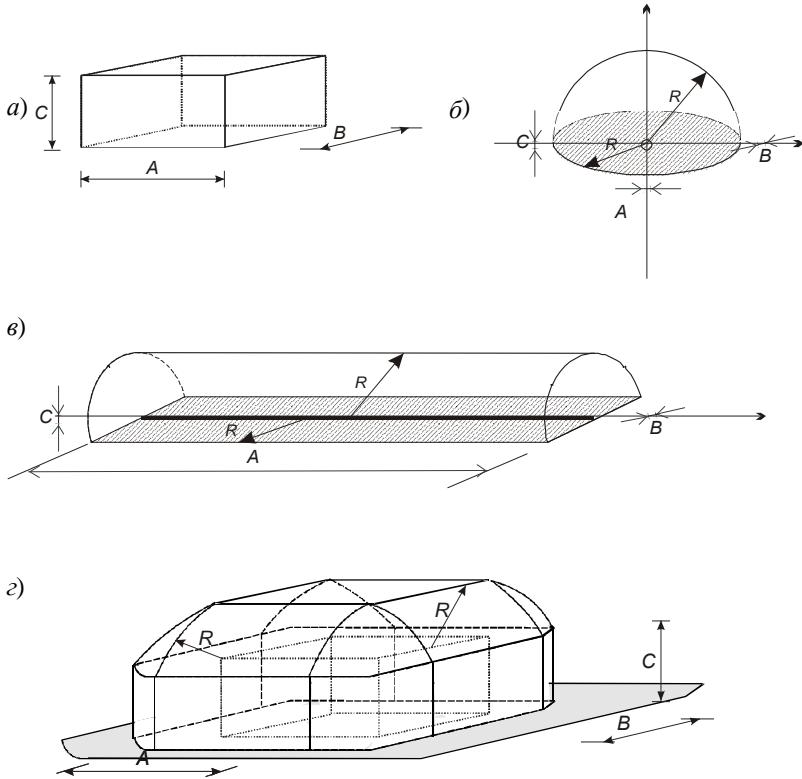


Рис. Д-1. ДШ у формі прямокутного паралелепіпеду розмірами $A \times B \times C$ (а) та форми хвилювих фронтів від нього: від точкового (б), лінійного (в) та просторового (г) джерел.

Інтенсивність звуку $Вт/м^2$ у будь-якій точці простору являє собою відношення звукової потужності $Вт$, до площі фронту звукової хвилі, $м^2$. В міру віддалення кількість $Вт$ не міняється, однак же міняється площа фронту: поверхня фронту безперестану збільшується, і звукова енергія розподіляється по все більшій площі. Знаючи вихідну звукову потужність джерела, $Вт$; і створивши математичний опис хвилювого фронту, що проходить через яку-небудь точку, віддалену на яку-небудь відстань від джерела R - (у результаті чого може бути розрахована шукана площа фронту), можна вказати чисельне значення інтенсивності звуку в даній точці (а потім відмовитися від абсолютних значень інтенсивностей і легко перейти до її рівнів у дБ).

Абракітов Володимир Едуардович

**Багаторазові відбиття звуку
в акустичних розрахунках**

(Монографія)

Редактор М.З. Аляб'єв
Комп'ютерна верстка В.Е. Абракітов

Підписано до друку 18.06.2007 р.
Формат 60x84/16. Папір офісний. Замовл. № 3692
18,9 умовно-друк.арк.
Тираж 500 примірників.

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ.
61002, Харків, вул. Революції, 12.