

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

Б.М.Рувінський, М.О.Галушак

БУДІВЕЛЬНА ФІЗИКА

Частина 1

Навчальний посібник

Рекомендовано

**Вченою радою Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу як навчальний
посібник для студентів напряму підготовки
"Архітектура"**

Ухвала Вченої ради від 29.06.2011р., протокол №07/503

**Івано-Франківськ
2011**

УДК 697.1+699.844

ББК 38.113

P82

Будівельна фізика. Частина 1. Навч. Посібник / Б.М.Рувінський, М.О.Галушак. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011 – 239с.

Наведені основні відомості з архітектурної кліматології, будівельної теплофізики та архітектурної акустики. Викладено методи розрахунку та нормування теплопередачі, повітря- та паропроникності захисних конструкцій будинків. Розглянуто процеси поширення звуку та акустичні характеристики приміщень, наведені норми звукоізоляції та методи боротьби із шумом.

Посібник призначений для студентів напряму підготовки "Архітектура".

Рецензенти: канд. техн. наук, професор кафедри архітектурного проектування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Я.В.Василишин

канд. техн. наук, доцент кафедри загальної та прикладної фізики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу О.Є.Федоров

Розповсюджувати та тиражувати без офіційного дозволу авторів та ІФНТУНГ забороняється.

© Б.М.Рувінський, М.О.Галушак, 2011

© ІФНТУНГ, 2011

ISBN

ЗМІСТ

Розділ 1 АРХІТЕКТУРНА КЛІМАТОЛОГІЯ	8
Вступ	8
1.1 Клімат та його чинники	9
1.2 Елементи клімату та їх облік в архітектурно- будівельному проектуванні	10
1.3 Кліматичне районування території країни	19
1.4 Аналіз клімату при архітектурно-будівельному проєктуванні	23
1.4.1 Аналіз фонових умов району будівництва	25
1.4.2 Загальна оцінка погодних умов і вибір режиму експлуатації будівель	29
1.4.3 Аналіз температурно-вітрового режиму місцевості..	35
1.4.4 Аналіз сонячної радіації району будівництва	39
1.4.5 Оцінка сторін горизонту по комплексу кліматичних чинників	43
1.4.6 Аналіз місцевих кліматичних умов	44
1.5 Будівельно-кліматична паспортизація забудови	48
1.6 Архітектурно-планувальні, конструктивні і інженерно-технічні заходи при проєктуванні будівель і забудови, що визначаються кліматичними факторами	51
1.7 Мікроклімат приміщення	56
Контрольні запитання	61
Розділ 2 ОСНОВИ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ	62
Вступ. Перенесення тепла, вологи, повітря	62
2.1 Температурне поле і його зміни	64
2.2 Теорія поширення тепла в захисних конструкціях	68
2.3 Термічний опір однорідних конструкцій	72
2.4 Опір теплопередачі неоднорідних конструкцій	77
2.5 Опір теплопередачі неоднорідних конструкцій при наявності теплопровідних включень	84
2.6 Термічний опір повітряних прошарків	85
2.7 Нормовані показники теплофізичних властивостей захищаючих конструкцій і мікроклімату будівель	90
2.8 Теплостійкість захищаючих конструкцій і приміщень	92
2.9 Визначення коефіцієнта теплосасвоєння зовнішньої	

поверхні огорожувальних конструкцій у літній період ...	99
2.10 Визначення амплітуди коливань температури внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій при оцінці їх теплостійкості у літній період	100
2.11 Визначення коефіцієнта теплосасвоєння зовнішньої поверхні огорожувальних конструкцій у зимовий період	102
2.12 Визначення амплітуди коливань температури повітря приміщення при оцінці теплостійкості в зимовий період	103
2.13 Визначення показника теплосасвоєння поверхнею підлоги	105
2.14 Нормативні вимоги до показників теплостійкості	106
Контрольні запитання	108
Розділ 3 ПОВІТРЯНИЙ РЕЖИМ БУДИНКІВ	109
3.1 Повітропроникність конструкції	109
Контрольні запитання	113
Розділ 4 ВОЛОГІСНИЙ РЕЖИМ БУДИНКІВ	114
4.1 Вплив вологісного режиму на теплозахисні властивості конструкції	114
4.2 Зв'язок вологи з будівельними матеріалами	118
4.3 Сорбційні процеси	120
4.4 Графо-аналітичний метод розрахунку вологісного стану конструкції при усталеному потоці водяного пару	125
4.5 Нормативні вимоги до вологісного режиму огорожувальних конструкцій	127
Контрольні запитання	128
Розділ 5 АРХІТЕКТУРНА АКУСТИКА	129
Вступ	129
5.1 Хвильова природа звуку	129
5.2 Лінійні характеристики звукового поля	134
5.3 Енергетичні характеристики звукового поля	136
5.4 Акустичні рівні	138
5.5 Інтерференція хвиль	140
5.6 Відбивання звуку	142
5.7 Заломлення звуку	144
5.8 Дифракція хвиль	146
5.9 Загасання звуку	148

5.10 Основні властивості слуху	151
5.10.1 Сприйняття за частотою	152
5.10.2 Сприйняття по амплітуді	153
5.10.3 Часові характеристики слуху	163
5.11 Акустичні процеси у закритому приміщенні (статистична теорія)	165
5.12 Об'ємний та частотний оптимуми реверберації	179
5.13 Акустичні процеси у закритому приміщенні (хвильова теорія)	183
5.14 Розбірливість мовлення в приміщенні	192
5.15 Основи геометричної акустики закритих приміщень	193
5.16 Пристрої, що регулюють акустику приміщень	196
5.17 Акустика відкритих театрів	202
Контрольні запитання	210
Розділ 6. ЗВУКОІЗОЛЯЦІЯ	211
6.1 Поширення шуму в приміщеннях	211
6.2 Нормування звукоізоляції	214
6.3 Вплив характеристик конструкцій і матеріалів на ізоляцію повітряного шуму	220
6.4 Звукоізоляція конструкціями з отворами. Визначення загального рівня звукового тиску в приміщенні	229
6.5 Звукоізоляція огорож від ударного шуму	231
Контрольні запитання	237
Література	238

ПЕРЕДМОВА

“Не можна розуміти під архітектурною наукою лише красу і витонченість форм, пропорцій і ліній, мистецтвознавчі дослідження про закономірності композиційних співвідношень, суперечки про тектонічну сутність форм та історію створення архітектурних шедеврів, які й стали такими саме тому, що творці їх розуміли: виразність архітектури залежить від природних параметрів середовища”, – д.т.н., архітектор Н.В. Оболенський.

Експлуатаційні характеристики будівель і окремих приміщень визначаються не тільки їх розмірами та якістю обробки поверхонь. Важливим фактором є ступінь захищеності від зовнішніх впливів, таких як холод або зайве тепло, атмосферні опади, шум. Приміщення повинні піддаватися (або не піддаватися) певний час впливу прямих сонячних променів, мати достатню освітленість, сприятливий акустичний клімат. Правильне врахування цих факторів забезпечує такий стан штучного середовища життєдіяльності, який сприймається людиною як комфортний.

Питанням створення комфортного мікроклімату приміщення займається будівельна фізика. Існує декілька напрямків досліджень будівельної фізики: архітектурна кліматологія розглядає принципи оцінки та методи обліку природно-кліматичних особливостей району будівництва при проектуванні забудови, будівель та споруд; будівельна теплотехніка розглядає питання теплопередачі в огорожувальних конструкціях, їх паро- і повітропроникність, температурно-вологісний режим приміщень; будівельна акустика досліджує акустику приміщень – поширення звуку усередині приміщення, методи створення сприятливого «акустичного клімату» та звукоізоляцію, де розглядаються основні методи боротьби із шумом.

Будівельна фізика має велике значення не тільки як додаткова службова технічна дисципліна, яка дає можливість правильно вирішувати свої власні завдання, а й, розуміння її проблем, допомагає архітекторові й інженеру знаходити правильне рішення більш загальних задач. Раціональним має бути тільки спільне рішення задач будівельної фізики і безпосередньо завдань проектування оскільки не врахування положень будівельної фізики може при-

звести до проектування недовговічної споруди, а значить приводить до втрат часу, праці, і великих матеріальних витрат.

Використання положень будівельної фізики архітекторами та інженерами дає їм можливість наближеними розрахунками визначати різні фізичні дії, наприклад, при оцінці ізолюючої здатності, температури на границі шарів, тиску пари, кількості вологи, що конденсується, а також отримувати характеристики звукоізоляції, затінення або акумулюючої здатності приміщень.

При необхідності максимальної економії коштів, особливо при здійсненні великих проектів, для виробництва точних розрахунків необхідно залучати інженера – фахівця з будівельної фізики.

При викладенні матеріалу навчального посібника використана сучасна нормативна база України.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності «Архітектура», архітекторів, а також може бути використаний інженерно-технічними працівниками проектних організацій.

Розділ 1. АРХІТЕКТУРНА КЛІМАТОЛОГІЯ

Вступ

При проектуванні будівель необхідно вирішувати складну двоєдину задачу, рішення якої забезпечило б захист людини, устаткування, функціональних і технологічних процесів, що протікають в приміщенні, від несприятливих зовнішніх дій, зберігаючи при цьому необхідний зв'язок людини з навколишнім природним середовищем.

Залежно від призначення будівлі усередині неї повинен створюватися певний мікроклімат, відповідний по своїх параметрах санітарно-гігієнічним вимогам і вимогам технологічного процесу. Забезпечення необхідних параметрів мікроклімату досягається застосуванням певних розмірів і об'ємів приміщень, їх взаємним розташуванням в будівлі, орієнтацією приміщень по сторонах горизонту, розташуванням будівель на місцевості і т.і. **Конструктивні заходи** направлені на проектування захищаючих конструкцій, що захищають внутрішнє середовище будівель від зовнішніх несприятливих дій. **Технічні засоби** включають пристрої в будівлях систем опалювання, вентиляції, кондиціонування і т.п.

Як правило, перераховані заходи застосовуються комплексно з урахуванням відомостей про параметри природного середовища району будівництва.

Відомості про параметри природного середовища, необхідні при проектуванні будівель, дає **архітектурна кліматологія**, що вивчає клімат району будівництва з погляду дії параметрів клімату на будівлі, споруди і забудову. Будівельна кліматологія містить відомості про кліматичні показники, які можуть бути використані при розробці проектів планування і забудови населених місць, проектуванні генеральних планів промислових підприємств, складанні кліматичних параметрів міст і будівельних майданчиків, при проектуванні нових і реконструкції діючих підприємств, будівель і споруд різного типу. Відомості про клімат використовуються при розрахунках будівельних конструкцій будівель і споруд, при розрахунках тепловтрат і теплонаходжень, опалювання і вентиляції, при оцінці режиму зволоження будівель і визначенні умов інсоляції і світлового режиму в різних районах бу-

дівництва.

Для квазидифузного обліку чинників навколишнього середовища архітектори і інженери-будівники при проектуванні будівель і забудови повинні володіти науково-обґрунтованою методикою аналізу кліматичних умов району будівництва.

1.1 Клімат та його чинники

Кліматом називається багаторічний режим погоди, що властивий тій або іншій місцевості і виявляється в певних метеорологічних показниках. Багаторічний режим погоди характеризується сукупністю всіх метеорологічних показників за декілька десятків років, їх характерними річними змінами і можливими відхиленнями від середніх значень або норм в окремі роки.

На формування клімату роблять вплив геофізичні чинники, чинники географічного середовища і залежні від них циркуляційні явища.

До **геодезичних** чинників, що визначають клімат, відносяться сонячна радіація в ультрафіолетовому, видимому і інфрачервоному спектрах випромінювання (у діапазоні довжин хвиль $3 \cdot 10^2 \dots 6 \cdot 10^4$ нм). До **географічних** чинників відносяться географічна широта місцевості, висота над рівнем моря, співвідношення суші та моря, океанічні течії, характер ґрунту, рельєф місцевості, сніжний і льодовий покриви, газовий склад і стан атмосфери.

Всі ці чинники в сукупності визначають рух повітряних мас в атмосфері, оборот вологості, теплообмін в атмосфері і земній поверхні. Наприклад, географічна широта місцевості визначає величину сонячної радіації, що поступає до Землі. Кількість теплової енергії, що приходить при цьому, впливає на процеси циркуляції повітря і води в атмосфері. Проте тепло на різних територіях може поступати не тільки у вигляді інфрачервоної складової сонячної радіації, але і переноситися повітряними потоками, що виникають унаслідок різниці температур поверхонь суші і води. Взимку поверхня води морів і океанів має температуру вищу за температуру поверхні суші, а літку – навпаки. Вплив цих процесів є великим, проявляється на значній відстані від побережжя. Наприклад, вплив теплої течії Гольфстрім в Атлантичному океані виявляється практично на всій території Європи.

Процеси випаровування і конденсації вологи над землею поверхнею значною мірою визначають температурний режим атмосфери і впливають на її циркуляцію.

Температурний режим місцевості залежить також від характеру поверхні ґрунту, рослинного і сніжного покриву. Сніг більше відбиває падаючу теплову енергію, ніж рілля і покриті рослинністю території.

Залежно від розміру даних територій, в межах яких розглядаються зміни кліматичних чинників, розрізняють поняття **макроклімат**, **мезоклімат** і **мікроклімат**.

Під **макрокліматом** розуміють сукупність погодних чинників, характерних для обширних територій, таких як регіони, зони, географічні пояси. Визначальними чинниками формування макроклімату є глобальні геофізичні процеси, характерні для даної території. Під **мезокліматом** звичайно розуміється клімат конкретної місцевості. Мезоклімат формується в результаті взаємодії загальнокліматичних чинників з природними особливостями даної місцевості, такими як рельєф, зелені насадження, водоймища і ін. Залежно від містобудівної ситуації в межах території міста утворюється мезоклімат міста. У свою чергу невеликі ділянки території залежно від характеру підстилаючого шару (зелені насадження, газони, водоймища, покриття, забудова і т.п.), захищеності від вітру, затіненості і т.д. утворюють свій **мікроклімат**.

1.2 Елементи клімату і їх облік в архітектурно-будівельному проектуванні

До основних елементів, що формують клімат місцевості району будівництва, відносяться: сонячна радіація, температура і вологість повітря, вітер, кількість опадів і сніжний покрив.

Значення кліматичних елементів для різних районів країни приведені в діючому СНиП 23-01-99[1], СНиП 2.01.01-82 [2], а також в посібниках [3, 6, 11].

Важливе значення при проектуванні забудови і окремих будівель мають знання про сонячну радіацію.

Життя людини безперервно пов'язане з енергією, випромінюваною Сонцем на Землю. При цьому на людину безпосередньо або опосередковано впливають всі складові оптичної частини ви-

проміювання Сонця: ультрафіолетова, видима і інфрачервона. Ультрафіолетове випромінювання володіє оздоровчими властивостями: регулює обмін речовин в організмі людини, укріплює імунну систему, володіє бактерицидними властивостями. Видиме світло потрібне людині як засіб візуального сприйняття навколишнього простору. Умови світлового середовища багато в чому визначають психоемоційний стан людини, його настрій і самопочуття. Інфрачервоне випромінювання несе теплову енергію.

Сонце є основним джерелом теплової енергії на Землі. При проектуванні забудови населених місць і окремих будівель проєктувальник повинен максимально використати всі позитивні чинники дії сонячної енергії, а також виключити можливі негативні наслідки, наприклад, перегрів приміщень в літній час. Для цієї мети необхідно мати відомості про параметри сонячної радіації і їх зміни від різних чинників.

Відомості про ультрафіолетову радіацію поверхонь приведені в допомозі до СНиП 2.01.01-82 [5].

Сонячна радіація (енергія інфрачервоного випромінювання) визначається кількістю тепла, що поступає від Сонця на Землю. По характеру розповсюдження – на пряму, розсіяну і відображену складові сонячної радіації.

Пряма сонячна радіація – це частина сумарної радіації, що надходить безпосередньо від видимого диска Сонця. Опроміювання поверхонь прямим сонячним промінням носить назву інсоляції. Тривалість інсоляції нормується для приміщень житлових і суспільних будівель і житлової забудови населених місць [9]. При цьому тривалість інсоляції прямим світлом житлових приміщень залежить від кількості необхідної для людського організму ультрафіолетової радіації.

Розсіяна сонячна радіація – це частина сонячної радіації, що поступає на поверхню зі всього небосхилу після її розсіювання в атмосфері.

Відбита складова сонячної радіації – це частина сонячної радіації, що поступає на поверхню після відбиття прямої сонячної радіації від інших, поруч розташованих поверхонь (будівель, землі і т.д.).

Кількість тепла, що поступає від сонячної радіації залежить від географічної широти місцевості, стану атмосфери і підстиляючого шару землі, розташування поверхні в просторі і її орієнтації по сторонах світу, від пори року і доби. Частина сонячної радіації випромінюється назад в атмосферу поверхнею землі, нагрітої в результаті поглинання падаючої радіації. Прихід радіації на поверхню і відхід її назад в атмосферу характеризується різницею складових, званою радіаційним балансом. Влітку радіаційний баланс в Північній півкулі позитивний і поверхня землі нагрівається, в зимовий час – негативний, що означає охолодження земної поверхні.

Втрата тепла, що надходить до земної поверхні, може бути оцінена також шляхом розрахунку кількості тепла, що йде на прогрівання ґрунту і повітря поблизу поверхні землі і тепла, що витрачається на випаровування води з ґрунту. Співвідношення цих величин характеризує **тепловий баланс** місцевості. Він визначає температурний і вологісний режим ґрунту.

Температурний режим повітря є найважливішою кліматичною характеристикою району будівництва. При оцінці його параметрів в процесі проектування використовуються наступні, приведені в СНиП [1], значення температур зовнішнього повітря: середньомісячні, середня за рік, абсолютні максимальна і мінімальна, середні найхолоднішої п'ятиденки і найхолодніших діб, середні найхолоднішого періоду року, середня максимальна найтеплішого місяця, середні добові амплітуди коливання температур найтеплішого і холоднішого місяців. Крім того, в СНиП [1] приведені відомості про температури і тривалість періодів з середньодобовою температурою рівної і менше 0°C, 8°C, 10°C, а також середні добові амплітуди коливань температури повітря найхолоднішого і теплішого періодів. Перераховані характеристики температурного режиму місцевості використовуються при кліматичному районуванні територій, в теплотехнічних розрахунках захищаючих конструкцій, при розрахунках тепловтрат будівлі і систем опалювання та вентиляції, при визначенні морозостійкості матеріалів і конструкцій, при розробці заходів щодо виробництва будівельних робіт в зимовий час, при визначенні режимів експлуатації будівель і ступеня комфортності середовища незаселеного

людиною, а також рішенні інших задач архітектурно-будівельного проектування. Детальніше відомості про область застосування різних температурних параметрів дані в табл. 1.1.

Безпосередньо з тепловим режимом місцевості пов'язана глибина промерзання ґрунтів. Дані про глибину промерзання використовуються при призначенні глибини заставляння фундаментів будівель, споруд і інженерних комунікацій будь-якого вигляду. Особливо ця величина важлива для будівництва на глинистих і суглинних ґрунтах. На рис. 1.1 приведена схематична карта промерзання глинистих і суглинних ґрунтів на території країни [2, дод. 1, рис. 3].

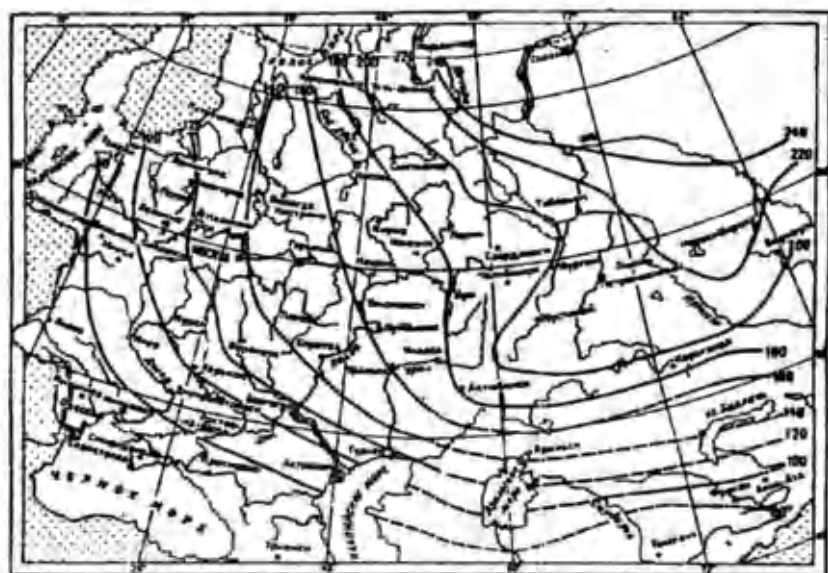


Рисунок 1.1 – Схематична карта глибини промерзання глинистих і суглинних ґрунтів на території бывшего СРСР

Таблиця 1.1 – Досліджувані кліматичні параметри та область їх застосування

Склад кліматичних параметрів	Область застосування
Температура повітря найхолодніших днів і найхолоднішої п'ятиденки	Розрахунок опору теплопередачі і повітряпроникненню захищаючих конструкцій; проектування санітарно-технічних пристроїв житлових будівель, систем опалювання; вибір матеріалів будівельних конструкцій
Середня тривалість температури повітря різних градацій	Розрахунок систем вентиляції і кондиціонування повітря
Середня місячна температура повітря	Розрахунок теплостійкості і опору проникненню вологи через захищаючі конструкції; розрахунок температурного режиму ґрунтів при проектуванні фундаментів будівель і споруд; визначення температурних дій на будівельні конструкції, основи будівель і споруд; розрахунок надходження тепла через покриття
Тривалість і середня температура опалювального періоду	Розрахунок опору теплопередачі захищаючих конструкцій; проектування систем опалювання
Максимальна глибина нульової ізотерми ґрунту	Проектування фундаментів будівель і споруд, будівельних конструкцій, систем водопостачання
Число днів з переходом температури повітря через 0°C	Розрахунок температурних дій на захищаючі конструкції
Основні поєднання параметрів дії дощу з вітром на умовну вертикальну поверхню різної орієнтації	Оцінка водозахисних властивостей і заповнень отворів захищаючих конструкцій
Середня швидкість вітру в різні періоди і повторюваність різних градацій швидкості вітру	Розрахунок тепловтрат і витрат палива, розсіювання шкідливих викидів; проектування газопроводів і трубопроводів; планування міської і промислової забудови
Висота і тривалість залягання сніжного покриву	Розрахунок температурного режиму ґрунтів при проектуванні основ і фундаментів будівель і споруд; розробка генеральних планів промислових підприємств
Сумарна сонячна радіація на горизонтальну і вертикальні поверхні	Розрахунок теплостійкості захищаючих конструкцій; проектування систем опалювання, вентиляції, кондиціонування повітря; нормування інсоляції будівель і території забудови

Атмосферний тиск. Вітровий режим місцевості. Атмосферний тиск – один з важливих кліматоформуючих елементів. Зміна атмосферного тиску приводить до істотних змін погоди і значно впливають на самопочуття людини. Основною причиною зміни атмосферного тиску повітря є нерівномірність нагріву атмосфери від земної поверхні. При охолодженні атмосферного повітря збільшується його густина і, отже, росте його тиск. При нагріванні атмосферного повітря все відбувається, відповідно, навпаки.

Тепліше і менш щільніше повітря підіймається вгору, а холодне і щільніше повітря опускається вниз. Таким чином, виникає конвективний рух повітря вгору-вниз.

Вітровий режим будь-якої місцевості характеризується швидкістю вітру і його повторюваністю по сторонах горизонту (румбам). Значення цих величин зображаються звичайно у вигляді графіків, які називають розою вітрів. Приклад такого графіка приведений на рис. 6. Довідкові дані для побудови добових роз вітрів по швидкості і повторюваності для січня і липня приведені в [2].

У діючих будівельних нормах [1] приведені відомості про переважаючий напрям вітру за грудень – лютий і липень – серпень, про максимальну і середніх швидкостях вітру по румбах за січень, про швидкість вітру за період з середньою добовою температурою повітря $\leq 8^{\circ}\text{C}$, про мінімальну з середніх швидкостей вітру по румбах за липень.

В процесі будівельного проектування вітровий режим місцевості враховується при розробці заходів щодо аерації міської забудови, при теплотехнічних розрахунках захищаючих конструкцій будівель і споруд, при розрахунку будівель і споруд на міцність і стійкість під дією вітрового навантаження, при визначенні сніжних занесень на дорогах, вулицях і міських територіях.

Вологісний режим повітря і осадн. Вміст вологи в повітрі має істотне значення для характеристики клімату місцевості. Дані про вологість повітря необхідні для оцінки дії клімату на людину, для проектування захищаючих конструкцій і забезпечення належного мікроклімату в приміщеннях.

Вода знаходиться в атмосферному повітрі у вигляді водяної пари. При цьому вологість повітря може характеризуватися його

абсолютною або відносною вологістю.

Абсолютна вологість – це кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря, визначувана в г/м³.

Відносна вологість повітря – ступінь насичення повітря водяними парами щодо гранично можливого насичення, рахується у відсотках.

При розрахунках для оцінки вологості повітря звичайно використовують величину парціального тиску. Парціальний тиск – це частина загального тиску повітря, обумовлена присутністю водяної пари в ньому. Парціальний тиск називають також **пружністю водяної пари**.

Розрізняють дійсну і максимальну пружності водяної пари. **Максимальна пружність водяної пари E** характеризує максимально можливу кількість водяної пари, яку повітря може містити при даній температурі. Чим вища температура, тим більшу кількість вологи може містити повітря.

Дійсна пружність відповідає фактичній величині парціального тиску пари.

Відносна вологість повітря визначається як

$$\varphi = \frac{e}{E} 100\%.$$

Нормальною для організму людини вважається відносна вологість від 30 % до 60 %. При вологості повітря менше 30 % відбувається інтенсивне випаровування вологи з поверхні шкіри і слизових оболонок людини, що приводить до неприємних відчуттів. При високій вологості випаровування вологи з поверхні тіла людини утруднене, порушується тепловий баланс організму. У поєднанні з високою температурою це може привести до перегріву організму і теплового удару. При низькій температурі і високій вологості повітря внаслідок того, що вологе повітря більш теплопровідне, підвищується тепловіддача, і людський організм в таких умовах піддається значному охолодженню.

У разі охолодження повітря, що має пружність водяної пари e , до температури, при якій дійсна величина e буде дорівнювати максимальній пружності водяної пари E , наступлять умови, коли відносна вологість буде рівна 100 %. Подальше пониження температури приводить до конденсації зайвої кількості вологи і пе-

реходу її в крапельно-рідкий стан. Температура, при якій виконується умова $e = E$, називається температурою точки роси. Подібні явища постійно спостерігаються в природі, виявляючись у вигляді хмар і туману, а також опадів у вигляді снігу або дощу.

Вологість атмосферного повітря залежить від кількості і виду опадів, що випадають в даному районі, від віддаленості територій від водоймищ, температурного і вітрового режиму місцевості.

Відомості про вологість повітря на території країни приведені в СНиП 23-01-99 [1]. У ньому наводяться дані про середньомісячну відносну вологість повітря для найхолоднішого і теплішого місяців, про середньомісячну відносну вологість повітря в 15 годин найхолоднішого і теплішого місяців. У СНиП 23-01-99 [1] також дані відомості про кількість опадів за квітень – жовтень (рідкі опади) і за листопад – березень (тверді опади), вказаний добовий максимум опадів в теплий період року. Докладніші довідкові відомості, відсутні в СНиП 23-01-99 [1], можна одержати в [2]. Територія бувшого СРСР ділилася на три зони: волога, нормальна, суха. На територію України припадає дві зони: нормальна і суха (див рис. 1.2 а, б).

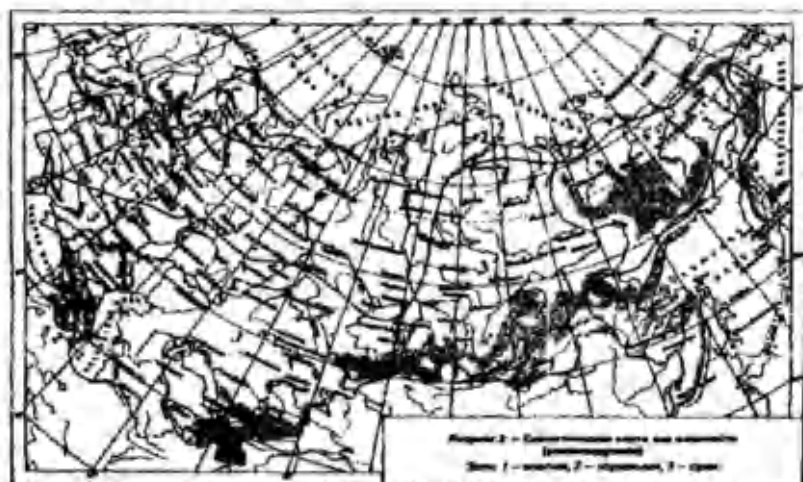


Рисунок 1.2а – Схематична карта зон вологості території бувшого СРСР: 1 – волога, 2 – нормальна, 3 – суха

Хмарність і стан атмосфери відносяться до істотних чинників, що впливають на формування і кількість опадів, тепловий і вологісний режим атмосферного повітря, на інтенсивність освітлення і інсоляції земної поверхні і приміщень. Кількість хмар, або хмарність, характеризується ступенем покриття небосхилу хмарами. Оцінка хмарності відбувається візуально по 10-ти бальній шкалі: 0 балів відповідає безхмарному небу, а 10 балів - повному покриттю небосхилу хмарами.



Рисунок 1.26 – Схематична карта зон вологості території України: 2 – нормальна, 3 – суха

Більшість перерахованих кліматичних чинників діє на людину комплексно. Наприклад, велике значення для організму людини мають поєднання температури з вітром, вологістю і сонячною радіацією, вітру з опадами і ін. Ці обставини повинні бути максимально враховані при виборі території і проектуванні забудови в цілому, а також при розміщенні окремих будівель і їх архітектурно-будівельному проектуванні.

1.3 Кліматичне районування території України

Необхідність врахування впливу природно-кліматичних чинників на людину, будівлі і населені пункти зажадала проведення робіт по будівельно-кліматичному районуванню всієї території України. Роботи по кліматичному районуванню почалися в СРСР в 30-е роки XX-го сторіччя і завершилися включенням в будівельні норми проектування житлових будівель, а пізніше і в норми по будівельній кліматології карти кліматичного районування.

Будівельно-кліматичне районування спочатку засноване на принципах кліматичної типології житлових будівель [10]. Вона визначає розподіл колишньої території СРСР на кліматичні райони, в межах яких до будівель пред'являються певні типологічні вимоги, що формують уявлення про тип будинку, об'ємно-планувальні рішення квартир, орієнтації будівлі, пристрої входних вузлів і ін. Наявність подібних відомостей дала можливість для розвитку в СРСР типового проектування, що багато в чому забезпечує рішення житлової проблеми. У теперішній час типові проекти для конкретних кліматичних районів, максимально враховують їх певні фонові кліматичні умови.

У основу сучасного кліматичного районування території колишнього СРСР були встановлені багаторічні спостереження про комплексне поєднання середніх значень температури повітря в січні і липні, середній швидкості вітру за три зимові місяці і середньомісячну відносну вологість повітря в липні.

Згідно діючим нормам СНиП 23-01-99 [1] територія колишнього СРСР ділиться на чотири кліматичні райони, які, у свою чергу, розділені на 16 кліматичних підрайонів. Схематична карта кліматичного районування території країни для будівництва відповідно до [1] приведена на рис. 1.3, а параметри кліматичних районів і підрайонів дані в табл. 1.2.

I Кліматичний район (середньомісячна температура січня $< -14^{\circ}\text{C}$) відрізняється суворою і тривалою зимою, що обумовлює максимальний тепलोзахист будівель. Необхідний захист будівель і споруд від продування сильними вітрами і підвищеною вологістю в приморських районах. Район характеризується коротким світловим роком, великою тривалістю опалювального періоду. Для району також характерні низькі середні температури по-

вітря найхолодніших п'ятиденок і діб. Висота сніжного покриву досягає 1,2 м.

II Кліматичний район ($-14^{\circ}\text{C} < \text{ср } t_{\text{сн}} < -3^{\circ}\text{C}$), має тривалу помірну по температурах зиму, яка обумовлює необхідність теплозахисту будівель при значній тривалості опалювального періоду. Висота сніжного покриву досягає 1,0 м.

III Кліматичний район ($-20^{\circ}\text{C} < \text{ср } t_{\text{сн}} < -2^{\circ}\text{C}$), характеризується негативними температурами повітря в зимовий період і жарким літом, визначаючими необхідність теплозахисту будівель в холодний період і захисту їх від зайвого перегріву в теплий період року. Для району характерна велика інтенсивність сонячної радіації. Невеликий сніжний покрив.

IV Кліматичний район ($-15^{\circ}\text{C} < \text{ср } t_{\text{сн}} < +6^{\circ}\text{C}$), характеризується жарким літом з інтенсивною сонячною радіацією, відносно короткою зимою з невеликою тривалістю опалювального періоду. Кліматичні умови обумовлюють необхідність теплозахисту будівель в зимовий період і захист їх від зайвого перегріву в теплий період року.

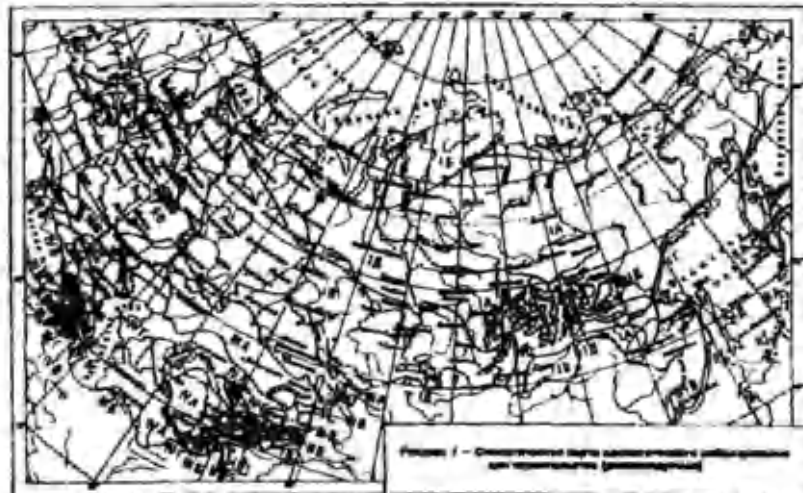


Рисунок 1.3в – Схематична карта кліматичного районування для будівництва на території бувшого СРСР



Рисунок 1.36 – Схематична карта кліматичного районування України

Як видно з карти рис. 1.1 і табл. 1.2 кліматичні показники січня і липня свідчать про континентальний, в основному, характер клімату України.

На територію України припадають підрайони всіх чотирьох кліматичних районів (рис. 1.36)

Таблиця 1.2 – Характеристики кліматичних районів і підрайонів

Кліматичні райони	Кліматичні підрайони	Середньомісячна температура повітря в січні, град	Середня швидкість вітру за три зимові місяці, м/с	Середньомісячна температура повітря в липні, град	Середньомісячна відносна вологість повітря в липні, %
I	IA	Від -32 і нижче	—	Від +4 до +19	—
	IB	Від -28 і нижче	5 і більше	Від 0 до +13	Більш 75
	IC	Від -14 до -28	—	Від +12 до +21	—
	ID	Від -14 до -28	5 і більше	Від 0 до +14	Більш 75
II	IIA	Від -14 до -32	—	Від +10 до +20	—
	IIB	Від -4 до -14	5 і більше	Від +8 до +12	Більш 75
	IIC	Від -3 до -5	5 і більше	Від +12 до +21	Більш 75
	IID	Від -4 до -14	—	Від +12 до +21	—
III	IIIA	Від -5 до -14	5 і більше	Від +12 до +21	Більш 75
	IIIB	Від -5 до -14	5 і більше	Від +12 до +21	Більш 75

районах з низькою зимовою температурою і різкою континентальністю клімату слід віддавати перевагу блокуванню будівель, компактним планувальним рішенням з підвищеним коефіцієнтом забудови, широким багатоповерховим будівлям з суміщеним освітленням.

У цих районах особливого значення набувають всі засоби теплозахисту будівель; їх розташування по відношенню до пануючих вітрів, аеродинамічні характеристики будівель, конструкції огорож, скління, входів, а також акумулююча теплова здатність огорожі, яка залежить від маси огорожі, коефіцієнта теплотасвоєння різних шарів огорожі і їх взаємного розташування.

У південних районах, що характеризуються малою континентальністю, доцільно зменшувати коефіцієнт забудови, збільшувати площу зелених насаджень і водоймищ, забезпечувати активну аерацію вулиць, внутрішньоквартальних просторів, території промислових підприємств.

Кліматичне районування широко використовується в практиці проектування. Посилання на карти кліматичного районування використовуються в розділах СНиП по: будівельній теплотехніці; природному освітленню будівель; опалюванню, вентиляції і кондиціонуванню повітря; проектуванню бетонних, залізобетонних, кам'яних, алюмінієвих конструкцій; плануванню і забудові міських і сільських поселень; проектуванню промислових підприємств, виробничих і допоміжних будівель; проектуванню сільськогосподарських підприємств, будівель і споруд і т.д.

1.4 Аналіз клімату при архітектурно-будівельному проектуванні

Аналіз наявного кліматичного матеріалу необхідний архітекторам і проектувальникам для оцінки клімату району будівництва і встановлення типологічних рекомендацій до проектованих будівель.

Кліматичний аналіз при архітектурно-будівельному проектуванні ведеться за принципом «від загального до часткового», тобто від первинної оцінки загальних фонових параметрів клімату району до локальних конкретних даних для ділянки будівництва.

При оцінці фонових умов використовуються комплексні і

пофакторні кліматичні характеристики. Комплексні характеристики включають дані кліматичного районування, погодні умови (тепловий фон), радіаційно-тепловий режим, тепловологістний режим, світловий клімат, снігоперенесення, пилоперенесення, ко-сі дощі. До пофакторних характеристик відносяться: сонячна радіація, температура повітря, вітер, опади, вологість.

Фонові умови - це найзагальніші умови, характерні для крупної території, без детального урахування впливу підстилаючої поверхні землі. Для їх оцінки виробляється аналіз клімату з різним ступенем деталізації. Для житлової забудови, наприклад, на першому рівні деталізації враховуються вимоги, що пред'являються нормами проектування житлових будівель відповідно до кліматичного району і підрайону. На другому рівні виконується аналіз видів погоди і їх тривалості і виявляються детальніше типологічні вимоги. На третьому рівні виконується пофакторний аналіз параметрів клімату з погляду архітектурно-будівельного проектування, оцінюється ступінь їх сприятливості або несприятливості для людини залежно від сезону року для всього круга горизонту. Третій рівень аналізу дозволяє перейти до оцінки місцевих кліматичних умов.

Місцеві кліматичні умови мають особливості, що виникають в результаті зміни фонових умов клімату району: підстилаючою поверхнею - рельєфом, акваторіями, рослинністю і іншими компонентами ландшафту, а в межах міста - забудовою різної поверховості, різними покриттями території і ін.

Оцінка місцевих кліматичних умов при аналізі клімату, також як і оцінка фонових умов, виконується послідовно.

Спочатку оцінюється мікроклімат ландшафту, а потім з його урахуванням і мікроклімат забудови.

Послідовність виконання аналізу від загального до часткового пов'язана з особливістю типового проектування. Типові проекти створюються з розрахунку на багаторатне застосування в межах великих територій, таких як підрайони з урахуванням їх подальшої індивідуальної прив'язки до конкретної ділянки забудови, наприклад, з урахуванням рельєфу майданчика, містобудівної ситуації і інших місцевих особливостей.

З урахуванням викладеного розглянемо основні принципи

аналізу клімату відповідно до методики, найдетальніше наведеної в [10].

1.4.1 Аналіз фонових умов району будівництва

Для найзагальнішої оцінки кліматичних умов району будівництва можна використовувати дані кліматичного районування. Кліматичні характеристики районів і підрайонів дають загальне уявлення про кліматичний фон, про характер зими і літа, про середні значення температури, вітру і вологості, про інші параметри, які надалі підлягають детальнішій оцінці на рівні пофакторного аналізу клімату. Перелік параметрів, необхідних для оцінки загальних кліматичних умов району будівництва, наведені в табл. 1.3а і 1.3б на прикладі м. Києва. Перераховані характеристики визначають в цілому типологію будівель і містобудівних рішень.

Таблиця 1.3а – Кліматичні параметри холодного періоду року для м. Києва

Назва параметра	Величина параметра	Обґрунтування
Кліматичний район і підрайон	II Г	[1, рис. 1]
Температура повітря найбільш холодної доби, °С забезпеченістю 0,98/0,92	-29/-26	[1, табл. 1, гр.2.3]
Температура повітря найбільш холодної п'ятиденки, °С забезпеченістю 0,98/0,92	-25/-22	[1, табл. 1, гр.4.5]
Середня температура повітря холодного періода, °С забезпеченістю 0,98/0,92	-10	[1, табл. 1, гр.6]
Абсолютна мінімальна темп-ра повітря, °С	-32	[1, табл. 1, гр.7]
Середня добова амплітуда температури повітря найбільш холодного місяця	5,3	[[1, табл. 1, гр.8]] або [2, дод. 2]
Тривалість, доб./середня температура повітря, °С, періода із температурою повітря $\leq 8^{\circ}\text{C}$ (опалювальний період)	176/-0,6	[1, табл. 1, гр.11,12]
Середня місячна відносна вологість повітря найбільш холодного місяця в 13, %	82	[1, табл.1, гр.15], [2, дод. 3, гр.14]
Кількість опадів за листопад – березень, мм (тверді опади)	235	[1, табл.1, гр.17]
Пануючий напрямок вітру за грудень-лютий	Зх	[1, табл.1, гр.18]
Максимальна з середніх швидкостей вітру за румбом за січень, м/с	4,3	[1, табл.1, гр.19]
Зона вологості	нормальна	[1, рис.2]

Таблиця 1.36 – Кліматичні параметри теплого періоду року
для м. Києва

Назва параметра	Величина параметра	Обґрунтування
Середня температура теплого періода, °C забезпеченість 0,95/0,98	29/24	[1, табл. 2, гр.3,4]
Середня максимальна температура повітря найбільш теплого місяця	25,2	[1, табл. 2, гр. 5] або [2, табл.1, гр.17]
Абсолютна максимальна температура повітря, °C	39	[1, табл.2, гр.6] або [2, табл.1, гр.16]
Добовий максимум осадів, мм	103	[1, табл.2, гр.11]
Пануючий напрямок вітру за червень- серпень	Пн	[1, табл.2, гр.12]
Мінімальна з середніх швидкостей вітру за рубом за червень, м/с	1,6	[1, табл.2, гр.13]

Для пофакторного аналізу необхідно мати відомості про річну зміну метеоелементів в районі будівництва. Дані, що вимагаються для цього, зводяться в таблиці і потім представляються графічно. У якості прикладу в табл. 1.4 приведені відомості про річний хід метеоелементів в м. Києві. Середньомісячна температура повітря в 13 год (та 7 год) розраховуються додаванням (та відповідно відніманням) половини середньої амплітуди температур повітря за місяць до середньомісячної температури повітря

$$t_{cp13} = t_{cp} + \frac{A_{cp}}{2}, \quad t_{cp7} = t_{cp} - \frac{A_{cp}}{2}.$$

Максимальна пружність водяної пари повітря E знаходиться згідно таблиці тиску насиченої пари для даної температури повітря. Відносна вологість повітря ϕ згідно формули $\phi = e / E \cdot 100\%$.

Таблиця 1.4 – Дані для аналізу ходу змін кліматичних факторів місцевості м. Києва

Кліматичний фактор	Місяці											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Середньомісячна темп-ра повітря, °C	-5,9	-5,2	-0,4	7,5	14,7	17,8	19,8	18,7	13,9	7,5	1,2	-3,5

Кліматичний фактор	Місяці											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Середня амплітуда температур повітря за місяцями, °C	5,3	5,8	6,8	8,7	10,3	10,6	10,8	10,7	10,2	7,6	4,8	4,4
Середня місячна температура повітря, °C, в 13 год. $t_{\text{ср.13}}$	-3,25	-2,3	3	11,9	19,9	23,1	25,2	24,1	19	11,3	3,6	-1,3
Середня місячна темп-ра повітря, °C, в 7 год. $t_{\text{ср.7}}$	-8,55	-8,1	-3,8	3,15	9,55	12,5	14,4	13,4	8,8	3,7	-1,2	-5,7
Пружність водяної пари повітря за місяцями, Па, е	380	400	480	730	1040	1370	1550	1500	1170	830	630	470
Макс. пружність водяної пари повітря, Па, Е _в , в 13 год	490	528	759	1403	2340	2812	3170	2986	2199	1313	800	568
Макс. пружність водяної пари повітря, Па, Е _в , в 7 год	320	335	455	760	1170	1450	1620	1540	1115	800	540	400
Відн. вологість повітря, %, $\phi_{\text{в}}$, в 13 год	77,6	75,8	63,2	52	44,4	48,7	48,9	50,2	53,2	63,2	78,8	82,7
Відн. вологість повітря, %, $\phi_{\text{в}}$, в 7 год	100	100	100	96,1	88,9	94,5	95,7	97,4	100	100	100	100

На рис. 1.4 побудовані графіки річних змін клімат. факторів.

Графіки дозволяють наочно виявити основні істотні для архітектурно-будівельного проектування межі клімату району будівництва. Нанесення на графіки ліній граничних значень температур і відносної вологості дозволяють виявити межі і ступінь перегріву приміщень влітку (лінія температури 21°C) і наявність відносної вологості повітря у ранішні і денні години.

Зокрема, на графіках рис. 1.4 видно, що в Києві перегрів приміщень спостерігається в основному в денний час в червні, липні і серпні. Середньомісячні перевищення температур понад температури 21°C складає відповідно 2,1°C, 4,2°C і 3,05°C. Підвищена вологість вдень (вище лінії вологості 70 %) спостерігається у січні, лютому і грудні.

Зранку вологість підвищена протягом всього року. При цьому в осінній і зимовий періоди вона складає 100 %.

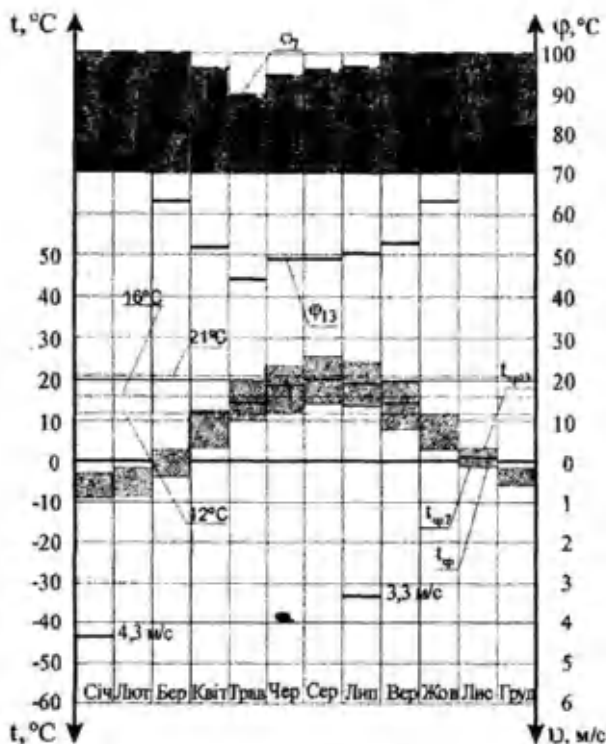


Рисунок 1.4 – Оцінка ходу річних змін температури, вологості і швидкості руху повітря для клімату м. Києва

Лінії температур 16°C і 12°C визначають межі для експлуатації відкритих приміщень відповідно за відсутності і наявності інсоляції [10]. Видно, що відкриті приміщення в кліматі Києва можуть використовуватися з травня по вересень включно.

Хід зміни температур в денні години дозволяє оцінити необхідність захисту від сонця в літню пору року. Потреба і вид захисту від сонця визначається тривалістю періоду з температурою повітря 20°C і вище [10]. Згідно [12] рекомендується вибирати відповідний вид захисту від сонця: при тривалості періоду до 20 днів – внутрішні пристрої; від 20 до 40 днів – внутрішні або міжскляні; від 41 до 60 днів – міжскляні або зовнішні в поєднанні з теплозахисним склом; більше 100 днів – зовнішні з штучним охо-

лоджуванням. На графіках рис. 1.4 видно, що в Києві перевищення температури 20 °С спостерігається вдень протягом 90 днів, і отже для захисту від сонця необхідно застосовувати міжскляні або зовнішні пристрої в поєднанні з теплозахисним склом.

Найнесприятливіші умови взимку в Києві спостерігаються в січні при низькій температурі і високій вологості повітря при достатньо високій швидкості вітру.

1.4.2 Загальна оцінка погодних умов і вибір режиму експлуатації будівель

Аналіз фонових умов району будівництва у вигляді ходу змін кліматичних параметрів дозволяє встановити тип погоди, який характеризується середньомісячною температурою повітря, середньомісячною вологістю повітря і середньомісячною швидкістю вітру.

Розрізняють сім типів погоди: жарка, суха жарка, тепла, комфортна, прохолодна, холодна, суворя. Мінімальна тривалість типу погоди визначається періодом в 1 місяць окремо для денного і нічного часу доби. Характеристика типів погоди наведена в таблиці 1.5.

Залежно від типу погоди при проектуванні встановлюється зв'язок приміщень будівлі з зовнішнім середовищем. Характер зв'язку називається експлуатаційним режимом приміщення [10]. Існують чотири режими експлуатації житлових будівель: ізольований, закритий, напіввідкритий, відкритий. Характеристика режимів дана в табл. 1.5. Зміна критеріїв в 4 і 5 графах табл. 1.5 указують на важливість того або іншого поєднання кліматичних параметрів. Наприклад, для погоди жаркої, теплої і комфортної важливе поєднання температури повітря з відносною вологістю, а для погоди суворої, холодної і прохолодної – поєднання температури повітря з вітром. Запис погоди в денний і нічний (у ранковий) час за 12 місяців можна робити у вигляді таблиці. Приклад такого запису типів погоди для Києва даний в табл. 1.6. При записі використані умовні позначення типів погоди: к - комфортна, т - тепла, пр - прохолодна, х - холодна, с - суворя, з - посушлива (суха жарка), ж - жарка.

Таблиця 1.5 – Класифікація типів погоди і режими експлуатації житла

Тип погоди	Режим експлуатації приміщення	Середньомісячна температура повітря, °С	Середньомісячна відсоток вологості, %	Середньомісячна швидкість вітру, м/с
Жарка (сильний перегрів при нормальній вологості)	Ізольований. Характерні затінювання, аерація, компактне об'ємно-планувальне рішення будівель, повне кондиціонування повітря, спонукальна і витяжна вентиляція, повітропроникність і теплозахист огорож	40 і вище 32 і вище 25 і вище	24 і менш 25 - 49 50 і більш	— — —
Суха жарка (сильний перегрів при низькій вологості)	Закритий. Характерні затінювання, захист від заповишених вітрів, штучне охолодження приміщень без зниження вологості приміщення, повітропроникність, теплозахист огорож	32-39,9	24 і менше	—
Тепла (перегрів)	Напіввідкритий. Характерні затінювання і аерація, крізне (кутове, вертикальне) провітрювання квартири, лоджії і веранди, механічні вентилятори-фени, трансформація огорож	24 - 27,9 20 - 24,9 24 - 31,9 28 - 31,9	50 - 74 75 і більш 24 і менш 25 - 49	— — — —
Комфортна (тепловий комфорт)	Відкритий. Кліматозахистна функція архітектури не характерні, типові лоджії, веранди	12 - 23,9 12 - 23,9 12 - 27,9 12 - 19,9	24 і менш 50 - 74 25 - 49 75 і більш	— — — —
Прохолодна	Напіввідкритий. Захист від вітру, орієнтація на сонце, опалювання малої потужності, трансформація і необхідна повітропроникність огорож	4 - 11,9	—	0 і більш
Холодна (охолодження)	Закритий. Захист від вітру, орієнтація на сонце, компактне об'ємно-планувальне рішення, закриті сходи, шафи для верхнього одягу, центральне опалювання середньої потужності, витяжка, повітропроникність і теплозахист огорож	-35,9...+4 -27,9...+4 -19,9...+4 -11,9...+4	— — — —	1,9 і нижче 2 - 4,9 5 - 9,9 10 і більш

Суворі (сильні охолоджу- вання)	Ізольований. Бажані переходи між житлом і мережею перинного обслуговування, максимальна компактність будівель, опалювання великої потужності, штучна вентиляція з обігрівом і зволоженням повітря, високі повітронепроникність і теплозахист будівель, подвійний тамбур, шафи для верхнього одягу	-36 і нижче	—	1,9 і менш
		-28 і нижче	—	2 – 4,9
		-20 і нижче	—	5 – 9,9
		-12 і нижче	—	10 і більш
Примітка. Мінімальною тривалістю типу погоди, визначаючого режим експлуатації житла, приймається 1 міс.				

Таблиця 1.6 – Запис типів погоди за 12 місяців року у нічний і денний час для м. Києва

Час доби	Місяць року											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ніч	х	х	х	х	пр	к	к	к	пр	пр	х	х
день	х	х	х	пр	к	к	т	т	к	пр	х	х

Замість табличного запису можна також використовувати запис в іншій компактнішій формі. Наприклад, для Києва вона має вигляд 11х4пр5к3т. Запис показує щомісячний стан погоди за рік і дає можливість достатньо чітко визначити кліматологічну суть проектованої житлової будівлі.

За даними про погодні умови і їх тривалість встановлюються такі типологічні вимоги до житлових будівель, як площа відкритих приміщень квартири (балкони, лоджії, веранди), раціональна ширина житлового будинку, вид провітрювання квартир і ін. Наприклад, як видно з табл. 1.6 і відповідному їй короткому запису в Києві взимку переважає холодний тип погоди, а влітку – комфортний. Таким умовам відповідають два режими експлуатації будівель: взимку – закритий, влітку – відкритий та напіввідкритий. Такі типи погоди і відповідні їм режими експлуатації пред'являють до будівлі певні вимоги. Житлові будівлі в Києві повинні мати зовнішні огорожі необхідних захисних якостей, компактне об'ємно-планувальне рішення, теплі сходи, тамбури, лоджії і веранди; можлива орієнтація квартир на сонячну сторону із забезпеченням в літній час захисту від сонця; необхідне кутове і крізне

провітрювання квартир; затінювання і обводнення території міської забудови; вентиляція в будівлях – канална витяжна. При цьому в літній час приміщення повинні бути максимально розкриті в навколишнє середовище через лоджії і веранди часто із застосуванням штучного провітрювання квартир та механічних вентиляторів-фенів.

Після виявлення типів погоди, режимів експлуатації будівель і встановлення відповідних ним типологічних вимог до житла можна виконати подальший пофакторний аналіз. При його проведенні враховують наявність і тривалість різних природно-кліматичних чинників (табл. 1.7).

Деякі з них (надходження сонячної радіації на стіни будівель різної орієнтації, температурнорадіаційний комплекс та ін.) враховують при всіх типах погоди. Інші чинники (вітер з дощем та ін.) враховують в першу чергу в умовах певного типу погоди.



Рисунок 1.5 – Діаграма для оцінювання літнього температурно-вологісного режиму району будівництва:

1 – верхнє критичне значення відносної вологості повітря; 2 – нижнє критичне значення відносної вологості повітря; 3 – оптимальна зона (комфортних умов)

Пофакторний аналіз дозволяє виконувати оцінку літнього температурно-вологісного режиму. Вона необхідна для встановлення виду провітрювання квартир при комфортній, теплій і жаркій погоді. Оцінку виконують виходячи з особливостей дії на людину вологості повітря в комплексі з температурою.

Характер цього зв'язку показаний на рисунку 1.5, де дані верхні і нижні критичні значення відносної вологості, які обмежують зону оптимальних значень, при різних температурах повітря. Поза оптимальною зоною визначені області дискомфорту з вказівкою негативно діючих чинників.

Таблиця 1.7 – Природнокліматичні чинники, що підлягають аналізу при різних типах погоди

Природнокліматичні фактори	Тип погоди згідно таблиці 5						
	Су-вора	Холодна	Прохолодна	Комфортна	Тепла	Жарка суха	Жарка
Сонячна радіація, що поступає на стіни будівель різної орієнтації	+	+	+	+	+	+	+
Комплекс температури з сонячною радіацією	+	+	+	+	+	+	+
Температура з вологістю	-	-	+	+	+	+	+
Вітер:							
- темп-волог. режим	+	+	+	+	+	+	+
- вітроснігозаноси	+	+	-	-	-	-	-
- вітер з дощем	-	-	+	+	+	-	+
- вітер з пилом	-	-	+	+	+	+	+
Вплив підстилявочої поверхні землі на кліматичні елементи:							
- вітер і сонце	+	+	+	+	+	+	+
- рельєф і вітер	+	+	+	+	+	+	+
- забудова	+	+	+	+	+	+	+
- озеленення	-	-	+	+	+	+	+
- акваторії	-	-	+	+	+	+	+
Примітки : + - чинники, що підлягають обліку; - - чинники, що не підлягають обліку.							

Аналіз температурно-вологісного режиму починається з побудови на основі діаграми рис. 1.5 спеціальних робочих графіків, які використовуються для оцінки температурно-вологісного режиму у денний час (13 год) і нічний (7 год) час (рис. 1.6). Для аналізу використовують тільки місяці з позитивною температурою в 7 і 13 год. Для умов Києва це період з квітня по жовтень. Знаючи середні значення температури повітря в 13 год будують верхню 3 і нижню 4 криві критичних значень відносної вологості в 13 год для досліджуваних місяців року. Потім те ж саме повторюють для 7 год (криві 5 і 6). Одержані криві 3, 4 і 5, 6 обмежують зони оптимальної вологості при позитивних температурах відповідно в 13 і 7 год.

Після цього на малюнок з кривими 3, 4 і 5, 6 накладають графіки фактичної відносної вологості в 7 год (крива 1) і в 13 год (крива 2) і аналізують їх положення щодо оптимальної зони.

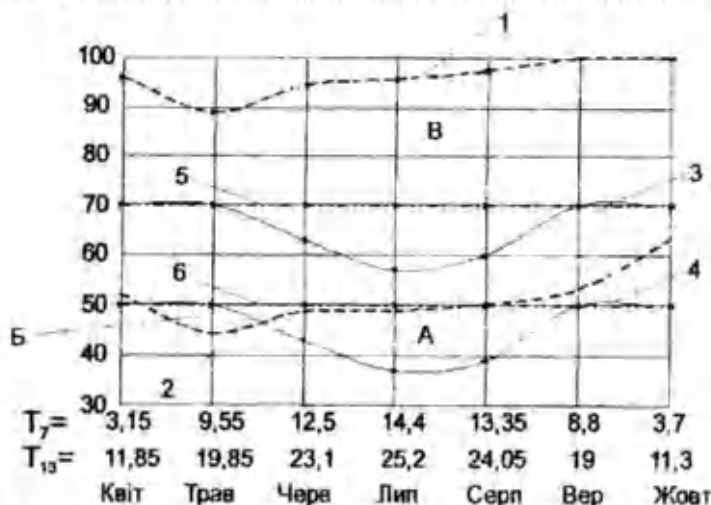


Рисунок 1.6 – Графіки літнього температурно-вологісного режиму погоди для умов Києва: 1 – середньомісячна відносна вологість в 7год; 2 – те саме в 13год; 3 – верхнє критичне значення відносної вологості для 13год; 4 – те саме нижнє; 5 – верхнє критичне значення відносної вологості для 7год; 6 – те саме нижнє; А – зона оптимальної вологості в 13год; Б – суха зона в 13год; В – зона збільшеної вологості в 7год.

Як видно з даних рис. 1.6, для умов Києва в денний час (крива 2 для 13 ч.) вологість в квітні нормальна (потрапляє в область оптимальних значень А), в травні нижче за оптимальне значення (зона Б). У решту місяців з червня по жовтень вологість повітря в денний час нормальна (зона А). У нічний і у ранішній час під час всіх теплих місяців року вологість підвищена (зона В).

Таким чином, положення кривої 2 свідчать про те, що літо на території Києва жарке з нормальною вологістю повітря в денний час. Аналіз даних рис. 6 підтверджує також раніше зроблений висновок про те, що бажано створити велику кількість лоджій і веранд, які забезпечують в нічний час влітку кризне провітрювання квартир.

1.4.3 Аналіз температурно-вітрового режиму місцевості

Оцінка вітрового режиму місцевості виконується при рішенні планувальних задач, пов'язаних з вітрозахистом, аерацією і вибором оптимальної орієнтації будівель, типів секцій, квартир і т.п. Вітер істотно впливає на тепловий стан людини. Приблизно оцінка цього впливу може бути виконана з використанням таблиці 1.8 [10].

Таблиця 1.8 – Оцінка швидкості вітру по тепловому стану людини [10]

Кліматичні зони	Швидкість вітру, м/с		
	1 – 3	3 – 4	5 і більше
Холодний і суворий клімат	Несприятлива в зимовий період	Несприятлива в зимовий період	Несприятлива в усіх зонах
Помірний і теплий клімат	Несприятлива в зимовий період	Несприятлива в зимовий період	Несприятлива в усіх зонах
Дуже теплий і жаркий клімат	Сприятлива	Сприятлива в умовах жаркого літа з нормальною і підвищеною вологістю	Несприятлива в усіх зонах

Як було зазначено вітровий режим місцевості характеризується напрямом руху, швидкістю і повторюваністю вітру в даному напрямі. Напрямок вітру визначається точкою горизонту, від якої дме вітер. Звичайно використовують вісім напрямів (румбів):

північ, північний схід, схід, південний схід, південь, південний захід, захід, північний захід. Повторюваність вітру по різних напрямках оцінюється у відсотках, до загального числа випадків.

Дані про швидкість і повторюваність вітру є в [2]. Для Києва ці відомості дані в табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Дані для побудови рози вітрів на території м. Києва

Показник	Напрямок вітру							
	Пн.	Пн.-Сх.	Сх.	Пл.-Сх.	Пл.	Пл.-Зх.	Зх.	Пн.-Зх.
Січень								
Швидкість вітру м/с	3,7	3,0	2,5	3,3	3,1	3,8	4,3	4,1
Повторюваність напрямку, %	11	10	11	12	9	11	20	16
Липень								
Швидкість вітру м/с	3,3	2,7	2,0	2,5	2,9	3,0	3,3	3,3
Повторюваність напрямку, %	18	12	8	7	5	8	18	24

Характеристика вітрового режиму місцевості звичайно виражається у вигляді рози вітрів. Для цього робиться побудова восьми напрямів і від точки їх перетину уздовж кожного напрямку відкладаються в довільному масштабі значення швидкості і повторюваності. З'єднання між собою прямими лініями значень точок швидкостей утворює розу швидкостей, а значень повторюваності – розу повторюваності.

При оцінці вітрового режиму місцевості по розі вітрів визначається переважаючий напрям вітру, напрям вітру з найбільшою швидкістю, вірогідність вітру з найбільшою швидкістю, якнайменша швидкість вітру з вірогідністю $p \geq 16\%$.

На рис. 1.7 приведені січнева і липнева рози вітрів для м. Києва. Їх аналіз показує, що для даного району будівництва взимку переважаючий напрям вітру - західний ($p = 20\%$); найбільша швидкість – 4,3 м/с із західного напрямку з повторюваністю 20 %; якнайменша швидкість вітру 4,1 м/с з повторюваністю $p \geq 16\%$.

Влітку переважаючий напрям вітру - північно-західний (24 %), найбільша швидкість 3,3 м/с з півночі, північно-західного та західного напрямків з повторюваністю відповідно 18, 24 та 18%; якнайменша швидкість вітру 3,3 м/с з повторюваністю ≥ 16 %.

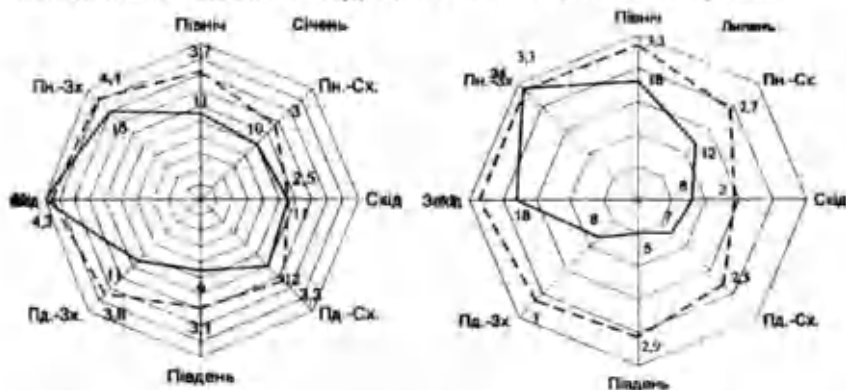


Рисунок 1.7 – Рози вітрів для м. Києва, суцільна лінія – повторюваність напрямку, %; пунктирна – швидкість вітру, м/с

Оцінку температурно-вітрового режиму рекомендується робити при всіх типах погоди виходячи з поєднань температури і вітру і їх дії на організм людини. Біокліматична класифікація погодних умов залежно від температури і вітру, приведена в табл. 1.10 [13]. З табл.1.10 видно, що в літній час, окрім температури і швидкості вітру, необхідно враховувати і хмарність, що впливає на сонячну радіацію.

Докладніший аналіз температурно-вітрового режиму можна робити, використовуючи графік, запропонований В.К. Луцкевичем [10].

Згідно графіку рис. 1.8 в умовах м. Києва ($t_{\text{сер}}^{\text{сн}} = -5,9^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{max}}^{\text{сн}} = 4,3$ м/с, $t_{\text{сер}}^{\text{літ}} = -19,8^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{max}}^{\text{літ}} = 3,3$ м/с) взимку холодно, вітер сильно дратує людину, тому бажаний захист від нього пішохідів, спостерігається охолодження будівель, можливий снігоперенос. Несприятливий температурно-вітровий режим взимку згідно даним табл. 1.8 зберігається протягом 100 % від загальної повторюваності вітру по румбах. Влітку вітер охолоджує і приносить полегшення, але при швидкості більше 4 м/с стає несприят-

ливим. З табл.1.9 бачимо, що подібні несприятливі умови в Києві влітку спостерігаються в 0% повторюваності (відсутні).

Таблиця 1.10 – Біокліматична класифікація погодних умов (по Е.М.Ратнеру) при позитивних (А) і негативних (Б) температурах повітря [13]

А									
Температура повітря, °С	Хмарність в балах								
	0 ... 4			5 ... 7			8 – 9		
	Швидкість вітру, м/с								
	0...2	2,1...4,0	4,1...6,0	0...2	2,1...4,0	4,1...6,0	0...2	2,1...4,0	4,1...6,0
41,9...39,0	Прогрів середовища								
38,9...36,0						Жарка			
35,9...33,0									
32,9...30,0									
29,9...27,0		Тепла							
26,9...24,0									
23,9...21,0	Комфортна								
20,9...18,0									
17,9...15,0									
14,9...12,0									
11,9...0,0	Прохолодна								

Б						
Температура повітря, °С	Швидкість вітру, м/с					
	0...2,0	2,1...2,5	2,6...4,0	4,1...4,5	4,6...5,0	Більш 5,0
Від 0 до -5,0	Простояння					
Від -5,1 до -10,0						
Від -10,1 до -15,0			Холодна			
Від -15,1 до -20,0						
Від -20,1 до -25,0						
Від -25,1 до -30,0						
Від -30,1 до -35,0					Сушня	
Від -35,1 до -40,0						

При проектуванні певних кліматичних умов іноді буває необхідно враховувати сумісні дії вітру з снігом, вітру з дощем, вітру з пилом. Дані про вітер з снігом використовуються при оцінці архітектурного рішення забудови, вибору і розміщення зелених насаджень, орієнтації будівель по сторонах світу з урахуванням відкладень снігу та ін. Дія вітру з дощем враховується при оцінці ступеня зволоженості стін будівель косими дощами і розробці за-

ходів по захисту від них. У великопанельних будівлях інтенсивність дії дощу з вітром враховується при виборі стиків панелей. Вітер з пилом впливає на планувальне рішення забудови, конструктивне і планувальне рішення будівель.

1.4.4 Аналіз сонячної радіації району будівництва

При пофакторному аналізі клімату важливе значення має оцінка дії сонячної радіації.

Конкретні величини сонячної радіації, що поступає на горизонтальну і вертикальну поверхні, даються в нормативній і довідковій літературі [1, 2, 3].

Для докладного аналізу дії сонячної радіації будується діаграма (роза) по восьми напрямках горизонту. У кожному напрямі від центральної точки в масштабі відкладаються значення сумарної сонячної радіації, Вт/м², на вертикальні поверхні різної орієнтації, одержані точки сполучають плавною замкнутою кривою. Приклад такої діаграми для м. Києва приведений на рис. 1.8. Роза сонячної радіації допомагає уточнити орієнтацію житлових будівель по сторонах горизонту, планування квартир і будинків, пристрої світлопрозорих огорож, сонцезахисних екранів і т.д. Окрім рози сонячної радіації доцільно аналізувати також випромінювання сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню протягом року (рис. 1.9) і зміну сонячної радіації, що поступає на горизонтальну поверхню в липні при безхмарному небі (рис. 1.10) у різний час доби. Дані, використані на рис. 1.8, 1.9, 1.10, наведено в табл. 1.11, 1.12, 1.13.

Таблиця 1.11 – Сумарна сонячна радіація (пряма і розсіяна), що поступає на вертикальні поверхні різної орієнтації в липні при безхмарному небі, МДж/м² [1] м. Київ, 52 град. північної широти

Орієнтація	Північ	ПнСх	Схід	ПдСх
Радіація, МДж/м ²	212	340	518	511
Орієнтація	Південь	ПдЗх	Захід	ПнЗх
Радіація, МДж/м ²	452	511	518	340

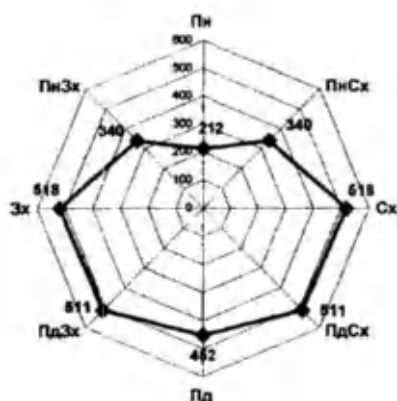


Рисунок 1.8 – Сумарна сонячна радіація (пряма і розсіяна), що поступає на вертикальні поверхні різної орієнтації в липні при безхмарному небі, МДж/м²

Таблиця 1.12 – Сумарна сонячна радіація (пряма і розсіяна) на горизонтальну поверхню при безхмарному небі, МДж/м² [1]
м. Київ, 52 град. північної широти

Місяць	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Черв.
	164	270	528	678	850	880
Місяць	Лип.	Серп.	Вер.	Жовт.	Лист.	Груд.
	882	719	540	344	194	126

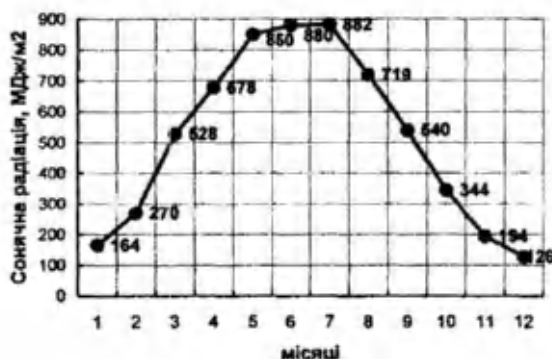


Рисунок 1.9 – Сумарна сонячна радіація (пряма і розсіяна) на горизонтальну поверхню при безхмарному небі за місяцями, МДж/м².

Таблиця 1.13 – Сонячна радіація ($\frac{\text{пряма}}{\text{розсіяна}}$), що надходить в липні на горизонтальну поверхню при безхмарному небі, Вт/м².

Широта, град. пів.ш.	Година доби до опівдня											Сума за добу	Середня добова кількість
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12			
	Година доби після опівдня												
	21-22	20-21	19-20	18-19	17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
52	—	—	33	119	223	364	495	586	666	719	6410	329	
	—	—	21	56	84	100	112	119	126	133	1502		

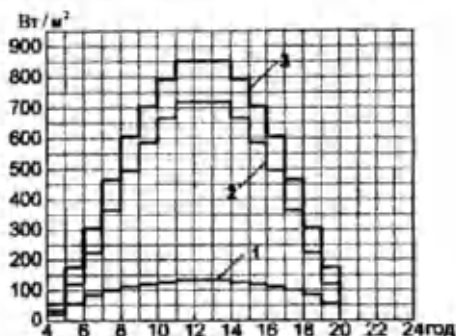


Рисунок 1.10 – Сонячна радіація, що надходить в липні на горизонтальну поверхню при безхмарному небі, Вт/м², в м. Києві:
1 – розсіяна; 2 – пряма; 3 – сумарна

При оцінці дії сонячної радіації враховується інсоляція квартир, тобто опромінювання їх прямим сонячним промінням. Пряме сонячне проміння володіє оздоровчою і бактерицидною властивостями. Для забезпечення оздоровчої дії інсоляції санітарними нормами встановлюється необхідний час щоденної безперервної інсоляції для певного періоду року. Виходячи з цієї умови, не допускається орієнтувати вікна всіх житлових кімнат квартири в межах сектора горизонту від 310° до 50° у всіх кліматичних районах. При двосторонній орієнтації житлових кімнат у вказаний сектор допускається орієнтувати не більш ніж одну житлову кімнату в двокімнатних квартирах; двох житлових кімнат в трикімнатних і чотирикімнатних квартирах.

Інсоляція може і негативно впливати на мікроклімат приміщень. Теплова дія інсоляції в літній час, особливо в південних районах, може привести до перегріву людини і приміщень. Сонячне проміння, що проникає в приміщення, віддає тепло поверхням підлоги, стін, устаткування, які в свою чергу стають джерелами теплового випромінювання.

Обмеження теплової дії інсоляції на приміщення за допомогою спеціальних сонцезахисних пристроїв відповідно до вимог норм слід застосовувати для районів між 57° і 47° пн.ш. при орієнтації вікон житлових будівель на південний захід (сектор горизонту від 200° до 270°) і для районів на південь від 47° пн.ш. при орієнтації на південь і південний захід (сектор горизонту від 160° до 290°).

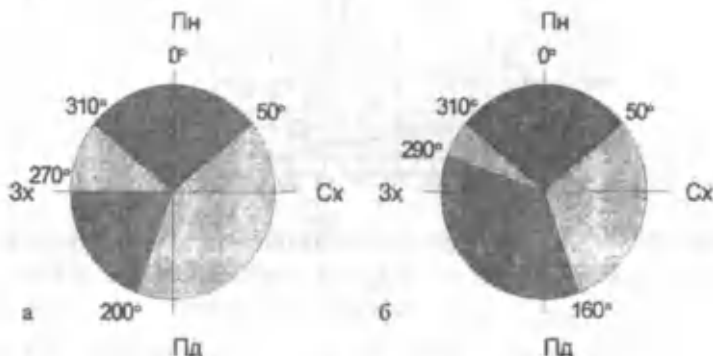


Рисунок 1.11 – Орієнтація житлових приміщень по сторонах світу; червоні – несприятливі сектора горизонту у кліматичних районах; коричневі – сектора горизонту, для яких треба застосовувати сонцезахисні пристрої а – для районів між 57° і 47° пн.ш.; б – для районів південніших від 47° пн.ш.

У практиці будівельного проектування для забезпечення вимог інсоляції набули поширення два типи житлових секцій. Перший тип допускає орієнтувати фасади будівлі в будь-яких напрямках, окрім сектора 310° ... 50° , другий тип – допускає орієнтацію одного з фасадів будівлі на північ при цьому одна або декілька

житлових кімнат квартири обов'язково повинні виходити на південну сторону.

1.4.5 Оцінка сторін горизонту по комплексу кліматичних чинників

Обмеження дії інсоляції на внутрішньоквартальну територію досягається планувальними заходами з використанням затінювання будівлями, деревами і спеціальними затінюючими пристроями. Докладніші методи проектування інсоляції приміщень будівель і забудови будуть розглянуті нижче в розділі, присвяченому природному освітленню і інсоляції.

Для вирішення ряду архітектурно-планувальних і конструктивних задач, наприклад, розташування вуличної мережі міста, орієнтації будівель, вибору типу житлової секції, розміру конструкції і розташування вікон, дверей та ін, необхідно робити комплексну оцінку дії кліматичних елементів по напрямках горизонту. Така оцінка виконується по основних елементах клімату: швидкості і повторюваності вітру, по інсоляції і ін.

Комплексну оцінку зручно виконувати за допомогою кругової діаграми, на якій у вигляді секторів відмічаються заборонені, небажані, несприятливі і сприятливі зони орієнтації.

Якщо, наприклад, застосовуються квартири з односторонньою орієнтацією вікон житлових кімнат, то для них на діаграмі відмічається заборонена за умов інсоляції зона орієнтації між румбами 310° і 50° .

На діаграмі наголошуються зони небажаної орієнтації по умові теплової дії інсоляції (наприклад, для районів від 57° до 47° пн.ш. сектор від 200° до 270°). При орієнтації будівель в цьому напрямі повинно бути зазначено про необхідність застосування сонцезахисних пристроїв.

Якщо з якого-небудь напрямку дме сильний холодний вітер, то на діаграмі відмічається сектор небажаної орієнтації, захоплюючий по піврумба ($22,5^{\circ}$) з обох боків уздовж цього напрямку.

Приклад такого комплексного аналізу сторін горизонту по кліматичних чинниках для м. Києва наведено на рис. 1.12.



Рисунок 1.12 – Оцінка сторін горизонту по комплексу кліматичних чинників для м. Києва: 1 - неприпустима орієнтація при односторонньому розташуванні житлових кімнат квартири; 2 - несприятлива з умов вітроохолодження; 3 - небажана орієнтація з умови перегріву приміщень

З діаграми рис. 1.12 видно, що будівлі в умовах Києва можуть бути орієнтовані без застосування додаткових заходів лише у секторі $60^{\circ} \dots 200^{\circ}$. При орієнтації фасадів будівель по інших напрямках необхідно: або застосування сонцезахисних пристроїв (від 200° до 270°), або архітектурно-планувальних заходів в міській забудові по ослабленню холодного вітру.

1.4.6 Аналіз місцевих кліматичних умов

На основі даних загального і пофакторного аналізу клімату роблять оцінку місцевих умов – **аналіз мікроклімату**.

Конкретна підстилаюча поверхня міської території або її ділянки впливають на основні елементи клімату. Аналіз мікрокліматичної мінливості в цьому випадку може виконуватися стосовно мікроклімату ландшафту або мікроклімату забудови.

Мікроклімат ландшафту оцінюється при отриманні характеристик ділянки забудови з пересіченням рельєфом, коли є необхідність у виявленні різниці мікроклімату в різних частинах діля-

ки. Подібний аналіз доцільний в районах з помітним впливом на мікроклімат чинників рельєфу, сонячної радіації і вітру.

Оцінку мікроклімату місцевості можливо робити з різним ступенем деталізації. Найбільше розповсюдження має перший рівень оцінки з найбільшим узагальненням даних про основні закономірності формування мікроклімату при різних параметрах підстилючої поверхні. У табл. 1.14 приведена інформація про основні закономірності формування мікроклімату. Ці дані рекомендується використовувати при аналізі конкретної території або міста [10].

Таблиця 1.14 – Основні закономірності формування мікроклімату в різних умовах підстилючої поверхні [10]

Елементи підстилючої поверхні	Закономірності формування клімату
Рельєф: вершини і відкриті верхні частини схилів	Вдень температура повітря на 2...4 °С нижче, ніж на навколишній місцевості; у ясні тихі ночі на 1,5...2 °С тепліше в порівнянні з рівним місцем і на 2...8 °С – з дном долин і підніжжям схилів; добова амплітуда температури повітря менше, мінімальні температури вищі, ніж в долинах і улоговинах; найсухіші добре провітрювані території
південні схили	Максимальна денна температура. За період з температурою повітря більш 10°C одержують тепла на 4...8 % більше, ніж на рівному місці; середні добові температури ґрунту за літній період вищі, ніж на північних схилах; вологість повітря менше; найінтенсивніше танення сніжного покриву; вітровий режим залежить від орієнтації по відношенню до напрямку вітру
північні схили	Найхолодніші (особливо влітку); за період з температурою повітря більш 10°C одержує тепло на 8...10 % менше, ніж на рівному місці; глибина сніжного покриву більша, ніж на південних схилах, схід його запізнюється на 14...15 днів; характер вітрового режиму також визначається експозицією по відношенню до вітрового потоку

навітряні і під- вітряні схили долини, улого- вини, нижні ча- стини схилів	Навітряні схили найхолодніші; одержують менше опадів; невелика глибина сніжного покриву; підвітряні південно-східні, південні і південно-західні схили найтепліші; велика кількість опадів; найбільша потужність сніжного покриву Значно більші добові амплітуди температури повітря і менша температурна інверсія в порівнянні з вершинами; долини, орієнтовані із заходу на схід, освітлені більш рівномірно, ніж долини меридіонального напрямку; істотне підвищення відносної вологості повітря, часте утворення туманів, роси; на дні замкнених долин без стоку або з утрудненим стоком холодного повітря вночі найнижчі температури і висока відносна вологість (часте виникнення «озер холоду»); невелика глибина сніжного покриву; погані умови провітрювання
Рослинність	Залежно від виду зелених насаджень знижується проникнення сонячної радіації (на 0,5...20 % прямою і на 2...22 % сумарної); можливе зниження температури повітря до 10°C; вітрозахисна ефективність лісових смуг залежить від їх конструкції, що визначає продувність смуги, вітрозахисна дія смуг конструкцій, що продувається, 50...60 Н, щільної - 35...40 Н, оптимальний ступінь ажурності 30...40 %
Водоймища, моря, крупні озера, водосховища	Весною і на початку літа водоймище охолоджує прилеглу територію, в кінці літа і восени утеплює; вночі поблизу водоймищ температура повітря на 2...3 °C вище, ніж в декількох кілометрах від берега; вдень водоймище знижує температуру повітря на 2...4 °C; вплив водоймищ виявляється також в зовложенні повітря і в зменшенні залорошеності; у добовому ході спостерігається зменшення швидкості вітру вдень і посилення вночі; середнє значення коефіцієнта швидкості вітру в теплий період 1,2...1,4; у районах із слабкими вітрами (до 2 м/с) з'являються або посилюються бризи; за характером впливу водоймищ виділяються зони постійного і сильного (1...3 км), слабого і несистематичного (3... 5 км) впливу

Другий і третій рівні аналізу мікроклімату ландшафту пов'язані з деталізацією впливу конкретних чинників. Їх, як правило, наводять на топографічній підоснові з підбором для кожної ділянки рельєфу збільшуючих або зменшуючих коефіцієнтів сонячної радіації і вітру, на основі спеціальних таблиць. Найчастіше при цьому використовується якісна оцінка, коли кожна ділянка на топографічній підоснові (рівна територія, схили південної або північної орієнтації, навітряні і підвітряні ділянки) оцінюють за мірою сприятливості з урахуванням сонячної радіації і вітрового режиму (див. табл. 1.15).

Таблиця 1.15 – Оцінка території за вітровим режимом

Загальна оцінка вітрового режиму	Вершини і піднесеності з плоскими схилами	Ступінь сприятливості форм рельєфу								
		Навітряні схили			Схили, паралельні вітру			Підвітряні схили		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Райони з сильними швидкостями вітру (повторюваність швидкості більше 5 м/с понад 20 %)		Несприятливі			Сприятливі			Несприятливі		
Те ж, з помірними швидкостями (повторюваність швидкості вітру 3...5 м/с понад 50 %, більше 5 м/с - менше 20 %)		Несприятливі			Помірно сприятливі			Сприятливі		

Мікроклімат забудови можна оцінювати на основі даних, одержуваних з натурних спостережень. Для практичних цілей можливо також використовувати відомості, приведені в табл. 1.16. Для більш точної оцінки формування мікроклімату в районі забудови необхідне проведення спеціальних розрахунків, що визначають відхилення значення фактичних кліматичних характеристик від характеристик за даними опорної метеостанції.

Таблиця 1.16 – Основні закономірності формування мікроклімату у забудові (за даними Г.К. Клімової) [10]

Елементи клімату	Закономірності формування мікроклімату (по відношенню до замських умов)
Сонячна радіація	Зниження до 20 % залежно від ступеня забруднення повітря, пори року і діб
Температура повітря	Підвищення на 1...4 °С залежно від густини забудови: у забудові густиною до 20 % - на 1...2 °С, густиною більше 20 % - на 3...4 °С (без урахування впливу отеплення на зниження температури). У містах-оазисах зони пустель пониження на 2...3 °С.
Швидкість вітру	Зниження на 20...70% залежно від густини забудови: у забудові густиною до 20 % - на 20 %, густиною від 20 до 30 % - на 20...50 %, густиною більше 30 % більш ніж на 50 %.
Примітка. Під густиною забудови розуміється відношення площі, зайнятої будівлями, до загальної площі даної території.	

1.5 Будівельно-кліматична паспортизація забудови

Результати аналізу загальних і місцевих кліматичних умов району будівництва дозволяють виконати складання будівельно-кліматичного паспорта.

Будівельно-кліматичний паспорт є зведенням метеорологічних та геофізичних даних, що використовуються в містобудівній практиці, і які характеризують загальні і місцеві погодні умови. Початковими даними для складання паспорта є загальні і кліматичні характеристики або показники по елементах клімату.

До загальних характеристик відносяться: сонячна радіація (що припадає на горизонтальну і вертикальну поверхні, тривалість опромінювання, ультрафіолетова радіація); температури повітря (середня, екстремальна, зимового, літнього і опалювального періодів); вітер (напрямок, швидкість, повторюваність); вологість повітря (відносна, абсолютна); опади (суми середні і екстремальні, сніжний покрив, ожеледь); промерзання ґрунтів (глибина, хід нульової ізотермія в зимовий час).

Комплексні характеристики включають: кліматичне районування; радіаційний і тепловологісний режими; погодні умови (суворість клімату, термічна роза вітрів); світловий клімат; снігопе-

ренос; пилеперенос; косі дощі. Загальні і комплексні характеристики використовуються на перших стадіях містобудівного проектування при техніко-економічному обґрунтуванні генерального плану міста.

БУДІВЕЛЬНО-КЛІМАТИЧНИЙ ПАСПОРТ МІСТА _____ ЗАГАЛЬНІ ДАНІ 1			АРХІТЕКТУРНИЙ АНАЛІЗ КЛІМАТУ 12 18 13		АРХІТЕКТУРНИЙ АНАЛІЗ МІКРОКЛІМАТУ 19 20	
ІНЖЕНЕРНО-КЛІМАТИЧНІ РОЗРАХУНКИ 2 СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ 8 14						
3 ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ 9 15						
4 5 6 ВОЛОГІСТЬ, ОПАДИ, ОЖЕЛЕДЬ 10 16						
7 11 ВІТРОВИЙ РЕЖИМ 17						

Рисунок 1.13 – Уніфікована форма кліматичного паспорта

Місцева або мікрокліматична ситуація в місті, як показано раніше, характеризується показниками, одержуваними при експериментальних спостереженнях або розрахунком в умовах забудови, що склалася. Ці дані використовуються при розробці проектів детального планування і забудови житлових районів і мікрорайо-

нів, а також при реконструкції забудови в процесі реалізації генпланів міст.

У [5] розроблена і запропонована уніфікована форма будівельно-кліматичного паспорта. Паспорт складається з 4 частин і підрозділяється на 20 граф.

Перша частина паспорта містить загальні дані. У ній указується кліматичний район і підрайон, загальні геофізичні умови, широта і довгота місцевості. У другій частині представляється інформація про сонячну радіацію, температурний режим, вологість, опади і вітровий режим. У третій частині виконується аналіз клімату району будівництва, визначаються типи погоди, їх тривалість по сезонах, проводиться комплексна оцінка кліматичних чинників по сторонах горизонту. Четверта частина звичайно включає аналіз мікроклімату характерних територій залежно від природних і містобудівних чинників.

Уніфікована форма будівельно-кліматичного паспорта приведена на рис. 1.13. Кожна графа паспорта, відмічена на рис. 1.13 цифрами, повинна містити наступні дані: 1 – кліматичний район; 2 – світокліматичний пояс; 3 – розрахункові температури повітря; 4 – зона вологості; 5 – снігове навантаження; 6 – навантаження ожеледі; 7 – вітрове навантаження; 8 – кількість тепла за добу в липні, що надходить від сумарної (прямої і розсіяної) сонячної радіації на горизонтальну і вертикальну поверхні за дійсних умов хмарності; 9 – середньомісячні і екстремальні значення амплітуди температури зовнішнього повітря, тривалість опалювального періоду і інші характеристики температурного режиму; 10 – абсолютна і відносна вологість повітря, кількість опадів, висота сніжного покриву; 11 – максимальні і мінімальні швидкості вітру і їх повторюваність по румбах за січень і липень; 12 – тривалість однотипного характеру погоди; 13 – класи погоди (індекс біокліматичної зони); 14 – оцінка кола горизонту за умов теплового опроміювання; 15 – добовий хід температури повітря за теплий період; 16 – річний графік температурно-вологісного режиму, осадки за рік, обсяги перенесення снігу; 17 – показники напрямку і швидкості вітру по місяцях з вказівкою несприятливого сектора горизонту, дані про ступінь заповищеної місцевості; 18 – комплексна оцінка сторін горизонту по ряду чинників: кількості соняч-

ного тепла, інсоляції, характеристикам вітру, перенесенню снігу, косим дощам, запорошеності і ін.; 19 - мікроклімат ландшафту (докладна характеристика); 20 - мікроклімат забудови міста (докладна характеристика).

1.6 Архітектурно-планувальні, конструктивні і інженерно-технічні заходи при проектуванні будівель і забудови, що визначаються кліматичними факторами

На основі загальної оцінки клімату місцевості встановлюється об'єм архітектурно-планувальних, конструктивних і інженерно-технічних вимог до будівлі і міської забудови, визначається перелік заходів щодо пом'якшення несприятливої дії клімату. Основою для їх розробки можуть служити дані табл. 1.17.

Таблиця 1.17— Архітектурно-планувальні, конструктивні і інженерно-технічні засоби регулювання мікроклімату у будівлях і на території міської забудови

Режим експлуатації і тип погоди	Архітектурно-планувальні засоби	Конструктивні	Інженерно-технічні
Відкритий, комфортна	Відкриті приміщення, лоджії, веранди. Побутові процеси на повітрі	Трансформація огорожі	Не використовуються
Напіввідкритий, прохолодна	Орієнтація на сонці. Захист території від вітру, використання інтермії	Одинарне і подвійне скління, трансформація огорож	Опалювання малої потужності, нерегулярне, вентиляція природна витяжна з притокою через клапани квартир
Закритий, холодна	Компактні рішення, зменшення тепловтрат, теплі сходи, тамбури, шафи для верхнього одягу в квартирах, орієнтація на сонячній стороні. Захист території від вітру будівлями і посадками хвойних порід	Огорожі необхідних теплозахисних якостей і повітропроникності. Подвійне і потрійне скління	Центральне опалювання середньої потужності. Вентиляція природна витяжна з притокою через щілини вікон

Ізольований, сувора	Максимальна компактність, мінімальні тепловтрати, теплі сходи, подвійні тамбури, вентиляовані шафи для верхнього одягу в квартирах, гардеробні кімнати в суспільних будівлях. Захист території від вітру будівлями, кріті вулиці і центри, утеплені зупинки суспільного транспорту	Висока повітропроникність і теплозахисні якості огорож. Потрійне і четверне скління. Фундаменти з урахуванням вічної мерзлоти	Центральне опалювання великої потужності. Механічна приточновитяжна вентиляція з підігрівом і зволоженням повітря
Напіввідкритий, тепла	Крізне, кутове провітрювання, захист від сонця, відкриті приміщення, лоджії, веранди. Сходи напіввідкриті, без тамбурів. Орієнтація на південь і північ. Затінювання і аерація територій. Використовування нічних прохолодних вітрів	Трансформація огорожі, захист від сонця	Механічні вентилятори, фени. При інсоляції потрібне штучне охолодження
Закритий, жарка, суха	Компактні рішення, зменшення надходження тепла, захист від сонця. Затінювання і обводнення територій. Захист від запылених вітрів, використання нічних прохолодних вітрів	Огорожа неохідних теплозахисних якостей і повітропроникності захист від сонця стін і вікон. Скління подвійне або одинарне	Штучне охолодження повітря без зниження вологості повітря, механічні вентилятори, фени
Ізольований, жарка з нормальною і підвищеною вологістю	Компактні рішення, мінімальні теплонадходження, захист від сонця. Затінювання пішохідних шляхів будівлями, максимальна аерація території	Висока повітропроникність і теплозахисні якості огорож. Захист від сонця. Скління подвійне або одинарне з протимоскитними сітками	Повне кондиціювання, спонукальна вентиляція, витяжна вентиляція, фени

При розташуванні будівель на місцевості слід враховувати всі особливості клімату і, в першу чергу, напрям пануючих вітрів,

інсоляцію міської забудови і житлових приміщень.

Для забезпечення провітрювання приміщень необхідно враховувати наступне. При орієнтації фасадів перпендикулярно до вітру, швидкість вітру, що проникає в будівлю через розкриті вікна знижується до 20 % при крізовому провітрюванні і до 7 % - при односторонньому. При орієнтації фасадів під кутом в 45° до напрямку вітру, швидкість вітру, що проникає в будівлю за тих же умов, знижується ще додатково на 15...20 %.

При плануванні міст повинен передбачатися захист житлового району від задимлення з сторони промислових підприємств. Це досягається або розташуванням промислової зони в напрямі з якнайменшою повторюваністю вітру або збільшенням ширини санітарно-захисної зони до розмірів що виключають задимлення.

Напрямок основних магістралей і мережі вулиць рекомендується вибрати відповідно до рози вітрів так, щоб забезпечити належну аерацію міського району, або навпаки, захист його від несприятливих сильних вітрів.

При збігу напрямку вітру з напрямом прямої магістралі, уздовж якої фронтально розташовуються будівлі, виникає ефект посилення швидкості вітру до 20 %. Якщо цей ефект небажаний, то будівлі слід розташовувати під кутом в 45° ... 90° до напрямку магістралі. Підвищення швидкості при стисненні повітряного струменя можна використовувати для поліпшення мікроклімату міської забудови в південних районах, застосовуючи так звану «віялову» забудову, що підсилює навіть слабкий рух повітря.

Для послаблення дії вітру на внутрішньо квартальний простір можна використовувати будівлі - екрани з підвищеною герметичністю віконних отворів. Будівля, що зустрічає вітровий потік, створює вітрову тінь (затишшя) в межах 3 - 8 висот. При захисті внутрішньоквартального простору від несприятливого вітру рекомендується відстань між сусідніми будівлями приймати в межах 3 - 8 висот, а для створення аерації кварталу - відстані більше 3 - 8 висот.

При великій повторюваності вітру (круглі «рози швидкостей» і «рози повторюваності»), пов'язані з інтенсивним перенесенням снігу або піску доцільне застосування периметральної забудови. Будівлі, що розташовуються по периметру, виконують в цьому

випадку роль екранів і повинні мати добре захищаючі конструкції, що герметизуються (вікна, двері, зовнішні стіни). При цьому допоміжні приміщення (сходи, кухні, санвузли і т.і.) рекомендується орієнтувати назовні по відношенню до внутрішньо квартирного простору.

При великих швидкостях вітру і інтенсивності перенесення снігу, піску доцільно забудові надавати обтічну форму, що знижує тиск на поверхні будівель. Можна рекомендувати вільну або рядову забудову, при якій будівлі торцями обернуті в сторони переважаючого вітру. При великих швидкостях вітру взимку входи в будівлі рекомендується розташовувати з боку фасадів, паралельних напрямку переважаючих вітрів або захищених від них. При цьому зменшується охолодження приміщень будівель, відкладення снігу поблизу входів будуть так само меншими. При рясних снігопадах необхідно двері входів в будівлі проектувати такими, щоб відкривалися всередину.

Для суворого клімату з тривалою холодною погодою і сильними вітрами рекомендується застосування будівель під одним дахом або з'єднання їх закритими теплими переходами. У промисловому будівництві досягти цього можна блокуванням виробничих цехів або невеликих підприємств в одній будівлі, що дозволяє скоротити шлях руху людей у відкритому просторі і полегшити повсякденні функціональні зв'язки. При холодній погоді з сильними вітрами будівлі повинні мати по можливості обтічну форму без виступів і западин щоб уникнути відкладення в них снігу. Для пом'якшення несприятливої дії кліматичних чинників використовуються різні схеми планувальних рішень забудови міських територій деякі з них приведені на рис. 1.14.

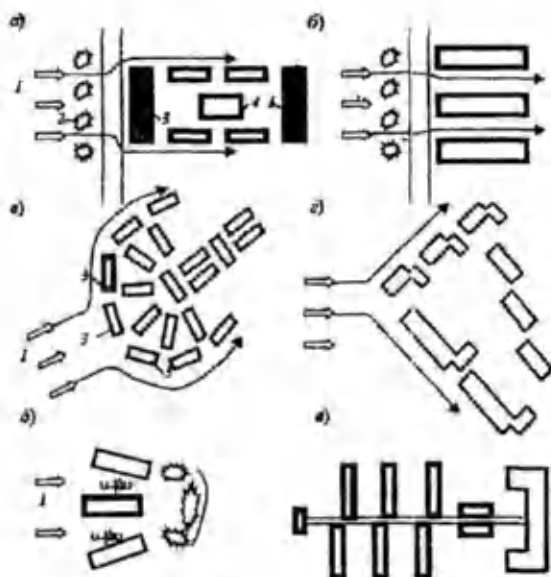


Рисунок 1.14 – Прийоми забудови міських територій для різних кліматичних умов: а – периметральна забудова при повторюваності погоди з перенесенням зважених частинок; б – периметральна забудова обтічної форми з боку переважаючих вітрів великої швидкості; в – відкрита забудова з торцями будівель, обернутих у бік штормових вітрів; г – вітровідбивна забудова; д – планування, що активізує швидкість вітру в жаркому кліматі; е – житлові будівлі з теплими переходами

Кліматичні чинники: температура і вологість повітря, вітер, опади, сонячна радіація і інші повинні враховуватися на всіх етапах проектування будівель, споруд і забудови. Увага проектувальників повинна бути направлена на створення комфортних умов перебування людини як на території, так і в закритих приміщеннях (необхідні параметри мікроклімату в житлових та суспільних будівлях наведено в ГОСТ 30494-96). При цьому потрібно прагнути до максимально повного використання позитивних кліматичних факторів і усуненню несприятливої дії, до зниження витрат на експлуатацію будівель.

1.7 Мікроклімат приміщення

Мікроклімат приміщення – стан внутрішнього середовища приміщення, що впливає на людину, і який характеризується показниками температури повітря і огорожувальних конструкцій, вологістю і рухливістю повітря.

У приміщеннях житлових і громадських будинків слід забезпечувати оптимальні або допустимі показники мікроклімату в обслуговуваній зоні.

Необхідні параметри мікроклімату зон, що обслуговуються, приміщень житлових, громадських, адміністративних та побутових будівель встановлюються ГОСТом 30494-96 „Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях” та іншими нормативними документами в залежності від призначення приміщення і періоду року¹. Стандарт встановлює загальні вимоги до оптимальних і допустимим показниками мікроклімату і методи контролю.

Зона приміщення, що обслуговується (зона проживання) – простір у приміщенні, обмежений площинами, паралельними підлозі та стінам: на висоті 0,1 і 2,0 м над рівнем підлоги (але не ближче ніж 1 м від стелі при стельовому опалюванні), на відстані 0,5 м від внутрішніх поверхонь зовнішніх і внутрішніх стін, вікон та опалювальних приладів.

Оптимальні параметри мікроклімату – поєднання значень показників мікроклімату, які при тривалому і систематичному впливі на людину забезпечують нормальний тепловий стан організму при мінімальному напруженні механізмів терморегуляції і відчуття комфорту не менш ніж у 80% людей, що знаходяться в приміщенні.

Допустимі параметри мікроклімату – поєднання значень показників мікроклімату, які при тривалому і систематичному впливі на людину можуть викликати загальне і локальне відчуття дискомфорту, погіршення самопочуття і зниження працездатності

¹ Холодний період року – період року, який характеризується середньодобовою температурою зовнішнього повітря, що дорівнює 8°C і нижче. Теплий період року – період року, який характеризується середньодобовою температурою зовнішнього повітря вище 8°C .

при посиленій напрузі механізмів терморегуляції і не викликають пошкоджень або погіршення стану здоров'я.

Параметри, що характеризують мікроклімат приміщень:

- температура повітря;
- швидкість руху повітря²;
- відносна вологість повітря;
- результуюча температура приміщення³;
- локальна асиметрія результуючої температури.

Оптимальні і допустимі норми мікроклімату в обслуговуваній зоні приміщень (у встановлених розрахункових параметрах зовнішнього повітря) повинні відповідати значенням, наведеним у таблицях 1.18 і 1.19.

Таблиця 1.18 – Оптимальні і допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в обслуговуваній зоні приміщень житлових будинків і гуртожитків

Період року	Назва приміщення	Температура повітря, °С		Результуюча температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с	
		оптимальна	допустима	опт.	доп.	опт.	доп, не більше	опт., не більш	доп, не більше
Холодний	Житлова кімната	20-22	18-24 (20-24)	19-20	17-23 (19-23)	45-30	60	0,15	0,2
	Кухня	19-21	18-26	18-20	17-25	НН ³	НН	0,15	0,2
	Туалет	19-21	18-26	18-20	17-25	НН	НН	0,15	0,2
	Ванна, суміщений санвузол	24-26	18-26	23-27	17-26	НН	НН	0,15	0,2
	Приміщення для відпочинку та учб. занять	20-22	18-24	19-21	17-23	45-30	60	0,15	0,2
	Міжквартирний коридор	18-20	16-22	17-19	15-21	45-30	60	0,15	0,2
	Вестибюль, складова клітка	16-18	14-20	15-17	13-19	НН	НН	0,2	0,3
	Комора	16-18	12-22	15-17	11-21	НН	НН	НН	НН
Теплий	Житлова кімната	22-25	20-28	22-24	18-27	60-30	65	0,2	0,3

² Швидкість руху повітря – усереднена за об'ємом зони, що обслуговується, швидкість руху повітря.

³ Результуюча температури навколишнього середовища – комплексний показник радіаційної температури приміщення і температури повітря приміщення.

Таблиця 1.19 – Оптимальні і допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в обслуговуваній зоні громадських будівель

Період року	Назва приміщення	Температура повітря, °С		Результуюча температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с	
		оптимальна	допустима	опт.	доп.	опт.	доп., не більше	опт., не більш	доп., не більше
Холодний	1 категорія	20-22	18-24	19-20	17-23	45-30	60	0,2	0,3
	2	19-21	18-23	18-20	17-22	45-30	60	0,2	0,3
	3а	20-21	19-23	19-20	19-22	45-30	60	0,2	0,3
	3б	14-16	12-17	13-15	13-16	45-30	60	0,2	0,3
	3в	18-20	16-22	17-20	15-21	45-30	60	0,2	0,3
	4	17-19	15-21	16-18	14-20	45-30	60	0,2	0,3
	5	20-22	20-24	19-21	19-23	45-30	60	0,15	0,2
	6	16-18	14-20	15-17	13-19	НН	НН	НН	НН
	Ванні, душеві	24-26	18-28	23-25	17-27	НН	НН	0,15	0,2
	Дитячі дошкільні заклади								
	Групова роздягальня і туалет для ясельних і молодших груп	21-23	20-24	20-22	19-23	45-30	60	0,1	0,15
	для середніх та дошкільних груп	19-21	18-25	18-20	17-24	45-30	60	0,1	0,15
Теплий	Спальня для ясельних і молодших груп	20-22	19-23	19-21	18-22	45-30	60	0,1	0,15
	для середніх та дошкільних груп	19-21	18-23	18-22	17-22	45-30	60	0,1	0,15
	Приміщення з постійним перебуванням людей	23-25	18-28	22-24	19-27	60-30	65	0,3	0,5

НН – не нормується; опт – оптимальна; доп – допустима;
Примітка: Значення в дужках стосуються будинків для престарілих та інвалідів

Класифікація приміщень, використана в таблиці 1.19:

1 категорія – приміщення, в яких люди в положенні лежачи або сидячи знаходяться в стані спокою та відпочинку;

2 – приміщення, в яких люди зайняті розумовою працею, навчанням;

3а – приміщення з масовим перебуванням людей, в яких люди перебувають переважно в положенні сидючи без вуличного одягу;
 3б – приміщення з масовим перебуванням людей, в яких люди перебувають переважно в положенні сидючи в вуличному одязі;
 3в – приміщення з масовим перебуванням людей, в яких люди перебувають переважно в положенні стоячи без вуличного одягу;
 4 – приміщення для занять рухливими видами спорту;
 5 – приміщення, в яких люди перебувають у напівроздягненому вигляді (роздягальні, процедурні кабінети, кабінети лікарів і т.п.);
 6 – приміщення з тимчасовим перебуванням людей (вестибюлі, гардеробні, коридори, сходи, санвузли, курильні, комори).

Локальна асиметрія результуючої температури⁴ повинна бути не більше 2,5°C для оптимальних і не більше 3,5°C для допустимих показників.

При забезпеченні показників мікроклімату в різних точках зони, що обслуговується допускається:

- Перепад температури повітря не більше 2°C для оптимальних показників і 3°C – для допустимих;
- Перепад результуючої температури приміщення по висоті обслуговуваної зони – не більше 2°C;
- Зміна швидкості руху повітря – не більше 0,07 м/с для оптимальних показників і 0,1 м/с – для допустимих;
- Зміна відносної вологості повітря – не більше 7% для оптимальних показників і 15% – для допустимих.

У громадських будівлях в неробочий час допускається знижувати показники мікроклімату при умови забезпечення необхідних параметрів на початок робочого часу.

Результуючу температуру приміщення t_{su} при швидкості руху повітря до 0,2 м / с слід визначати за формулою

$$t_{su} = \frac{t_p + t_r}{2},$$

⁴ Локальна асиметрія результуючої температури – різниця результуючих температур в точці приміщення, визначених кульовим термометром для двох протилежних напрямків.

Температура кульового термометра – температура в центрі тонкостінної порожнистої сфери, що характеризує спільний вплив температури повітря, радіаційної температури і швидкості руху повітря.

де t_p – температура повітря в приміщенні; t_r – радіаційна температура приміщення⁵.

Результуючу температуру приміщення слід приймати при швидкості руху повітря до 0,2 м/с рівній температурі кульового термометра при діаметрі сфери 150 мм.

При швидкості руху повітря від 0,2 до 0,6 м/с t_{su} слід визначати за формулою

$$t_{su} = 0,6t_p + 0,4t_r.$$

Радіаційну температуру t_r слід обчислювати за температурою кульового термометра за формулою

$$t_r = t_b + m\sqrt{v(t_d - t_p)},$$

де t_b – температура за кульовим термометром; m – константа, рівна 2,2 при діаметрі сфери до 150 мм або визначається за додатком Б ГОСТ 30494-96; v – швидкість руху повітря або за температурами внутрішніх поверхонь огорожень та опалювальних приладів

$$t_r = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i},$$

де A_i – площа внутрішньої поверхні огорож і опалювальних приладів; t_i – температура внутрішньої поверхні огорожень та опалювальних приладів.

Оптимальні і допустимі величини показників мікроклімату у виробничих приміщеннях відповідно до санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень наведено у ГОСТ 12.1.005-88 "Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны".

⁵ Радіаційна температура приміщення – осереднена за площею температура внутрішніх поверхонь огорожень приміщення та опалювальних приладів.

Контрольні запитання

1. Дайте означення "клімату". Основні чинники клімату.
2. Які є складові сонячної радіації? Поясніть відмінності.
3. Поясніть що таке абсолютна і відносна вологість, точка роси.
4. Скільки зон вологості припадає на територію України?
5. Яка кількість кліматичних районів є в Україні?
6. Чим характеризується континентальний клімат?
7. Як знайти середньомісячну температуру о 13 год (та 7 год) знаючи середньомісячну температуру повітря та середню амплітуду температур повітря за місяць?
8. Який зміст мають температури 12°C, 16°C та 21°C?
9. Чому необхідно аналізувати сонячну радіацію району будівництва?
10. Які є основні закономірності формування мікроклімату в різних умовах підстилаючої поверхні?
11. Які використовують архітектурно-планувальні, конструктивні і інженерно-технічні засоби регулювання мікроклімату у будівлях і на території міської забудови?
12. Які параметри характеризують мікроклімат приміщень?
13. Дайте визначення "оптимальним параметрам мікроклімату".

Розділ 2. ОСНОВИ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Вступ. Перенесення тепла, вологи, повітря

Розглянемо фізичні процеси, пов'язані з перенесенням тепла, вологи і повітря в захищаючих конструкціях (стінах, покриттях, підлогах, вікнах, ліхтарях і ін.).

Тепло – один з видів енергії, а волога і повітря представляють різновиди речовини, тому фізичний механізм процесів перенесення тепла (енергії), вологи і повітря (речовини) неоднаковий.

Параметри, які визначають інтенсивність і напрям руху теплового обміну і масообміну (при перенесенні вологи і повітря), називають **потенціалами перенесення**. В теплових процесах потенціал перенесення – температура, потенціал вологи і повітря – енергія, яку відносять до одиниці маси. Цю енергію виражають:

- парціальним тиском водяної пари – при перенесенні вологи, що дифундує в огорожі, переважно в пароподібній фазі;
- загальним тиском, який створюється, наприклад, силою тяжіння, дією вітру і іншими – при перенесенні вологи в рідкому стані або зволоженого повітря.

Перенесення тепла, вологи, повітря в огорожах і приміщеннях виникає тільки при різниці температури або тиску в різних зонах приміщень або ділянках захищаючих конструкцій.

У металах тепло переноситься потоком електронів, і теплопровідність є функцією електропровідності. Найбільш електропровідні метали у той же час і найбільш теплопровідні (мідь, алюміній). У діелектриках, де електропровідність відсутня, перенесення тепла здійснюється коливаннями атомів (або їх груп) в структурній ґратці матеріалу.

Оскільки переважаюча більшість найпоширеніших капілярно-пористих будівельних матеріалів (бетон, цеглина і т.д.) володіє обмеженою електропровідністю, основне значення для їх теплопровідності мають коливання атомних груп, що відбувається в структурній ґратці. У зв'язку з цим, перенесення енергії відбувається і в ідеально щільних матеріалах, і в капілярно-пористих. Цей процес не пов'язаний з проникністю матеріалів для потоків речовини. Перенесення тепла в твердих матеріалах виникає при будь-якій різниці температур Δt , і кількість тепла Q , що перено-

ситься завжди пропорційна різниці потенціалів незалежно від того, велика або мала ця різниця (тобто $Q \sim \Delta\varphi$).

Механізм перенесення маси речовини і, зокрема, вологи або повітря пов'язаний з проникністю і особливостями пористої структури матеріалу, усередині якого відбувається процес перенесення; в матеріалах абсолютно щільних або в матеріалах з ультрамалою пористістю в поверхневому шарі, що безпосередньо піддається зовнішнім впливам, виникають опори, що обмежують перенесення речовини. Ці опори при малій різниці потенціалів перенесення можуть перевищувати енергетичний рівень останньої і тоді виявляються непереборними. За цих умов перенесення маси крізь достатньо щільний матеріал не виникає, проте таке перенесення може відбуватися в деякому іншому напрямі, де опори виявляються меншими, ніж енергія різниці тиску. Так, наприклад, потік холодного повітря при вітрі може обтікати будівлю, не проникаючи всередину, оскільки опір прониканню щільного обличчового шару зовнішніх стін вельми значний. Лише за наявності щільня і нещільності цей потік проникає в приміщення.

Аналогічні опори потоку повітря виникають у вологих капілярно-пористих матеріалах, в порах яких вода утримується силами зв'язку вологи з матеріалом, наприклад, силами адгезії або капілярного тиску. Енергетичний рівень, необхідний для подолання цих опорів, може бути значним, і при малій різниці зовнішніх потенціалів перенесення перевершуватиме енергію цієї різниці. В цьому випадку перенесення маси речовини (наприклад, повітря, газу або водяної пари) через пористий матеріал відбуватися не буде; не дивлячись на наявність різниці зовнішніх потенціалів, маса речовини, що міститься в капілярно-пористій системі, знаходитиметься в рівновазі.

Перенесення маси, зокрема, вологи виникне тільки при різниці тиску Δp , що перевищує тиск p_{φ} , рівний енергетичному рівню опору перенесенню речовини (на поверхні або усередині матеріалу). Інакше кажучи, кількість речовини Q_{φ} , що переноситься, буде пропорційна різниці між енергетичними рівнями зовнішнього потенціалу і опору перенесенню усередині системи, тобто $Q_{\varphi} \sim (\Delta p - p_{\varphi})$. При різниці потенціалів меншій, ніж p_{φ} , кількість

речовини, яка могла б бути перенесена в напрямі, що вимагає подолання відповідного опору, буде рівно нулю. В цьому випадку конструкції будівлі з систем, що обмінюються із зовнішнім середовищем енергією і масою, наприклад, теплом і вологою (в термодинаміці такі системи називаються відкритими), перетворюються на системи обмежено закриті, в яких процеси теплообміну відбуваються при будь-якій різниці температур, а процеси масообміну при обмеженій різниці тиску можуть бути погашені опорами перенесенню речовини.

З урахуванням цих енергетичних обмежень, природний перебіг фізичних процесів пов'язаний з перенесенням тепла або речовини від ділянок з більш високими потенціалами перенесення до ділянок з більш низькими значеннями цих термодинамічних параметрів. В результаті такої спрямованості процесів відбувається можлива (при опорах перенесенню, що є усередині конструкції або матеріального середовища) стабілізація значень температури або тиску на окремих ділянках даної системи. Система, в якій встановлюється постійний розподіл значень температур або тиску, приходить в стан постійного рівноважного обміну теплом або речовиною з навколишнім середовищем. Усталений (тобто незмінний в часі) процес такого постійного обміну називають **стаціонарним**. Якщо кількісний вираз обміну рівний нулю, говорять, що система знаходиться в **термодинамічній рівновазі** з навколишнім середовищем.

2.1 Температурне поле і його зміни

Розповсюдження тепла в матеріальних середовищах, зокрема, в конструкціях будівель, завжди пов'язано з різним, тепловим станом окремих зон або ділянок простору, викликаним природними умовами або діяльністю людини (наприклад, тепле повітря в опалювальному приміщенні і холодний зовні, нагріті ділянки приміщення біля приладів опалювання і охолоджені біля вікон і т.і.). Процеси теплопередачі, що відбуваються, приводить до постійного або змінного в часі розподілу температур в даному матеріальному середовищі або конструкції. **Одночасний розподіл температур** в даній матеріальній системі називається **температурним полем**. Закономірності теплопередачі безпосереднім чи-

ном пов'язані з розподілом температур і особливостями температурного поля.

При певних теплофізичних властивостях даної конструкції або матеріального середовища і сталої (тобто незмінної в часі) різниці температур, що викликає процес теплопередачі, значення температури в будь-якій довільній точці конструкції є функцією тільки координат простору, тобто $t = f(x, y, z)$ ⁶. За змінних в часі зовнішніх умов, що викликають процес теплопередачі, температура в довільній точці залежить не тільки від координат простору, але і від часу $t = f(x, y, z, \tau)$.

У будівельній теплофізиці просторові температурні поля розглядаються порівняно рідко, оскільки для практичних цілей в більшості випадків достатньо вивчити двовимірне температурне поле, що виникає в одній з проєкцій, тобто в плані або розрізі конструкцій. В цьому випадку, при сталих умовах теплопередачі, температура в кожній точці проєкції конструкції є функцією двох координат: $t = f(x, y)$.

Третя координата (тобто висота або довжина конструкції) вважається достатньо протяжною, а тому не впливає на розподіл температур в плоскому перетині.

Закономірність змін температурного поля найбільш наочно можна представити, зобразивши лінії рівних температур (ізотерми) в проєкції досліджуваної конструкції.

Найрізкіша зміна температури відзначається по нормалі до ізоліній (рис. 2.1). Ця нормаль співпадає з напрямом температурного градієнта (підвищення температур) між ізолініями і протилежна (зворотна на 180°) найвірогіднішому напрямку теплового потоку Q , що переносить тепло від більш високої температури до більш низької. В однорідній плоскій нескінченно протяжній стіні з постійною різницею температур на протилежних поверхнях ці ізолінії паралелі один одному і поверхням огорожі; напрям потоку тепла можливий для цієї конструкції тільки в одному напрямі (рис. 2.2), а функціональна залежність змін температури найбільш проста $t = f(x)$. Це випадок самого елементарного одно-

⁶ Ця функціональна залежність розкривається в диференціальному рівнянні Лапласа.

вимірного температурного поля в сталих (стаціонарних) умовах теплопередачі.

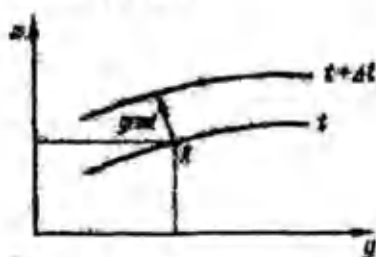


Рисунок 2.1 – Ізолінії температур двовимірного поля: x, y – напрямки координат; $t=f(x,y)$

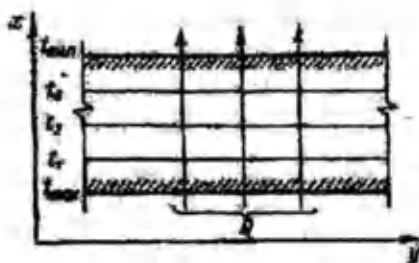


Рисунок 2.2 – Однорідне температурне поле в плоскій протяжній стіні: $t=f(x)$; t – ізолінії температур; Q – напрям потоку тепла

Ізолінії температур в конструкціях з складнішою геометричною формою виражаються двовимірним температурним полем і, за звичай, не паралелі поверхням огорожі, а криволінійні. При криволінійному контурі ізотерм шляхи розповсюдження тепла Q , які є перпендикулярними до ізотерм, також не можуть бути паралельними один одному, як це видно з рис. 2.3, на якому показано двовимірне температурне поле простінка зовнішньої стіни, виконаного з тришарових панелей.

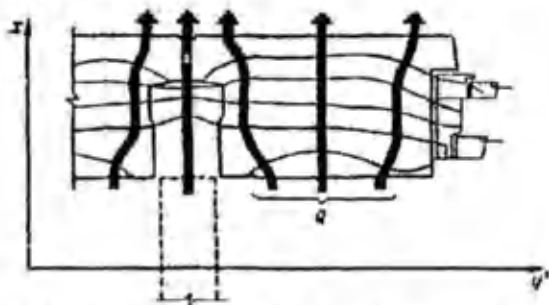


Рисунок 2.3 – Ізолінії двовимірного температурного поля і правління потоків тепла в простінку з тришарових панелей

За усталених умов теплопередачі зовнішні теплові впливи (значення і різниця температур) постійні (або приймаються такими в цілях спрощення розрахунків процесів передачі тепла, які

без особливих погрешностей можна звести до сталих умов).

У дійсних умовах зовнішні теплові впливи (наприклад, зовнішні температури) змінюються в часі, що призводить до нестационарної теплопередачі і мінливості температурного поля.

У теплофізичних розрахунках захищаючих конструкцій будівель важливе значення має розгляд температурного поля цих конструкцій при періодичних змінах зовнішніх дій (наприклад, періодичне охолодження або прогрівання, викликані циклічним режимом виробництва, періодичної тепловіддачею опалювальних систем, щоденним опромінюванням сонцем і т.і.). Таке нестационарне температурне поле, для якого характерні закономірні періодичні зміни, називають квазістационарним.

Розгляд квазістационарного температурного поля дозволяє знайти розрахункові методи, більш конкретні і зручні для практики, ніж загальні методи розрахунку нестационарного поля. Пояснюється це тим, що при квазістационарному теплообміні, окрім значення середньої температури, достатньо знати лише величину амплітуди і запізнювання в часі температурних коливань в даній точці конструкції для того, щоб мати повне уявлення про зміни температурного поля за період коливання зовнішніх теплових дій. Зокрема, теплофізичний розрахунок захищаючих конструкцій для літніх умов, що характеризуються періодичністю прогрівання при сонячному опромінюванні і циклічних підвищеннях температури зовнішнього повітря, виконується з урахуванням квазістационарних змін температурного поля.

У всіх можливих випадках розробки наближених інженерних методів розрахунку перевага віддається більш простим і, зокрема, заснованим на розгляді закономірностей стационарного температурного поля. Іноді це приводить до деякого підвищення запасів теплофізичної надійності захищаючих конструкцій, що розраховуються, оскільки зовнішні фактори, що впливають на розподіл температур, доводиться приймати найнесприятливішими з числа закономірно можливих.

Так, наприклад, теплофізичний розрахунок захищаючих конструкцій для холодного періоду року проводиться за умов гранично можливого охолодження конструкції, що настає при такому найнижчому значенні температури зовнішнього повітря, яке

відповідно до кліматичних умов може не змінюватися протягом часу, необхідного для поступової стабілізації найнесприятливішого температурного поля в даній конструкції.

2.2 Теорія поширення тепла в захисних конструкціях

Як було встановлено раніше, різницею потенціалів перенесення тепла в матеріальному середовищі є різниця температур в окремих зонах, перетинах або точках цього середовища.

Тепло розповсюджується від більш високої температури до більш низької; розповсюдження може відбуватися **теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням**. Як відомо, **теплопровідністю** називається теплообмін між частинками або елементами структури матеріального середовища, що знаходяться в безпосередньому контакті один з одним. Передача тепла в захищаючих конструкціях, виконаних з твердих матеріалів, від більш теплої поверхні конструкції до більш холодної, відбувається головним чином шляхом теплопровідності.

У загальному вигляді кількість тепла, що передається теплопровідністю, виражається як

$$Q_1 = -\lambda \cdot \text{grad} t \cdot F \cdot \tau \quad (2.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу огорожі, який вказує кількість тепла, яка проходить через 1 м^2 плоскої стінки товщиною в 1 м з даного матеріалу при різниці температури на її внутрішній і зовнішній поверхнях, рівної 1°C , в $\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{год}\cdot\text{град})$; $\text{grad} t$ – градієнт температури в напрямі x , протилежному тепловому потоку, $^\circ\text{C}$; F – площа, м^2 ; τ – час передачі тепла в 1 год. ; знак мінус вказує, що тепловий потік завжди направлений у бік пониження температур.

На коефіцієнт теплопровідності впливають:

- густина матеріалу; наприклад, коефіцієнт теплопровідності пінобетону при густині $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ майже в три рази більший ніж при густині $\rho = 400 \text{ кг}/\text{м}^3$. Ця відмінність пояснюється зміною характеру пористості і особливостями передачі тепла в порах різної величини;
- хіміко-мінералогічний склад складових матеріалу. Наприклад, на теплопровідність бетону значно впливає перевищена кіль-

- вологість матеріалу; для визначення коефіцієнта теплопровідності вологого матеріалу користуються формулою

$$\lambda_{\omega} = \lambda_0 + \beta \omega, \quad (2.2)$$

де ω – вагова вологість матеріалу, %; β – коефіцієнт приросту теплопровідності на 1% вологості (значення β складають: для пінобетону 0,011; для керамзитобетону 0,005).

Згідно будівельним нормам і правилам, значення коефіцієнтів для кожного будівельного матеріалу регламентуються відповідно до умов експлуатації будівель, тому остаточно розрахункове значення λ вибирається з урахуванням температури зовнішнього повітря, відносної вологості внутрішнього повітря і вологістнокліматичної характеристики району будівництва. При цьому враховується вплив будівельної вологи на теплозахисні властивості огорож, яка значно знижує теплозахисні властивості зовнішніх огорож, особливо в перші роки експлуатації будівель.

Конвекція — це розповсюдження тепла, що відбувається в результаті переміщення в просторі повітря (в загальному виді рідини або газу), володіючого певною теплоємністю. Розповсюдження тепла конвекцією відбувається, наприклад, в опалювальних приміщеннях, а також в конструкціях з повітряними прошарками, в яких виникають потоки повітря під впливом нерівномірного нагріву окремих ділянок і поверхонь.

Кількість тепла, що передається конвекцією, є функцією від різниці температур Δt , швидкості потоку повітря v , площі F і часу передачі τ , тобто

$$Q_2 = f(\Delta t, v, F, \tau), \quad (2.3)$$

Випромінювання — це теплообмін, що відбувається між однаково нагрітими поверхнями твердих тіл, розділеними промислопрозорим середовищем, наприклад, повітрям. Випромінювання є переважаючим видом загального перенесення тепла при дії сонячної радіації, а також при процесах теплообміну в металургійних і інших цехах, де відбувається плавка металу і охолодження розжарених виробів.

Кількість тепла Q_3 , яке передається випромінюванням, при різниці абсолютних температур $T_1 - T_2$ між випромінюючою і опро-

мінованою поверхнями, встановлюється відповідно до закону Стефана - Больцмана, як

$$Q_s = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \tau, \quad (2.4)$$

де C – відносна випромінювальна здатність поверхні

Процеси передачі тепла в будівлях і їх захищаючих конструкціях пов'язані зі всіма трьома видами теплообміну. Проте у повітряному середовищі у поверхонь конструкції, а також в повітряних прошарках і порожнинах переважає теплообмін конвекцією і випромінюванням, тоді як в твердих матеріалах конструкцій основним видом передачі тепла є теплопровідність. Процес теплообміну між поверхнею захищаючої конструкції і прилеглим до неї нагрітим або охолодженим повітряним середовищем, називають відповідно **теплосприйняттям** або **тепловіддачею**. Перенесення тепла, яке включає всі види теплообміну, з одного більш нагрітого середовища в інше більш охолоджене, через розділяючу ці середовища захищаючу конструкцію, називається **теплопередачею**. Цей процес включає:

а) теплообмін між поверхнею огорожі і прилеглим до неї нагрітим повітряним середовищем α_n – теплосприйняття; такий теплообмін відбувається, наприклад, в опалювальних приміщеннях при дотику внутрішньої поверхні стіни з внутрішнім повітрям;

б) теплообмін між поверхнею огорожі і прилеглим до неї охолодженим повітряним середовищем α_z ; подібний теплообмін спостерігається при стиканні зовнішньої поверхні стіни із зовнішнім повітрям.

При розгляді особливостей теплообміну між поверхнею захищаючої конструкції і повітряним середовищем приміщення найістотніше значення має передача тепла конвекцією і випромінюванням.

У практичних розрахунках звичайно користуються наступною залежністю теплообміну:

$$Q = \alpha (t_n - t_{\text{вн}}) F \tau \quad (2.5)$$

де Q – кількість тепла, Дж; $t_n - t_{\text{вн}}$ – різниця температур повітря і поверхні огорожі, град $^{\circ}\text{C}$; F – площа поверхні, м^2 ; τ – час, год; α – коефіцієнт теплообміну, який являє суму коефіцієнтів передачі

тепла конвекцією α_k та випромінюванням $\alpha_{\text{вип}}$, тобто $\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{вип}}$; розмірність – Дж/(м²·год·град). При передачі тепла від внутрішнього повітря до поверхні огорожі величина α може істотно змінюватися залежно від температурного режиму поверхонь і повітряного середовища в приміщенні, його розмірів і особливостей повітрообміну; зміни цих чинників впливають на частку участі променистого і конвективного тепла в загальному теплообміні.

Величину обернену до коефіцієнта теплообміну $R = 1/\alpha$, град·м²·год/Дж називають опором теплообміну. Значення α залежить від температурного режиму внутрішньої поверхні огорожі і повітряного середовища, його розмірів, характеристики повітрообміну (аерації) в приміщенні.

Розрахункові коефіцієнти теплообміну α наводяться в табл. 2.1. Зазначимо, що умова $h/b \leq 0,3$ відповідає досить великим приміщенням. Жилим приміщенням більш характерне співвідношення $h/b > 0,3$.

Таблиця 2.1 – Розрахункові значення коефіцієнтів тепловіддачі внутрішньої α_1 та зовнішньої α_2 поверхонь огорожувальних конструкцій

Тип конструкції	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² К)	
	α_1	α_2
Зовнішні стіни, дахи, покриття, перекриття над проїздами плоскі та з ребрами при відношенні висоти ребра h до відстані між гранями b сусідніх ребер		
$h/b \leq 0,3$	8,7	23
$h/b > 0,3$	7,6	23
Перекриття горищ та холодних підвалів	8,7	12
Перекриття над холодними підвалами та технічними поверхнями, що розташовані вище рівня землі	8,7	6
Вікна, балконні двері, вітражі та світлопрозорі фасадні системи	8,0	23
Зенітні ліхтарі	9,9	23

2.3 Термічний опір однорідних конструкцій

За сталих умов передачі тепла в будь-якому шарі захищаючої конструкції температура не змінюється, оскільки не відбувається нагрівання або охолодження цього шару.

У загальному випадку тепловий потік Q , що проходить через переріз теплофізично однорідної захисної конструкції за одиницю часу через одиницю поверхні, обчислюється за формулою

$$Q = \frac{\Delta t}{R}, \quad (2.6)$$

де Δt – різниця температур на поверхні огорожі, R – термічний опір огорожі.

Термічний опір однорідної стіни, а також окремого її шару знаходиться за формулою

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2.7)$$

де δ – товщина стіни (або шару), м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Дж/(м год °C), [16, Доданок Л].

Виражаючи термічний опір через тепловий потік Q і різницю температури на протилежних поверхнях стіни, маємо

$$R = \frac{t_2 - t_1}{Q} \quad (2.8)$$

Приймаючи $Q = 1$ Дж/(м² год °C), отримаємо

$$R = t_2 - t_1 = \Delta t, \quad (2.8a)$$

тобто чисельне значення термічного опору стіни рівне різниці температур на її внутрішній і зовнішній поверхнях, при якій через стіну проходить тепловий потік, рівний 1 Дж/(м² год).

Термічний опір багатошарової стіни визначається за формулою

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (2.9)$$

де $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – товщини шарів стіни; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалів відповідних шарів стіни; $R_1, R_2, \dots, R_n$ – термічні опори шарів стіни.

Загальний опір конструкції R_0 теплопередачі, з урахуванням опорів теплообміну на її внутрішній і зовнішній поверхнях, складе:

$$R_0 = R_s + \sum \frac{\delta}{\lambda} + R_z, \quad (2.10)$$

де R_s – опір теплообміну на внутрішній поверхні огорожі; R_z – опір теплообміну на зовнішній поверхні огорожі.

Усталений тепловий потік, який проходить через однорідну стіну, не змінює ні своєї величини, ні напрямку. На різних ділянках шляху його руху тепловий потік визначається наступними рівняннями:

а) при переході від внутрішнього середовища до внутрішньої поверхні стіни

$$Q = \frac{t_s - t_{s,n}}{R_s}; \quad (2.11)$$

б) при проходженні через товщину стінки

$$Q = \frac{t_{s,n} - t_{z,n}}{\sum \frac{\delta}{\lambda}}; \quad (2.12)$$

в) при переході від зовнішньої поверхні у зовнішнє середовище

$$Q = \frac{t_{z,n} - t_z}{R_z}; \quad (2.13)$$

З формул (2.11)–(2.13) бачимо, що

$$t_s - t_{s,n} = QR_s, \quad t_{s,n} - t_{z,n} = Q \sum \frac{\delta}{\lambda},$$

$$t_{z,n} - t_z = QR_z.$$

При додаванні цих формул отримаємо

$$t_s - t_z = Q(R_s + \sum \frac{\delta}{\lambda} + R_z).$$

$$Q = \frac{t_s - t_z}{R_s + \sum \frac{\delta}{\lambda} + R_z} = \frac{t_s - t_z}{R_0}, \quad (2.14)$$

Отже, якщо температури внутрішнього і зовнішнього повітря не змінюються з часом і



Рисунок 2.4 –
Довільний перетин x усередині конструкції

відомі їх значення t_g і t_s , а також значення термічних опорів окремих шарів конструкції, легко визначити температури на поверхнях захищаючої конструкції і на межах окремих шарів.

З рівності потоків тепла, що проходять через будь-який перетин x конструкції і через всю огорожу в цілому (рис. 2.4), тобто

$$Q = \frac{t_g - t_s}{R_g + \sum R_x} = \frac{t_g - t_s}{R_0}, \quad (2.15)$$

витікає, що температура в площині x — t_x і на внутрішній поверхні захищаючої конструкції $t_{a.n.}$ обчислюється за формулами:

$$t_x = t_g - \frac{t_g - t_s}{R_0} (R_g + \sum R_x), \quad (2.16)$$

$$t_{a.n.} = t_g - \frac{t_g - t_s}{R_0} R_g, \quad (2.17)$$

де $\sum R_x$ — сума термічних опорів від внутрішньої поверхні конструкції до перетину x ; R_g — опір теплообміну на внутрішній поверхні.

При графічній побудові лінії розподілу температури в шаруватій захищаючій конструкції, викреслений в масштабі реальної товщини окремих шарів, нахил цієї лінії в межах кожного шару складе:

$$\frac{\Delta t}{\delta} = \frac{Q}{\lambda}. \quad (2.18)$$

Чим більше коефіцієнт теплопровідності λ , тим крутіше падіння лінії розподілу температур в межах даного шару.

У шаруватій конструкції, виконаній з матеріалів з різною теплопровідністю, розподіл температур виражається ламаною лінією (рис. 2.5, а). Ця лінія перетворюється на пряму, яка сполучає значення t_g і t_s , якщо шарувата захищаюча конструкція викреслена в масштабі термічних опорів R (рис. 2.5, б); в цьому випадку нахили $\Delta t / R$ в межах кожного шару рівні потоку тепла Q і, отже, в сталих умовах теплопередачі рівні один одному.

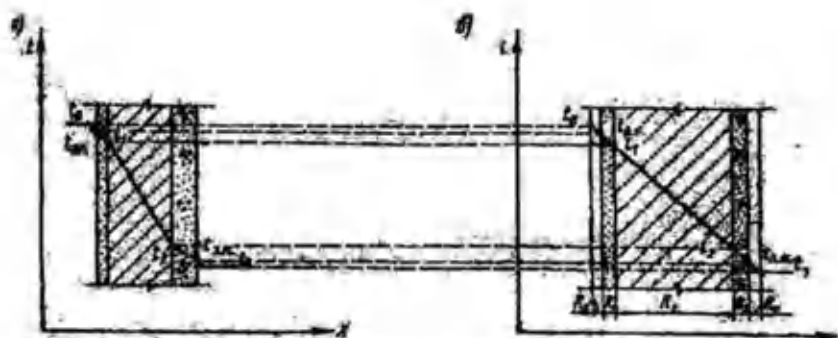


Рисунок 2.5 – Розподіл температур усередині шаруватої захищаючої конструкції, при сталому потоці тепла: а – у конструкції, що зображена в масштабі реальної товщини окремих шарів; б – конструкцію зображено в масштабі термічних опорів окремих шарів

Приклад. Визначити опір теплопередачі R_0 зовнішньої стіни житлового будинку і обчислити розподіл температур при сталому потоці тепла через цю стіну. Конструкція стіни (рис. 2.6) виконана у вигляді крупної панелі з керамзитобетону завтовшки 0,3 м, густиною 800 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 0,29 \text{ Вт/(м·К)}$, покриттів з внутрішньої і зовнішньої сторін фактурними шарами товщиною по 0,015 м, густиною – 1800 кг/м^3 та 1600 кг/м^3 (зовнішній та внутрішній відповідно), значення коефіцієнтів теплопровідності λ_2 зовнішнього фактурного шару (вапняно-пісчаний розчин) $0,76 \text{ Вт/(м·К)}$, λ_3 внут-

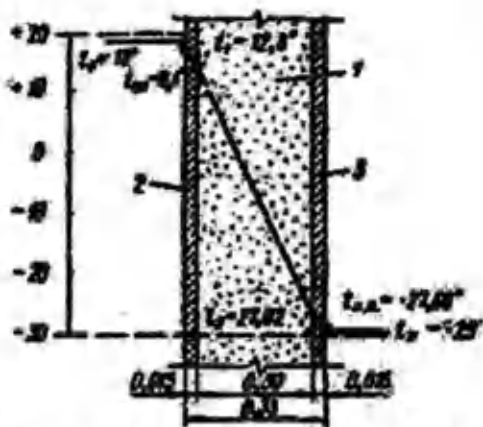


Рисунок 2.6 – Панель зовнішньої стіни з керамзитобетону: 1 – керамзитобетон; 2 – внутрішній фактурний шар; 3 – зовнішній фактурний шар

рішнього фактурного шару (цементно-пісчаний розчин) – 0,64 Вт/(м·К). Коефіцієнт теплопровідності зовнішнього фактурного шару більше, ніж внутрішнього, оскільки в холодний період року він більш вологий і теплопровідний. Температура внутрішнього повітря +18°C, зовнішнього -29°C:

Згідно формули (2.10) маємо:

$$R_0 = R_g + \sum \frac{\delta}{\lambda} + R_i = \frac{1}{7,6} + \frac{0,015}{0,64} + \frac{0,3}{0,29} + \frac{0,015}{0,76} + \frac{1}{23} = 0,132 + 0,023 + 1,034 + 0,020 + 0,04 = 1,253 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Взагалі то, дана панельна конструкція не володіє високим опором теплопередачі і при задовільному рішенні сполучень (між окремими панелями), що не знижують теплозахисних властивостей конструкції, не може використовуватись для житлових та громадських будинків [16, табл. 1], а може використовуватись лише для огорожувальних конструкцій промислових будинків [16, табл. 2] для деяких кліматичних районів світу.

При розрахунковій температурі внутрішнього повітря +18°C і зовнішнього -29°C температура на поверхні стіни, яка обернута до приміщення, буде згідно формули (2.17):

$$t_{d1} = t_d - \frac{t_d - t_c}{R_0} R_d = 18 - \frac{18 - (-29)}{1,25} \cdot 0,132 \approx 13,6^\circ \text{C}.$$

Температура в стіні під внутрішнім фактурним шаром (2.16):

$$t_1 = t_d - \frac{t_d - t_c}{R_0} (R_d + R_1) = 18 - \frac{18 + 29}{1,25} (0,132 + 0,023) \approx 12,8^\circ \text{C}.$$

Тут $R_1 = 0,023$ – термічний опір внутрішнього фактурного шару.

Температура всередині стіни під зовнішнім фактурним шаром:

$$t_2 = t_d - \frac{t_d - t_c}{R_0} (R_d + R_1 + R_2) = 18 - \frac{18 + 29}{1,25} (0,133 + 0,027 + 1,034) \approx -27,02^\circ \text{C}$$

Температура на зовнішній поверхні стіни

$$t_{c1} = t_d - \frac{t_d - t_c}{R_0} (R_d + R_1 + R_2 + R_3) = 18 - \frac{18 + 29}{1,43} (0,132 + 0,023 + 1,034 + 0,020) \approx -27,68^\circ \text{C}.$$

Обчислений розподіл температур відповідає сталій одновимірній передачі тепла через конструкцію і достатньо близько може співпасти із змінами температур в натурних умовах лише для ділянок панельної стіни, віддалених від віконних отворів і стиків (наприклад, для панелей глухих стін торців), і при цьому в періоди часу, що характеризуються стійкими значеннями температури зовнішнього і внутрішнього повітря, близькими до розрахункових і не змінюються протягом декількох діб.

У інших випадках між значеннями обчислених і вимірених температур можуть бути істотні відмінності, які пояснюються двовимірною передачею тепла або тепловим станом конструкції, що зберігся від попередніх погодних умов.

2.4 Опір теплопередачі неоднорідних конструкцій

У будівельній практиці далеко не завжди застосовуються захищаючі конструкції, поперечний перетин яких на будь-якій ділянці їх площі незмінний і відповідає конструктивній схемі, прийнятій для теплофізичних розрахунків.

Для багатьох сучасних конструкцій неприпустимо приймати для теплофізичного розрахунку конструктивну схему, що відноситься до переважаючої і найблагополучнішої частини огорожі, залишаючи без уваги його знижені теплозахисні властивості на інших ділянках, наприклад, в місцях конструктивних ребер, стиків і сполучень.

На таких окремих ділянках поперечний переріз захищаючої конструкції часто складається з інших більш теплопровідних матеріалів і володіє меншим опором теплопередачі.

У цих випадках задачею теплофізичного розрахунку є:

а) визначення середньої приведенної величини опору теплопередачі: саме ця величина повинна перевищувати опір, що вимагається нормами;

б) визначення необхідних теплозахисних властивостей якнайменше утеплених ділянок конструкції в цілях забезпечення температур вище за точку роси на їх поверхні і виключення утворення конденсату.

Визначення опору теплопередачі таких конструкцій по оптимальному характерному перерізу дає завищені результати, істот-

но відмінні від дійсних значень, одержуваних при розгляді неоднорідної захищаючої конструкції в цілому.

При розрахунку загального опору теплопередачі неоднорідних конструкцій використовують наступну методику:

1. Захисна конструкція умовно розділяється на ділянки з постійними термічними опорами площинами, паралельними вектору теплового потоку. Кожна з цих ділянок може бути одношаровою або багатошаровою (рис. 2.7 а). За поверхнею захищаючої конструкції визначається площа, яку займає кожний характерний конструктивний елемент (F_1 , F_2 і т.д.), і за формулами (2.7) і (2.9) обчислюється термічний опір кожного такого конструктивного елементу (R_1 , R_2 і т.д.). Середнє приведені значення термічного опору неоднорідної огорожі в цілому обчислюється згідно формули:

$$R_{\text{в}} = \frac{\frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{F_1 + \frac{F_2}{R_2} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i}}, \quad (2.19)$$

а загальний опір теплопередачі – згідно формули (2.10). Цей, найпростіший випадок, відноситься до конструкцій, які на окремих (порівняно невеликих за площею) ділянках перетинаються по всій товщині конструктивними елементами з дещо більшою теплопровідністю, ніж переважаюча частина конструкції.

Другий, складніший випадок, відноситься до конструкцій неоднорідних в двох вимірах (наприклад, стіни з порожнистого каміння).

Теплофізичний розрахунок таких захищаючих конструкцій роблять послідовно двома різними прийомами:

1) шляхом обчислення середнього приведеного термічного опору при уявному розрізанні конструкції на окремі характерні ділянки площинами, паралельними основному напрямку потоку тепла; при цьому термічні опори окремих ділянок знаходяться за формулою (2.9), тобто:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i,$$

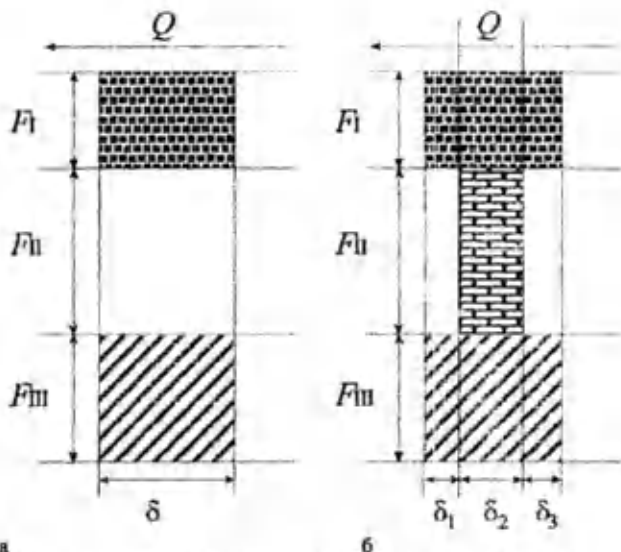


Рисунок 2.7 – Прості неоднорідні захищаючі конструкції:
 а – неоднорідність в одному напрямку (перпендикулярному тепловому потоку), б – неоднорідність в двох напрямках

а середнє приведенє значення R_{II} термічного опору для конструкції в цілому визначається формулою (2.19);

2) шляхом обчислення середнього приведеного термічного опору при уявному розрізанні конструкції площинами, перпендикулярними основному напрямку потоку тепла, на окремі характерні шари, які можуть складатися або з одного матеріалу, або з декількох. Для шарів, що складаються з декількох матеріалів, обчислюється середній приведений коефіцієнт теплопровідності за формулою:

$$\lambda_e = \frac{\lambda_1 F_I + \lambda_2 F_{II} + \dots + \lambda_n F_n}{F_I + F_{II} + \dots + F_n}, \quad (2.20)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалів; $F_I, F_{II}, \dots, F_n$ – площі, що займаються в конструкції або характерній її ділянці цими матеріалами.

Термічний опір однорідних шарів визначається при цьому виді розрізання за звичайними формулами (2.7) $R = \delta / \lambda$, а терміч-

ний опір конструкції в цілому R_1 виходить підсумовуванням опорів окремих шарів.

Для захищаючих конструкцій, у яких величини $R_{\parallel}$ і $R_{\perp}$ відрізняються одне від одного не більш, ніж на 25%, розрахункове значення термічного опору $R_{\text{тер}}$ може бути обчислене за формулою:

$$R_{\text{тер}} = \frac{R_{\parallel} + 2R_{\perp}}{3}, \quad (2.21)$$

У тих випадках, коли захищаюча конструкція складається з однакових виробів (наприклад, пустотного каміння), які повторюються, доцільно обчислити середні приведені термічні опори цих виробів, після чого теплофізичний розрахунок опору теплопередачі може бути вироблений як для звичної шаруватої конструкції.

Приклад. Визначити розрахункове значення термічного опору стіни з шлакобетонного каміння з щілиноподібними порожнинами. Стіна покрита зовнішньою і внутрішньою штукатуркою, утеплена плитами з фіброліту (рис. 2.8). Стіна проектується для приміщень з нормальною вологістю і помірному зовнішньому клімату. Коефіцієнти теплопровідності: шлакобетону $\lambda_1 = 0,63$ Вт/(м·К); розчину вапняно-піщаного $\lambda_2 = 0,63$ Вт/(м·К); фіброліту $\lambda_3 = 0,16$ Вт/(м·К); внутрішньої штукатурки $\lambda_4 = 0,58$ Вт/(м·К); зовнішньої штукатурки $\lambda_5 = 0,70$ Вт/(м·К).

Розрахункова схема каменя з щілиноподібними порожнинами з розбиттям на окремі характерні ділянки і шари зображена на рис. 2.8, в (дані подано в мм, розрахунки будемо проводити в м).

Визначимо середню приведену величину термічного опору каменя.

1. Розрахунок при умовному розрізанні шлакобетонованого каменя площинами, паралельними потоку тепла.

Ділянка I. Зовнішні і внутрішні шлакобетонові стінки каменю і три щілинні пустоти з середнім термічним опором $0,15$ Вт/(м·К) кожна.

Загальна площа ділянки I, через яку проходить потік теплоти:

$$F_1 = (0,075 \cdot 2 + 0,06 \cdot 2) \cdot 0,178 = 0,04806 \text{ м}^2.$$

Термічний опір ділянки I

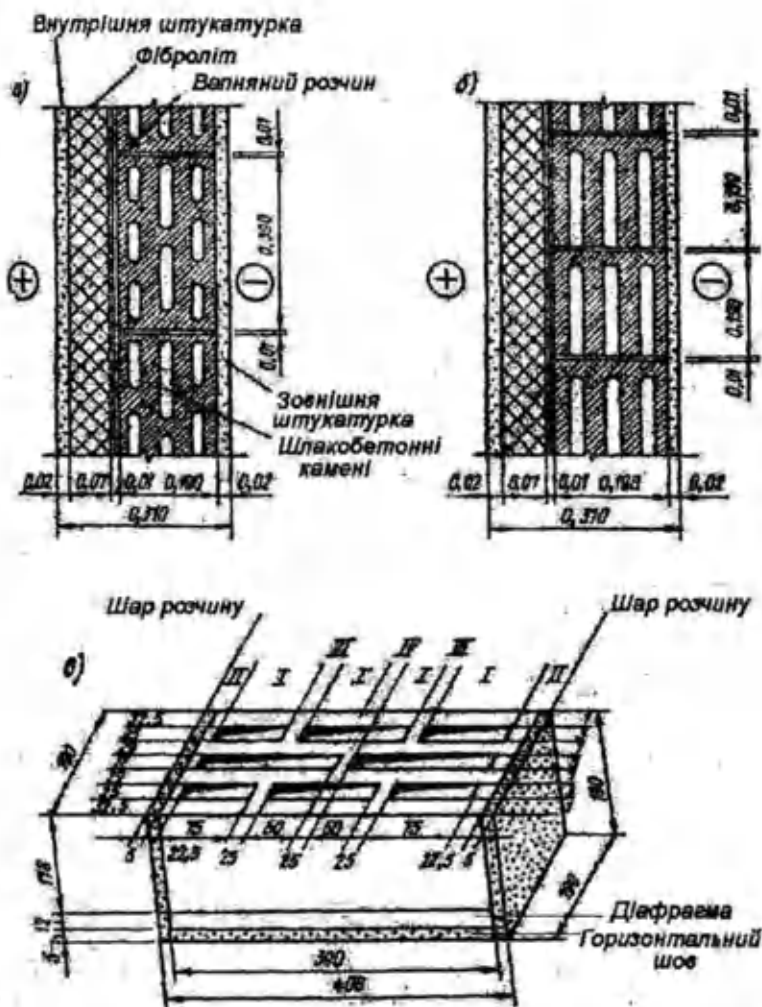


Рисунок 2.8 – Конструктивна схема неоднорідної стіни (з шлакобетонного каміння, утепленої фібролітом):
 а - переріз стіни; б – горизонтальний розріз стіни; в - розрахункова схема шлакобетонного каменя з щілиноподібними порожнинами

$$R_f = \frac{0,0325}{0,63} \cdot 2 + \frac{0,029}{0,63} \cdot 2 + 0,15 \cdot 3 \approx 0,64 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Ділянка II. Зовнішні шлакобетонні поперечні стінки каменю і вертикальні шви розчину:

$$F_{f_2} = (0,0225 \cdot 2 + 0,005 \cdot 2) \cdot 0,178 = 0,00979 \text{ м}^2.$$

$$R_{f_2} = \frac{0,19}{0,63} \approx 0,30 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Ділянка III. Зовнішні і внутрішні шлакобетонні стінки каменю й одна центральна порожнина:

$$F_{f_3} = (0,025 \cdot 2) \cdot 0,178 = 0,0089 \text{ м}^2.$$

$$R_{f_3} = \frac{0,190 - 0,017}{0,63} + 0,15 \approx 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Ділянка IV. Зовнішні і внутрішні шлакобетонні стінки по осі симетрії каменю і дві порожнини:

$$F_{f_4} = 0,025 \cdot 0,178 = 0,00445 \text{ м}^2.$$

$$R_{f_4} = \frac{0,190 - 0,025 \cdot 2}{0,63} + 0,15 \cdot 2 \approx 0,52 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Ділянка V. Горизонтальна шлакобетонна діафрагма каменю з розчином горизонтального шву:

$$F_{f_5} = (0,012 + 0,01) \cdot 0,4 = 0,0088 \text{ м}^2.$$

$$R_{f_5} = \frac{0,19}{0,63} \approx 0,30 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Сума площин характерних ділянок $\sum F_i = 0,4806 + 0,00979 + 0,0089 + 0,00445 + 0,0088 = 0,08 \text{ м}^2$, тобто рівна загальній бічній вертикальній поверхні каменя, покладеного на розчині в стіну, $0,4 \cdot 0,2 = 0,08 \text{ м}^2$.

Термічний опір шлакобетонного каменю при його уявному перерізі площинами паралельними потоку тепла знаходиться згідно (2.19)

$$R_{\Pi} = \frac{0,04806 + 0,00979 + 0,0089 + 0,00445 + 0,0088}{\frac{0,04806}{0,64} + \frac{0,00979}{0,30} + \frac{0,0089}{0,42} + \frac{0,00445}{0,52} + \frac{0,0088}{0,30}} \approx 0,48 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

2. Розрахунок при умовному перерізі шлакобетонного каменю площинами, перпендикулярними потоку теплоти.

Шар 1. Поздовжні шлакобетонні стінки каменю з урахуванням швів розчину і горизонтальної діафрагми.

Площа шлакобетону в шарі 1, через яку проходить потік теплоти:

$$F_{1,ш} = 0,39 \cdot 0,19 = 0,0741 \text{ м}^2.$$

Площа розчину:

$$F_{1,р} = 0,19 \cdot 0,01 + 0,4 \cdot 0,01 = 0,0059 \text{ м}^2.$$

Повна площа $F_1 = 0,0741 + 0,0059 = 0,08 \text{ м}^2$.

Термічний опір $R_1 = \frac{0,0325}{0,63} \cdot 2 + \frac{0,029}{0,63} \cdot 2 \approx 0,20 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$.

Шари 2 і 3. Щільні порожнечи каменю з врахуванням шлакобетонних стінок, що їх роз'єднують, а також швів розчину і горизонтальної діафрагми.

Приведена площа повітряних прошарків враховуючи, що в різних шарах – різна площа порожнеч:

$$F_{2,в} = \frac{(0,075 \cdot 2 + 0,06 + 0,025 + 0,06) \cdot 2 + 0,39 - 0,0225 \cdot 2 - 0,025}{3} \times 0,178 = 0,0539 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні шлакобетону і розчину:

$$F_{1,ш} = \left(\frac{0,0225 \cdot 2 \cdot 3 + 0,025 \cdot 5}{3} \right) \cdot 0,178 + 0,4 + 0,2 + 0,012 \cdot 0,39 = 0,0261 \text{ м}^2.$$

Загальна площа $0,0539 + 0,0261 = 0,08 \text{ м}^2$.

Термічний опір повітряних прошарків $R_n = 0,15 \cdot 3 = 0,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$;

шлакобетону $R_{ш} = \frac{0,025 \cdot 2 + 0,017}{0,63} \approx 0,11 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$.

Середнє значення термічного опору шарів 2 і 3:

$$R_{2,3} = \frac{0,08}{\frac{0,0539}{0,45} + \frac{0,0261}{0,11}} = 0,22 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

В цілому термічний опір пустотного шлакоблока, розташованого у стіні, при умовному перерізі конструкції площинами перпендикулярними вектору теплового потоку обчислюється як сума

термічних опорів послідовно розташованих шарів:

$$R_1 = 0,20 + 0,22 = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

Значення R_1 і R_1 відрізняються на $(0,48 - 0,42) / 0,48 \times 100\% = 12,5\% < 25\%$, отже, середню приведену величину термічного опору кладки зі шлакобетонного каменю з щілиноподібними порожнинами можна визначити згідно формули (2.21):

$$R_{\text{ср}} = \frac{0,48 + 0,42 \cdot 2}{3} = 0,44 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

Загальний термічний опір всієї шаруватої конструкції

$$R_0 = 0,132 + \frac{0,02}{0,58} + \frac{0,07}{0,16} + \frac{0,190}{0,44} + \frac{0,02}{0,70} + 0,04 = 1,10 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

2.5 Опір теплопередачі неоднорідних конструкцій при наявності теплопровідних включень

Теплопровідним включенням називають елемент огорожувальної конструкції, розташований в її об'ємі паралельно напрямку теплового потоку, який має термічний опір, менший від термічного опору основного поля більше ніж на 20 %.

В [16] розглянуті типові схеми вузлів сполучення огорожувальних конструкцій з теплопровідними включеннями (табл.И.3).

Приведений опір теплопередачі для конструкцій з визначеними значеннями лінійного коефіцієнта⁷ теплопередачі теплопровідних включень k_j розраховується за формулою

$$R = \frac{F_I + F_{II} + \dots + F_n}{\frac{F_I}{R_I} + \frac{F_{II}}{R_{II}} + \dots + \frac{F_n}{R_n} + k_1 L_1 + \dots + k_m L_m} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} + \sum_{j=1}^m k_j L_j}, \quad (2.22)$$

де L_j – лінійний розмір j -го теплопровідного включення за внутрішньою поверхнею термічно неоднорідної огорожувальної конструкції.

⁷ коефіцієнт теплопередачі термічно неоднорідної огорожувальної конструкції, що враховує кількість теплоти, яка передається через теплопровідне включення.

2.6 Термічний опір повітряних прошарків

Передача тепла через повітряний прошарок при різниці температур на її протилежних поверхнях відбувається шляхом конвекції, випромінювання і теплопровідності (рис. 2.9).

Теплопровідність нерухомого повітря дуже мала і якби в повітряних прошарках повітря знаходилося в стані спокою, їх термічний опір був би дуже високим. Насправді, в повітряних прошарках захищаючих конструкцій повітря завжди рухається, наприклад, біля більш теплої поверхні вертикальних прошарків він переміщається вгору, а біля холодної — вниз. В прошарках з рухомим повітрям кількість тепла, що передається шляхом теплопровідності, дуже мала в порівнянні з теплопередачею шляхом конвекції.

У міру збільшення товщини повітряного прошарку кількість тепла, що передається шляхом конвекції, зростає, оскільки вплив тертя рухомого повітря об стінки зменшується. Зважаючи на це для повітряних прошарків не існує характерної для твердих матеріалів прямої пропорційності між збільшенням товщини шару і значенням його термічного опору.

Кількість променистого тепла, що передається від більш теплої поверхні до більш холодної, не залежить від товщини повітряного прошарку; як зазначалося раніше, воно визначається коефіцієнтом випромінювання поверхонь і різницею, пропорційною четвертим ступеням їх абсолютних температур.

Явища конвективного теплообміну в повітряних прошарках залежать від їх геометричної форми, розмірів і напрямку потоку тепла; особливості цього теплообміну можуть бути виражені величиною безрозмірного коефіцієнта конвекції ε , який рівний відношенню еквівалентної теплопровідності до теплопровідності нерухомого повітря $\varepsilon = \lambda_{\text{екв}} / \lambda$.

Відносно невеликі величини коефіцієнтів передачі тепла через горизонтальні прошарки при потоці тепла зверху вниз (напри-

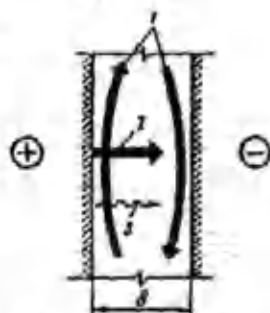


Рисунок 2.9 – Схема передачі тепла через повітряний прошарок:
1 – конвекція,
2 – випромінювання,
3 – теплопровідність

клад, в цокольних перекриттях опалювальних будівель) пояснюються малою рухливістю повітря в таких прошарках; найтепліше повітря зосереджується біля більш нагрітої верхньої поверхні прошарку, утруднюючи конвективний теплообмін.

Величина передачі тепла випромінюванням $\alpha_{\text{вип}}$ залежить від коефіцієнтів випромінювання і температури.

У літніх умовах величина $\alpha_{\text{вип}}$ збільшується, а термічний опір прошарків зменшується. Взимку, для прошарків, що розташовані в зовнішній частині конструкцій, відбувається зворотнє явище.

Для вживання в практичних розрахунках норми будівельної теплотехніки захищаючих конструкцій приводять значення термічних опорів замкнутих повітряних прошарків залежно від розміщення в конструкції, вказані в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Термічний опір замкнутого повітряного прошарку, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$, залежно від розміщення в конструкції

Товщина повітряного прошарку, м	Розміщення прошарку			
	горизонтальне при потоці тепла знизу		горизонтальне при потоці тепла згори донизу	
	середня температура повітря у прошарку			
	≥ 0°C	< 0°C	≥ 0°C	< 0°C
0,01	0,13	0,15	0,14	0,15
0,02	0,14	0,15	0,15	0,19
0,03	0,14	0,16	0,16	0,21
0,05	0,14	0,17	0,17	0,22
0,1	0,15	0,18	0,18	0,23
0,15	0,15	0,18	0,19	0,24
0,2-0,3	0,15	0,19	0,19	0,24

Наведені дані про термічний опір відносяться до замкнутих плоских повітряних прошарків. Під замкнутими розуміються повітряні прошарки, обмежені непроникними матеріалами, ізольовані від проникання повітря ззовні.

Оскільки пористі будівельні матеріали повітропроникні, до замкнутих можуть бути віднесені, наприклад, повітряні прошарки в конструктивних елементах з щільного бетону або інших

щільних матеріалів, що є практично не проникні для повітря при тих величинах різниці тиску, який типовий для експлуатованих будівель.

Експериментальні дослідження показують, що термічний опір повітряних прошарків в цегляній кладці знижується приблизно удвічі в порівнянні з величинами, вказаними у табл. 2.2. При недостатньому заповненні швів між цеглою розчином (наприклад, при виконанні робіт в зимових умовах) повітропроникність кладки може зрости, а термічний опір повітряних прошарків наблизитися до нуля. Достатній захист конструкцій з повітряними прошарками від повітропроникнення є абсолютно необхідним для забезпечення необхідних теплофізичних властивостей захищаючих конструкцій.

Іноді в бетонних або керамічних блоках передбачають прямокутні порожнечі невеликої довжини, які часто наближаються до квадратної форми. У таких порожнинах передача променистого тепла зростає за рахунок додаткового випромінювання бічних стінок. Приріст величини $\alpha_{\text{ж}}$, незначний при відношенні довжини прошарку до її товщини, рівному 3:1 або більше; в порожнинах квадратної або круглої форми цей приріст сягає 20%. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, що враховує передачу тепла конвекцією та випромінюванням у квадратних і круглих порожнинах значних розмірів (70-100 мм) істотно зростає, у зв'язку з чим використання таких порожнеч в матеріалах з обмеженою теплопровідністю (0,6 Вт/м·К і менше) не має сенсу з точки зору теплофізики. Застосування квадратних або круглих пустот зазначеного розміру у виробках з важких бетонів має головним чином економічне значення (зменшення ваги); це значення втрачається для виробів з легких і комірчастих бетонів, оскільки використання таких порожнин може призвести до зниження термічного опору огорожувальних конструкцій.

На противагу цьому, застосування плоских тонких повітряних прошарків, особливо при багаторядному їх розташуванні в шаховому порядку (рис. 2.10), є доцільним. При однорядному розміщенні повітряних прошарків більш ефективно їх розташування у зовнішній частині конструкції (якщо забезпечена її повітроне-проникність), оскільки термічний опір таких прошарків у холод-

ний період року зростає.

Застосування повітряних прошарків в утеплених цокольних перекриттях над холодними підпіллями більш раціонально, ніж у зовнішніх стінах, оскільки передача тепла конвекцією в горизонтальних прошарках цих конструкцій істотно зменшується.

Теплофізична ефективність повітряних прошарків у літніх умовах (захист від перегріву приміщень) знижується в порівнянні з холодним періодом року, проте ця ефективність зростає за рахунок використання прошарків, вентильованих в нічний час зовнішнім повітрям.

При проектуванні корисно мати на увазі, що огорожувальні конструкції з повітряними прошарками володіють меншою вологісною інерцією в порівнянні з суцільними. У сухих умовах конструкції з повітряними прошарками (вентильованими і замкнутими) швидко піддаються природній сушці і набувають додаткові теплозахисні властивості за рахунок малої вологості матеріалу; у вологих приміщеннях навпаки – конструкції із замкнутими прошарками можуть сильно перезволожуватися, що призводить до втрат теплофізичних якостей і ймовірністю передчасного руйнування.

З попереднього викладу було видно, що передача тепла через повітряні прошарки у великій мірі залежить від випромінювання. Однак застосування відбивної ізоляції з обмеженою довговічністю (алюмінієвої фольги, фарбування і т.і.) для підвищення термічного опору повітряних прошарків може бути доцільним лише в конструкціях сухих будівель з обмеженим терміном використання; в сухих капітальних будівлях додатковий ефект відбивної ізоляції також корисний, але слід враховувати, що навіть при втраті

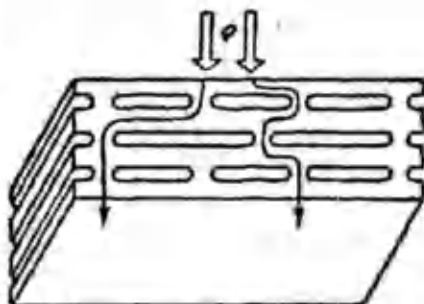


Рисунок 2.10 – Доцільне, в теплофізичному відношенні, багаторядне розташування повітряних прошарків у шаховому порядку; Q – потік тепла (стрілками показаний звивистий шлях поширення тепла по суцільному матеріалу)

Її відбивних якостей теплофізичні властивості конструкцій повинні бути не менше необхідних з тим, щоб забезпечити нормальну експлуатацію конструкцій.

У кам'яних і бетонних конструкціях з великою початковою вологістю (а також у вологих приміщеннях) використання алюмінієвої фольги, втрачає сенс, тому що її відбивні властивості можуть бути швидко зіпсовані через корозію алюмінію у вологому лужному середовищі. Застосування відбивної ізоляції найбільш ефективно в горизонтальних замкнутих повітряних прошарках при напрямку потоку тепла зверху вниз (цокольні перекриття і т.і.), тобто в тому випадку, коли конвекція майже відсутня і передача тепла відбувається в основному шляхом випромінювання.

Відбивною ізоляцією досить покрити тільки одну з поверхонь повітряного прошарку (більше теплу, порівняно гарантовану від епізодичної появи конденсату, що швидко погіршує відбивні властивості ізоляції). Розрахункові значення термічного опору повітряного прошарку з відбивною ізоляцією суттєво підвищуються порівняно з величинами, вказаними в табл. 2.2 (див табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Термічний опір замкнутого повітряного прошарку, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, при встановленні відбивної ізоляції

Кількість прошарків (завтовшки від 3 мм до 10 мм)	Середня температура повітря прошарку	Тип відбивної ізоляції, товщина спіненого шару, мм					
		А (одностороння)*			Б (двостороння)		
		3	5	10	3	5	10
1	$\geq 0^\circ\text{C}$	0,34	0,48	0,84			
1	$< 0^\circ\text{C}$	0,3	0,4	0,79			
2	$\geq 0^\circ\text{C}$	0,79	1,0	1,3	0,85	1,39	1,49
2	$< 0^\circ\text{C}$	0,64	0,79	1,2	0,82	1,25	1,4
Примітка: * – Встановлення ізоляції відбивним шаром у бік приміщення.							

2.7 Нормовані показники теплофізичних властивостей захищаючих конструкцій і мікроклімату будівель

Згідно [16] до основних теплотехнічних показників захищаючих конструкцій будівель і споруд відносяться опір теплопередачі, теплова інерція, теплостійкість і теплосприйняття, опір повітро- і паропроникненню.

Для зовнішніх огорожувальних конструкцій опалюваних будинків та споруд і внутрішніх конструкцій, що розділяють приміщення, температура повітря в яких відрізняється на 3°C та більше, обов'язкове виконання умов:

$$R_0 \geq R_{\min} \quad (2.23)$$

де R_0 – приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції (для термічно однорідних огорожувальних конструкцій визначається опір теплопередачі), приведений опір теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції;

$R_{\min}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції, мінімальне значення опору теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції.

Мінімально допустиме значення $R_{\min}$ встановлюється згідно з таблицею 1 [16] залежно від температурної зони експлуатації будинку, що приймається згідно з додатком В [16].

У разі реконструкції будинків, що виконується з метою їх термомодернізації, допускається для непрозорих огорожувальних конструкцій приймати значення $R_{\min}$ з коефіцієнтом 0,8.

Необхідний мінімальний опір захищаючих конструкцій теплопередачі приймається на основі обмеження фізичних чинників, що впливають несприятливим чином на умови перебування людей в приміщенні.

Основний нормований гігієнічний параметр – це перепад температур внутрішнього повітря і внутрішньої поверхні конструкції, тобто величина, що впливає на особливості теплообміну

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} \quad (2.24)$$

де Δt – температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні ого-

роджувальної конструкції; $\Delta t_{\text{ог}}$ — допустима за санітарно-гігієнічними вимогами різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції.

Ця величина встановлюється залежно від призначення приміщення і виду захищаючої конструкції. Чим менше нормована величина перепаду, тим більше значним опором теплопередачі володіє захищаюча конструкція, але звично тим вище її вартість.

У житлових приміщеннях не допускається перепад температур вище за 4°C , в громадських та адміністративних будинках нормами не допускається перепад більш 5°C . Такі величини температурних перепадів забезпечують деяке обмеження різкого відчуття холоду (холодної радіації) від поверхні огорож в холодні періоди року.

На самопочуття людини істотно впливають умови, в яких знаходяться його голова і ноги, тому нормативні вимоги вищі — допустимі перепади температури для покриттів і перекриттів нижче, ніж для зовнішніх стін.

Допустимі за санітарно-гігієнічними вимогами різниці між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції $\Delta t_{\text{ог}}$, встановлюються залежно від призначення будинку і виду огорожувальної конструкції і наведені у таблиці 3 [16].

Ці найбільші допустимі величини температурних перепадів доцільно зменшувати (тобто підвищувати необхідний опір теплопередачі) у всіх тих випадках, коли тривалість суворих періодів зима велика, гранично допустима холодна радіація в приміщенні тривала, а експлуатаційні витрати на опалювання будівлі стають підвищеними через надмірну вартість опалювальних систем.

У опалювальних виробничих приміщеннях, де люди зайняті фізичною роботою, що пов'язана з виділенням великої кількості тепла людським організмом, температурні перепади на поверхні огорож допускаються до 7°C .

Мінімально допустима температура внутрішньої поверхні $t_{\text{вн}}$ непрозорих огорожувальних конструкцій у зонах теплопровідних включень, у кутах і укосах віконних і дверних про-

різів повинна бути не менше ніж температура точки роси t_p для запобігання випадання конденсату на захисні конструкції

$$t_{\text{теплотр.охл.мін}} > t_{\text{мін}} \quad (2.25)$$

$t_{\text{теплотр.охл.мін}}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції; $t_{\text{мін}}$ – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні при розрахункових значеннях температур внутрішнього й зовнішнього повітря.

Мінімально допустиме значення $R_{q \text{ мін}}$ опору теплопередачі внутрішніх міжквартирних конструкцій, що розмежовують приміщення з розрахунковими температурами повітря, які відрізняються більше ніж на 3°C (стіни, перекриття), і приміщень з поквартирним регулюванням тепло-споживання визначають за формулою

$$R_{\text{мін}} = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\Delta t_{\alpha} \alpha_{s1}} \quad (2.26)$$

де t_{s1} , t_{s2} – розрахункова температура повітря в приміщеннях, що приймається згідно з таблицею Г.2 [16] або розраховується згідно з додатком Д [16]; α_{s1} – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкцій, що приймається згідно з додатком Е [16].

2.8 Теплостійкість захищаючих конструкцій і приміщень

Теплофізичний розрахунок захищаючих конструкцій при сталому потоці тепла і стабільному тепловому стані проводиться при суттєвому допущенні, яке полягає в тому, що температури повітря як із зовнішньою, так і з внутрішньої сторони приймаються постійними, – допущення, яке спрощує розрахунок, в реальних умовах звичайно не має місця.

Температура зовнішнього повітря в холодний період року коливається; максимальні зміни на територіях з нестійкою зимою при відлізі можливі, наприклад, від -30° до $+5^\circ$, протягом декількох діб. В літній період року можливі зміни температури зовнішнього повітря від $+15^\circ$ вночі до $+45^\circ$ вдень.

Коливання температури зовнішнього повітря у часі викликають охолодження або нагрів шарів захищаючих конструкцій, а

величина потоку тепла і розподіл температур усередині огорож зазнають значні зміни, в порівнянні з результатами розрахунку за стаціонарних умов теплопередачі, навіть при сталості температури повітря в приміщенні. В тих випадках, коли коливаються значення і цієї останньої температури, відбуваються ще більш значні відхилення від даних розрахунку по сталому потоку тепла.

Коливання температури повітря усередині приміщень в холодний період року характерні, наприклад, для будівель з періодично діючим опалюванням (наприклад, лічне опалювання). В теплий період року, навіть у відносно помірному кліматі, відбуваються періодичні підвищення температури в приміщенні (як правило, в другій половині дня), пов'язані з прогріванням огорож конвективним і радіаційним теплом, а також сонячним промінням, що проникає через світлоотвори. Періодично змінний температурний режим зовнішніх захищаючих конструкцій будівлі впливає на тепловий стан приміщень.

Періодичні і значні за своєю величиною зміни температури зовнішнього і внутрішнього повітря змушують пред'являти до захищаючих конструкцій додаткові теплофізичні вимоги (крім тих, які визначаються розрахунками для умов сталого потоку тепла).

При значних (і небажаних в гігієнічному відношенні) коливаннях температури (зовнішнього або внутрішнього повітря) захищаючі конструкції повинні володіти **теплостійкістю**.

Під **теплостійкістю** розуміють властивість захищаючої конструкції зберігати відносну стабільність температури на її внутрішній поверхні при періодичних змінах температури повітря (зовнішнього або внутрішнього) і виникаючих з цієї причини коливаннях потоку тепла, що проходить через конструкцію.

Температура повітря в приміщеннях з недостатньо теплостійкими огорожами влітку швидко підіймається (при прогріванні сонячним промінням), а взимку падає при зменшенні тепловіддачі опалювальних систем. Такі приміщення звичайно є мало задовільними в санітарно-гігієнічному відношенні.

Особливо важливі властивості теплостійкості захищаючих конструкцій для стійко жаркого літнього періоду, що підтверджується практикою експлуатації будівель в сухих південних районах, де коливання температури на зовнішній поверхні огорож

особливо високі. В цих умовах важливо забезпечити пониження температури зовнішнього повітря шляхом озеленення і обводнення території, прилеглої до будівалі. В нічний час доцільно використовувати більш низьку температуру зовнішнього повітря для провітрювання і охолодження дахів і екранованих стін будівель і тим самим підвищити теплофізичні властивості цих огорож навіть в тому випадку, якщо вони відрізняються порівняно малою масивністю.

Влітку різниця між температурами внутрішнього і зовнішнього повітря відносно мала, а при стійкій сонячній погоді коливання температур зовнішнього повітря протягом доби виражені більш чітко ніж взимку. У зв'язку з цим теплофізичні розрахунки по сталому потоку тепла, що враховують лише незмінну і при цьому достатньо велику різницю температур зовнішнього і внутрішнього повітря, втрачають фізичну достовірність і відповідність реальним умовам.

Характер умов, коли теплові дії на дану конструкцію періодично повторюються, є типовим для умов експлуатації будівель, оскільки їх захищаючі конструкції підпадають під вплив зовнішнього повітряного середовища, температура якого закономірно змінюється протягом доби або більш тривалих періодів часу.

Вважається, що такі періодичні дії гармонійно змінюються і відбуваються в часі за законом косинуса або синуса. Можна вважати, що ці дії багато разів повторюються (наприклад, шодоби) і у зв'язку з такою багатократністю зміни температур усередині конструкції (незалежно від її первинного теплового стану) отримують стійко сталий або, інакше кажучи, квазістаціонарний (як би стаціонарний) характер.

Якщо період теплових дій заданий, зміна температур в даній матеріальній системі визначаються тільки затухаючими по глибині конструкції відхиленнями від середнього значення температури і зростаючими запізнюваннями цих відхилень в часі в порівнянні з діями, що мають місце на поверхні конструкції, яка розташована в області коливань температури. Інакше кажучи, при заданому періоді дій гармонійні зміни температур в будь-якому перерізі конструкції визначаються тільки двома параметрами: амплітудою коливань і запізнюванням часу (фази).

Головною задачею теплофізичних розрахунків захищаючих конструкцій в нестационарних умовах є визначення цих параметрів.

У теорії теплостійкості прийнято, що гармонійні коливання потоку тепла, що сприймається поверхнею захищаючої конструкції, відбуваються з періодом τ , що відповідає часу між максимумами надходження тепла до поверхні конструкції (періодична дія сонячної радіації в ясні дні і т.і.). Пряма лінія $Q_{cp} - Q_{cp}$ виражає середнє значення потоку (рис. 2.11) тепла, що проходить через 1 м^2 захищаючої конструкції за 1 год. і визначається згідно (2.6). Відхилення величини потоку тепла від середнього значення Q_{cp}

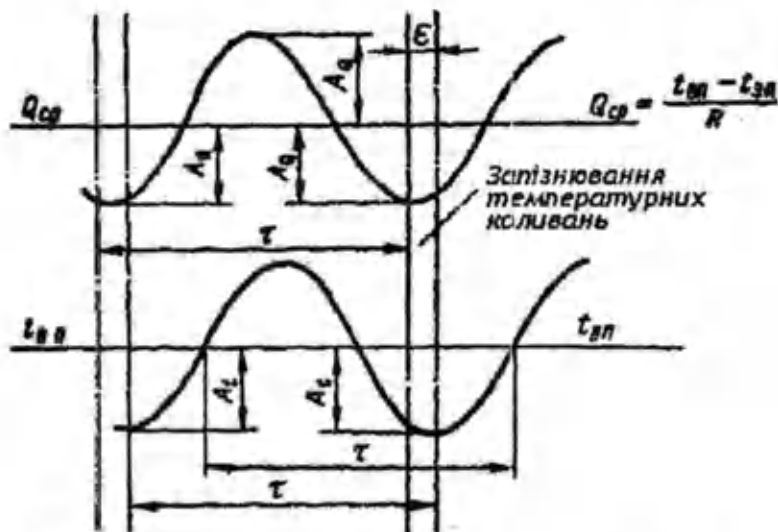


Рисунок 2.11 – Коливання потоку тепла і значень температури на поверхні захищаючої конструкції: Q_{cp} і t_{gn} – середні значення потоку тепла і температури на поверхні конструкції; τ – період коливань; A_q і A_t – амплітуди коливань потоку тепла і значень температури; ϵ – запізнювання коливань температури на поверхні захищаючої конструкції, в порівнянні з коливаннями потоку тепла

виражаються амплітудами A_0 . Коливання потоку тепла, що отримується поверхнею конструкції, викликають коливання температури цієї поверхні. Пряма лінія представляє середнє значення температури поверхні, що відповідає усталеному потоку тепла і визначається згідно (2.17). Відхилення температури поверхні від середнього її значення виражаються амплітудами A_1 .

Амплітуда A_1 залежить від коливань потоку тепла A_0 і їх періоду, а також від теплофізичних властивостей захищаючої конструкції і матеріалів, що входять в її склад. У міру поглиблення всередину конструкції, амплітуда A_1 зменшується, а запізнювання є — зростає. З урахуванням цих закономірностей температурних коливань і їх зсувів в часі, пилля крива на рис. 2.11 могла б бути віднесена до довільного перетину по глибині конструкції.

Чим менший період коливань потоку тепла і його частина, що відводиться в глибину конструкції, тим більша кількість тепла періодично впливає на поверхню огорожі, викликаючи коливання її температури. Ця кількість тепла, що впливає на зміни вказаної температури, виражається коефіцієнтом теплозасвоєння Y поверхні, що сприймає потік тепла. Коефіцієнт теплозасвоєння рівний відношенню амплітуди коливань потоку тепла до амплітуди коливань температури внутрішньої поверхні

$$Y = \frac{A_0}{A_{i..}} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт теплозасвоєння за своїм фізичним значенням є коефіцієнтом теплосприйняття (теплообміну) в умовах передачі через поверхню конструкції періодичних теплових дій, що відбуваються тільки шляхом теплопровідності. Величина Y залежить від періоду теплових дій, а також від властивостей матеріалу і конструкції, а тому не є звичайною теплофізичною константою матеріалу, подібною константам теплопровідності і температуропровідності. Коефіцієнт теплозасвоєння Y пов'язаний із змінами температури поверхні конструкції і її окремих шарів, а зовсім не з кількістю тепла, що акумулюється огорожею; поняття про потік тепла, що сприймається поверхнею конструкції або окремим її шаром (при періодичних теплових діях), полегшує задачу відшукуван-

ня зручних для практики методів розрахунку розповсюдження (тобто загасання і залізнювання) коливань температур усередині захищаючих конструкцій будівель.

При відносно великій товщині конструктивного шару, поверхня якого сприймає періодичний потік тепла, коефіцієнт теплозасвоєння його поверхні залежить тільки від фізичних властивостей матеріалу і періоду коливань теплових дій. В цьому випадку

$$Y = s = \sqrt{\lambda c \rho \omega}, \quad (2.28)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності, c — питома теплоємність, ρ — густина, $\omega = 2\pi/T$ — частота коливань температури в 1/год (T — період коливань).

Величини коефіцієнтів теплозасвоєння s конструктивних шарів, виконаних з певного матеріалу для різних умов експлуатації вказані в додатку Л [16].

Для найбільш характерних теплових впливів з періодом коливання $T = 24$ год.:

$$Y \approx 0.51 \sqrt{\lambda c \rho}.$$

При збільшенні частоти (і відповідно зменшенні періоду) коливань глибина розповсюдження тепла зменшується, і за гранично малого періоду стає вкрай малою. При збільшенні тривалості періодів теплових дій (наприклад, до добових, а тим більше до тих, що відбуваються в річному циклі) розповсюдження тепла углиб матеріального середовища відповідно зростає.

Коливання температури, що відбуваються на поверхні, розповсюджуються всередину захищаючої конструкції, але їх амплітуди зменшуються, тобто коливання поступово затухають в її товщі. Відношення амплітуди A_1 на поверхні конструкції, що сприймає коливання температур зовнішнього середовища, до амплітуди A'_1 , що затухає на протилежній поверхні називається затуханням амплітуд v усередині конструкції, тобто:

$$v = \frac{A_1}{A'_1}, \quad (2.29)$$

Мірою інтенсивності загасання коливань температури усередині однорідної конструкції є величина, що являє собою добуток термічного опору на коефіцієнт теплозасвоєння

$$D = R s \quad (2.30)$$

називається умовною товщиною або тепловою інерцією захисних конструкцій. Теплова інерція виявляється у властивості конструкції зберігати чи повільно змінювати розподіл температур, характерний для середніх температурних умов навколишньої повітряного середовища.

Для багатошарових конструкцій теплова інерція розраховується за наближеним виразом

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots + R_n s_n \quad (2.31)$$

Наближеність формули (29) пов'язана з тим, що цією формулою не враховується порядок розташування в конструкції окремих конструктивних шарів з різним теплозасвоєнням і термічним опором.

При вивченні особливостей розповсюдження періодичних теплових дій по товщині захищаючої конструкції велике значення має так званий «шар різких коливань температури», що безпосередньо прилягає до поверхні, що сприймає періодичні потоки тепло.

Усередині шару різких коливань однорідної конструкції амплітуда коливань температури згасає приблизно удвічі і на іншій його поверхні складає тільки половину в порівнянні з амплітудою коливань на поверхні, де відбуваються періодичні теплові дії. Теплова інерція D_d для шару різких коливань рівна одиниці, тобто

$$D_d = R_d s = \frac{\delta}{\lambda} s = 1 \quad (2.32)$$

Якщо дана конструкція набагато товстіша за шар різких коливань, то її слід вважати товстою (в цьому випадку $Y = s$)

З деяким наближенням приймають, що на розповсюдження періодичних теплових дій по товщині захищаючої конструкції впливають тільки теплофізичні властивості матеріалів, розташованих в її шарі різких коливань. Вся ж решта частина конструкції, що лежить за межами цього шару, не впливає помітним чином на величину засвоєння тепла поверхнею захищаючої конструкції.

Для однорідної захищаючої конструкції товщина шару різких коливань визначиться з (2.32)

$$\delta = \frac{\lambda}{s}, \quad (2.33)$$

При зміні (зменшенні) періоду коливань потоку тепла один і той самий конструктивний шар матеріалу може перетворитися на товстий, у зв'язку із зменшенням товщини шару різких коливань.

Шар різких коливань займає порівняно невелику частину загальної товщини захищаючої конструкції. Тому навіть облицювальний шар, виконаний з щільного матеріалу, згליває на коливання температури на поверхні конструкції і зміну її активної теплоспоживності. Стіна, що має на поверхні, обернутій в приміщення, щільний фактурний шар або штукатурку, виявиться більш теплостійкою (володіючою більшою активною теплоємністю), ніж така ж стіна, але позбавлена цього шару.

За наявності щільної фактури межа шару різких коливань розташовується в матеріалі стіни, що знаходиться під фактурою, оскільки теплова інерція фактурного шару, прийнятої в будівельній практиці товщини, як правило, менше одиниці.

Нанесення фактурного шару приводить до суттєвого збільшення значень коефіцієнтів теплозасвоєння поверхні стіни.

Якщо штукатурка відокремлена від основного матеріалу стіни повітряним прошарком або під штукатуркою є шар якої-небудь додаткової термоізоляції, що має малу величину D , значення коефіцієнтів теплозасвоєння внутрішньої поверхні огорожі змінюються, оскільки шар різких коливань розташовується вже в трьох шарах, що складаються з різних матеріалів. Коефіцієнт теплозасвоєння повітряних прошарків приймається рівним нулю при будь-якому періоді коливань теплового потоку, а отже, приймається рівною нулю і теплова інерція повітряного прошарку (оскільки $D = R_s = R \cdot 0 = 0$).

2.9 Визначення коефіцієнта теплозасвоєння зовнішньої поверхні огорожувальних конструкцій у літній період

Величини коефіцієнтів теплозасвоєння для товстих конструктивних шарів (тобто коефіцієнти засвоєння тепла поверхнею одворідних конструкцій з достатніми теплозахисними властивостями – з тепловою інерцією $D \geq 1$) треба приймати рівним розрахунковому коефіцієнту теплозасвоєння s матеріалу цього шару конструкції згідно додатка Л [16].

Величина засвоєння тепла поверхнею відносно тонкого конструктивного шару буде іншою, оскільки на неї чинять істотний вплив в шаруватих конструкціях засвоєння тепла поверхнею підстиляючого шару, розташованого під тим, що розглядається, а в дуже тонких, але однорідних — віддача тепла з поверхні конструкції протилежної тій, яка сприймає періодичну теплову дію.

Тому коефіцієнт теплозасвоєння зовнішньої поверхні шару Y з тепловою інерцією $D < 1$ визначають розрахунком, починаючи з першого шару (розраховуючи від внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції):

а) для першого шару за формулою

$$Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_a}{1 + R_1 \alpha_a}; \quad (2.34)$$

б) для i -го шару за формулою

$$Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i-1}}{1 + R_i Y_{i-1}}, \quad (2.35)$$

де R_1, R_i — термічні опори відповідно першого та i -го шарів огорожувальної конструкції.

2.10 Визначення амплітуди коливань температури внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій при оцінці їх теплостійкості у літній період

В літній період коливання температур відбувається на зовнішній поверхні захисної конструкції і поступово згасає у міру поширення вглиб конструкції.

Загасання температурних коливань на внутрішній поверхні захисної конструкції не може бути визначене незалежно від врахування особливостей усіх шарів конструкції, тому що воно залежить від впливу всіх конструктивних шарів, розташованих по шляху руху теплової хвилі. Тому розрахунок загасання теплових коливань усередині багатошарової конструкції починають з останнього конструктивного шару на шляху руху теплової хвилі і переходять послідовно від шару до шару, наближаючись до поверхні конструкції, що безпосередньо сприймає періодичні теплові впливи. Це означає, що при розрахунку тепловитривалості захис-

ної конструкції у літніх умовах розрахунок починається з конструктивного шару, що граничить з повітрям приміщення.

Розрахунок амплітуди коливань температури внутрішньої поверхні непрозорих конструкцій $A_{t,n}$, виконується за формулою

$$A_{t,n} = \frac{A_{t,roz}}{v}, \quad (2.36)$$

де $A_{t,roz}$ – розрахункова амплітуда коливань температури зовнішнього повітря, що визначається за формулою

$$A_{t,roz} = \frac{1}{2} A_t + \frac{\chi(I_{max} - I_{сер})}{\alpha_{zn}}, \quad (2.37)$$

v – величина затухання розрахункової амплітуди коливань температури зовнішнього повітря $A_{t,roz}$ в огорожувальній конструкції, що визначається за формулою

$$v = 0.9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_s)(s_2 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1})(\alpha_{zn} + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n)\alpha_{zn}}, \quad (2.38)$$

де A_t – максимальна амплітуда добових коливань температури зовнішнього повітря в липні, приймається згідно зі СНиП 2.01.01;

χ – коефіцієнт поглинання сонячної радіації матеріалом зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції, визначається за таблицею П.1 [16];

$I_{max}, I_{сер}$ – відповідно максимальне і середнє значення сумарної сонячної радіації (прямої і розсіяної), прийняті згідно зі СНиП 2.01.01 для зовнішніх стін як для вертикальних поверхонь західної орієнтації і для покриття – як для горизонтальної поверхні;

α_{zn} – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції за літніми умовами, визначається формулою

$$\alpha_{zn} = 1,16 \cdot (5 + 10\sqrt{v}), \quad (2.39)$$

де v – мінімальна з середніх швидкостей вітру по румбах за липень, м/с, повторюваність яких складає 16% і більше, прийнята згідно зі СНиП 2.01.01, але не менше 1 м/с.

D – теплова інерція огорожувальної конструкції, що визначається за формулою (2.31);

$s_1, s_2, \dots, s_n$ – розрахункові коефіцієнти теплозасвоєння матеріалу окремих шарів огорожувальної конструкції, приймаються за додатком Л для умов експлуатації А [16];

$Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ – коефіцієнти теплозасвоєння зовнішньою поверхнею окремих шарів огорожувальної конструкції, що визначаються за формулами (2.34) або (2.35).

Порядок нумерації шарів у формулі (2.38) приймається у напрямку від внутрішньої поверхні конструкції до зовнішньої.

2.11 Визначення коефіцієнта теплозасвоєння зовнішньої поверхні огорожувальних конструкцій у зимовий період

При розрахунках коефіцієнта теплозасвоєння Y у багатошарових захисних конструкціях враховуємо тільки активну частину захисної конструкції, яку охоплює шар різких коливань.

В зимовий період коливання температур відбувається вже на внутрішній поверхні захисної конструкції.

Показник теплозасвоєння внутрішньою поверхнею непрозорої огорожувальної конструкції розраховується за формулами:

а) коли внутрішній шар огорожувальної конструкції має теплову інерцію $D \geq 1$, то

$$Y_n = s_1, \quad (2.40)$$

б) якщо шар різких коливань захоплює і другий від внутрішньої поверхні шар – тобто якщо тепла інерція першого шару огорожувальної конструкції $D_1 < 1$, а першого і другого шарів конструкції $D_1 + D_2 \geq 1$, то коефіцієнт теплозасвоєння внутрішньої поверхні розраховується за формулою

$$Y_n = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2}, \quad (2.41)$$

де R_1, s_1, s_2 – термічний опір та коефіцієнти теплозасвоєння відповідно першого та другого шарів;

в) якщо шар різких коливань захоплює і наступні n шарів (1-й, 2-й, 3-й, ..., $n+1$ -й) – тобто якщо тепла інерція перших n шарів конструкції $D_1 + D_2 + \dots + D_n < 1$, а тепла інерція $n+1$ шарів $D_1 + D_2 + \dots + D_n + D_{n+1} \geq 1$, то коефіцієнт теплозасвоєння внутрішньої поверхні потрібно визначати з урахуванням коефіцієнтів

теплотозасвоєння n шарів за формулами для n -го шару

$$Y_n = \frac{R_n s_n^2 + s_{n+1}}{1 + R_n s_{n+1}}; \quad (2.42)$$

для i -го шару ($i = n-1, n-2, \dots, 1$)

$$Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i+1}}{1 + R_i Y_{i+1}}. \quad (2.43)$$

Для термічно неоднорідних шарів конструкції потрібно визначити середній коефіцієнт теплотозасвоєння матеріалом цього шару $s_{\text{ср}}$, за формулою

$$s_{\text{ср}} = \frac{\sum_{n=1}^n s_n F_n}{\sum_{n=1}^n F_n}, \quad (2.44)$$

де s_n – коефіцієнт теплотозасвоєння окремих матеріалів шару; F_n – площа, яку займають окремі матеріали по поверхні шарів.

2.12 Визначення амплітуди коливань температури повітря приміщення при оцінці теплостійкості в зимовий період

Амплітуду коливань теплового потоку через захисну споруду можна знайти як різницю між його максимальним і середнім значенням:

$$A_q = q_{\text{max}} - q_{\text{ср}}. \quad (2.45)$$

Оскільки коливання температури повітря в приміщенні, а також коливання швидкості його руху – відносно незначні, величини коефіцієнтів теплового сприйняття α_s можуть бути прийнятими незмінними як у момент найбільшого нагрівання приміщення, так і в момент наявності в ньому середніх температур.

$$q_{\text{max}} = \alpha_s (t_{s, \text{max}} - t_{s, n, \text{max}}), \quad q_{\text{ср}} = \alpha_s (t_s - t_{s, n}), \quad (2.46)$$

$t_{s, \text{max}}, t_{s, n, \text{max}}$ – відповідно максимальні температури внутрішнього повітря і внутрішньої поверхні захисної споруди.

$$\begin{aligned} A_q &= \alpha_s (t_{s, \text{max}} - t_{s, n, \text{max}}) - \alpha_s (t_s - t_{s, n}) = \\ &= \alpha_s (t_{s, \text{max}} - t_s) - \alpha_s (t_{s, n, \text{max}} - t_{s, n}) = \alpha_s A_{t_s} - \alpha_s A_{t_{s, n}}, \end{aligned} \quad (2.47)$$

де $A_i, A_{i..}$ (A_i – в позначеннях [16]) – відповідно амплітуди коливань температур внутрішнього повітря і внутрішньої поверхні захисної споруди.

Таким чином, амплітуду коливань теплового потоку можна представити як різницю двох теплових потоків, один з яких йде на нагрівання повітря приміщення, а інший викликає підвищення температури внутрішньої поверхні зовнішніх огорож.

За означенням коефіцієнта теплозасвоєння (внутрішньої поверхні огорожі) (2.27) бачимо, що амплітуда коливань температури на внутрішній поверхні зовнішньої захисної конструкції $A_{i..}$ і амплітуда коливань теплового потоку через цю поверхню A_q пов'язані виразом:

$$Y_s = \frac{A_q}{A_{i..}}, \quad A_{i..} = \frac{A_q}{Y_s}.$$

Підставивши цей вираз в (2.47), отримаємо

$$A_q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{Y_s}} A_i = B \cdot A_i \quad (2.48)$$

де B – коефіцієнт теплопоглинання внутрішньої поверхні захисної конструкції:

$$B = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{Y_s}}. \quad (2.49)$$

Цей коефіцієнт виражає загальну кількість тепла, що сприймається поверхнею огорожі при періодичних коливаннях температури, і встановлює взаємозв'язок змін цієї кількості з коливаннями температури повітря приміщення.

Оскільки в конкретних теплофізичних розрахунках значення α_s приймаються постійними, величини коефіцієнтів теплопоглинання B залежать тільки від тих конструктивних або утеплюючих шарів огорожі, які входять в шар різких температурних коливань, що має порівняльно невелику товщину.

Амплітуда коливань температури приміщення A_i розраховується за формулою

$$A_{\text{т}} = \frac{0.7 q_{\text{вн}} m}{\sum_{j=1}^K B_j F_j}, \quad (2.50)$$

де $q_{\text{вн}}$ – тепловтрати приміщення, Вт, що визначаються згідно з положеннями СНиП 2.04.05; m – коефіцієнт нерівномірності тепловіддачі системи опалення, приймається згідно з таблицею Р1 [16]; F_j – площа внутрішньої поверхні j -ї зовнішньої огорожувальної конструкції; K – кількість зовнішніх огорожувальних конструкцій у приміщенні; B_j – коефіцієнт теплопоглинання внутрішньою поверхнею j -ї зовнішньої огорожувальної конструкції приміщення згідно (2.49).

2.13 Визначення показника теплозасвоєння поверхнею підлоги

На самопочуття людини істотно впливають умови, в яких знаходяться її голова і ноги, і як вже зазначалося, нормативні вимоги до допустимих перепадів температури для підлог, покриттів і перекриттів вищі (а самі допустимі нормативні перепади – менші) ніж для зовнішніх стін. Тому питання теплообміну між людиною і поверхнею підлоги є дуже важливими. Нерівноважність теплообміну між людською стопою і підлогою може призвести до переохолодження організму і, як наслідок, до простудних, ревматичних і інших захворювань.

Показник теплозасвоєння поверхнею підлоги $Y_{\text{п}}$ визначають:

а) якщо покриття підлоги (перший, починаючи з приміщення, шар конструкції підлоги) має теплову інерцію $D_1 = R_1 s_1 \geq 0.5$, показник теплозасвоєння поверхнею підлоги визначають за формулою

$$Y_{\text{п}} = 2s_1; \quad (2.51)$$

б) якщо перші n шарів конструкції підлоги ($n \geq 1$) мають теплову інерцію $D_1 + D_2 + \dots + D_n < 0.5$, але тепла інерція $n+1$ шарів $D_1 + D_2 + \dots + D_n + D_{n+1} \geq 0.5$, показник теплозасвоєння підлоги $Y_{\text{п}}$ визначається послідовним розрахунком показників теплозасвоєння поверхнями шарів конструкції, починаючи з n -го до 1-го

за формулами:

- для n -го шару

$$Y_n = \frac{2 \cdot R_n \cdot s_n^2 + s_{n+1}}{0,5 + R_n \cdot s_{n+1}}; \quad (2.52)$$

- для i -го шару ($i = n-1; n-2; \dots; 1$)

$$Y_i = \frac{4 \cdot R_i \cdot s_i^2 + Y_{i+1}}{1 + R_i \cdot s_{i+1}}, \quad (2.53)$$

де $D_1, D_2, \dots, D_{n+1}$ – теплова інерція відповідно 1-го, 2-го, ..., $n+1$ -го шарів конструкції підлоги; R_i, R_n – термічні опори i -го й n -го шарів конструкції підлоги; s_1, s_2, s_n, s_{n+1} – розрахункові коефіцієнти теплозасвоєння матеріалів відповідних шарів конструкції підлоги, що приймаються згідно додатка Л для умов експлуатації А [16];

Показник теплозасвоєння поверхнею підлоги Y_n приймається рівним показнику теплозасвоєння поверхні 1-го шару Y_1 .

2.14 Нормативні вимоги до показників теплостійкості

Для житлових та громадських будинків, навчальних та лікувальних закладів обов'язкове виконання умов:

– теплостійкості в літній період року зовнішніх огорожувальних конструкцій

$$A_{\text{л.}} \leq 2,5^\circ\text{C},$$

де $A_{\text{л.}}$ – амплітуда коливань температури внутрішньої поверхні непрозорих огорожувальних конструкцій;

– теплостійкості в зимовий період року температури приміщень: за наявності центрального опалення

$$A_{\text{з.}} \leq 1,5^\circ\text{C};$$

за наявності теплоаккумуляційного опалення:

$$A_{\text{з.}} \leq 2,5^\circ\text{C},$$

$A_{\text{з.}}$ – амплітуда коливань температури внутрішнього повітря.

За наявності в будинку центрального опалення з автоматичним регулюванням температури внутрішнього повітря теплостійкість приміщень в холодний період року не визначається.

Для поверхні підлог житлових, громадських будинків і приміщень промислових будинків із постійними робочими місцями обов'язкове виконання умови

$$Y_{\Pi} \leq Y_{\Pi, \max},$$

де Y_{Π} – показник теплозасвоєння поверхні підлоги; $Y_{\Pi, \max}$ – максимальне допустиме значення показника теплозасвоєння поверхнею підлоги, що встановлюється згідно з таблицею 6 [16] в залежності від призначення будинку.

Контрольні запитання

1. Поясніть термін "потенціал перенесення". Що є потенціалом перенесення тепла, вологи, повітря?
2. В чому полягає відмінність при перенесенні теплоти з одного боку та вологи і повітря – з іншого?
3. Що називають "температурним полем", "ізолінією температур"?
4. Яке температурне поле називають квазістаціонарним?
5. Які існують механізми поширення теплоти в захисних конструкціях?
6. Як знайти загальний опір теплопередачі захисної конструкції?
7. Якою лінією зображується розподіл температур у шаруватій конструкції, виконаній з матеріалів з різною теплопровідністю, викреслений в масштабі реальної товщини? викреслений в масштабі термічних опорів? Поясніть чому.
8. Поясніть алгоритм розрахунку опору теплопередачі неоднорідних конструкцій.
9. Що називають "теплопровідним включенням"?
10. Поясніть механізми перенесення тепла повітряними прошарками.
11. В яких випадках доцільно і в яких недоцільно використовувати повітряні прошарки?
12. Які вимоги накладаються згідно ДБН В.2.6-31:2006 "Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель" на основні теплотехнічні показники захищаючих конструкцій?
13. Поясніть термін "теплостійкість". Поясніть причину його введення і використання.
14. Поясніть як змінюється потік тепла в нестационарних умовах згідно теорії теплостійкості.
15. Поясніть зміст терміну "коефіцієнт теплоспасовання".
16. Поясніть термін "теплова інерція".
17. Що називають "шаром різких коливань температури"?
18. Які існують нормативні вимоги до показників теплостійкості

Розділ 3. ПОВІТРЯНИЙ РЕЖИМ БУДИНКІВ

3.1 Повітропроникність конструкцій

При різниці тиску повітря з одного і з іншого боку захищаючої конструкції через неї може проникати повітря в напрямі від більшого тиску до меншого. Це явище називається **фільтрацією**. Явище, при якому повітря проникає в будівлю, називається **інфільтрацією** повітря; у випадках, коли повітря проникає з будівлі в зовнішнє середовище говорять про **ексфільтрацію**.

Перенос повітря фільтраційного потоку виникає в випадках, коли різниця тиску на зовнішній і внутрішній поверхнях захисної конструкції перебільшує (за енергетичним рівнем) опір проходження повітряного потоку. Ці опори виникають на зовнішній поверхні стіни (у вигляді облицювання, покриття фарбою і т.і.) і в товщі захисної конструкції (у вигляді прошарків з пластмаси, бітуму, фольги та ін.).

Повітропроникність захищаючих конструкцій в основному визначається щільністю сполучень між окремими елементами, тобто герметичністю стиків.

Опір фільтрації повітря захищаючою конструкцією в цілому або її окремими шарами, називають **опором повітропроникності** огорожі R_g , $\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па} / \text{кг}$. Він показує різницю тиску в Па, при якій потік повітря через 1 м^2 площі захищаючої конструкції буде дорівнювати 1 кг/год .

При наявності в захисних конструкціях декількох шарів її загальний опір повітропроникності :

$$R_g = R_{g_1} + R_{g_2} + \dots + R_{g_n} = \sum_{i=1}^n R_{g_i} \quad (3.1)$$

де R_{g_i} – опір повітропроникності i -го шару конструкції, приймається згідно таблиці Т.2 [16], n – кількість шарів у конструкції.

Інфільтрація повітря в холодний період року через зовнішні огорожі знижує температуру на внутрішній поверхні конструкції.

Зниження температури на внутрішній поверхні огорожі можна компенсувати або за рахунок збільшення товщини конструкції або шляхом підвищення температури повітря. Такі заходи необ-

хідні щоб уникнути погіршення теплового режиму приміщення. В першому випадку збільшуються капітальні витрати на конструкції, а у другому — теплові втрати і надбавка енергії на опалювання.

Інфільтрація повітря через ущільнення притворів вікон і дверей помітно погіршує тепловий режим будівель і збільшує теплові втрати. Кількість повітря, проникаючого в будівлю, тим більше, чим гірше герметичність притворів і більше швидкість вітру. Так, при швидкості вітру 8 м/с кількість інфільтруючого повітря рівна 8 м³/год через 1 м притвору вікна. Така кількість повітря викличе втрату теплової енергії в кількості 100 Вт.

Ексільтрація повітря через конструкцію може бути причиною підвищеної конденсації водяної пари в її товщі. При ексільтрації, кількість водяної пари, що проникає в конструкцію, буде більше, ніж при звичайній дифузії пари.

Інфільтрація і ексільтрація повітря через будівельні конструкції, шви і стики небажані з теплотехнічної точки зору. Проте з гігієнічної точки зору певний обмін повітря в будівлях необхідний. Якщо він не забезпечується іншим способом, ніж інфільтрація, то обмін повітря в будівлях через притвори вікон і дверей допускається, але він не повинен перевищувати нормовані значення, тобто опір повітропроникності має бути рівним або перевищувати нормативно необхідний опір

$$R_g \geq R_{g,n}, \quad (3.2)$$

де $R_{g,n}$ — необхідний опір повітропроникності.

Для *непрозорих* огорожувальних конструкцій необхідний опір повітропроникності на i -му поверсі, для якого виконується розрахунок, визначається за формулою

$$R_{g,n} = \frac{\Delta p}{G_n}, \quad (3.3)$$

де G_n — допустима повітропроникність огорожувальної конструкції, що встановлюється згідно з таблицею 7 [16] залежно від виду огорожувальної конструкції.

Щоб визначити розрахункову різницю тисків Δp треба проаналізувати причини фільтрації повітря.

Для можливості фільтрації повітря через зовнішні огорожі

необхідна різниця тиску повітря з одного і з іншого боку огорожі. Різниця тиску повітря може виникнути або під впливом різниці температур повітря в будівлі і зовнішнього повітря (тепловий натиск (напір)), або під впливом вітру (вітровий натиск (напір)).

Тепловий натиск (напір). У зимовий час повітря в опалювальних приміщеннях має температуру вищу, ніж зовнішнє повітря. При цьому зовнішнє повітря матиме більшу густину та об'ємну вагу, ніж повітря в будівлі. Різниця густин (об'ємних ваг) повітря і створює різницю його тиску. На рис. 3.1 схематично зображено поперечний переріз опалювального приміщення з двома зовнішніми стінами. Якщо в такій будівлі підлога і стеля будуть повітро непроникними, то через нижню половину зовнішніх стін повітря проникатиме в будівлю, а через верхню половину йти з нього.

На середині висоти приміщення різниця тиску повітря буде $\Delta p = 0$ (нейтральна зона). У міру віддалення від нейтральної зони величина Δp зростатиме, як показано стрілками на рис. 3.1. Максимальна величина Δp буде у підлозі і під стелею. У деякому перетині ab , віддаленому на відстані h від нейтральної зони, величина Δp визначиться згідно формули

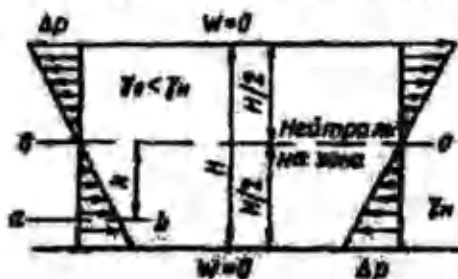


Рисунок 3.1 – Схема розташування нейтральної зони за умови наявності теплового натиску (напору)

$$\Delta p = p_s - p_n = (p_0 + \rho_s gh) - (p_0 + \rho_n gh) = h(\rho_s - \rho_n)g = h(\gamma_s - \gamma_n),$$

де p_0 – тиск (зовні і в середині) на рівні нейтральної зони, $\gamma_{s,n} = \rho_{s,n}g$ – питома вага зовнішнього і внутрішнього повітря (Н/м^3), $\rho_{s,n}$ – густина відповідно зовнішнього і внутрішнього повітря (кг/м^3), g – прискорення вільного падіння (м/с^2).

При повітропроникних верхній і нижній захищаючих конс-

трукціях, а також при відкритих отворах нейтральна зона може виявитися вище або нижче за середину висоти приміщення. Згідно [16] розрахункова різниця тисків внаслідок теплового напору шукається за формулою

$$\Delta p_i = (H - h_i)(\gamma_i - \gamma_s), \quad (3.4)$$

де H – висота будинку (від рівня підлоги першого поверху до верху витяжної шахти), м; h_i – висота від рівня підлоги першого поверху до середини огорожувальної конструкції i -го поверху, для якого проводиться розрахунок, м;

Формула (3.4) показує, що величина теплового натиску зростає із підвищенням різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря.

Значення густин повітря для різних температур може бути обчислена згідно формули

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \frac{t}{273}} \quad (3.5)$$

де $\rho_0 = 1.293 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за температури 0°C .

Питома вага зовнішнього і внутрішнього повітря

$$\gamma_{z,s} = \rho_{z,s} g = \frac{\rho_0 g}{1 + \frac{t_{z,s}}{273}} = \frac{273 \rho_0 g}{273 + t_{z,s}} \quad (3.6)$$

і при підстановці ρ_0 та $g = 9.81 \text{ Н/кг}$, отримаємо

$$\gamma_i = \frac{3463}{273 + t_i}, \quad \gamma_s = \frac{3463}{273 + t_s} \quad (3.7)$$

Вітровий натиск (напір). Тиск вітру на поверхні огороження складає лише частину повного тиску, оскільки не вся кінетична енергія повітряного потоку перетворюється в потенціальну енергію тиску на поверхню. Відношення потенціальної енергії до кінетичної енергії повітряного потоку називають аеродинамічним коефіцієнтом K_{aer} . Його значення залежить від положення площини огорожі по відношенню до напрямку руху повітряного потоку. При напрямку вітру перпендикулярно вертикальним захисним спорудам аеродинамічний коефіцієнт приймають рівним 0.8 – з навітряного боку і 0.4 – з протилежного.

Отже, різниця тисків повітря на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни залежить від аеродинамічної характеристики будівлі і швидкості вітру і при перпендикулярному до стіни напрямку вітру, визначається формулою:

$$\Delta p_2 = \frac{\rho_1 v^2}{2} \cdot K_{\text{всп}}, \quad (3.8)$$

де v – швидкість вітру в м/с; ρ_1 – густина повітря в кг/м³.

Для теплотехнічних розрахунків дійсний тиск вітру на вертикальну поверхню огорожі визначають формулою

$$\Delta p_2 = \frac{\rho_1 v^2}{2} \cdot \frac{0.8 - (-0.4)}{2} \beta_v = \frac{\rho_1 v^2}{2} \cdot 0.06 g \beta_v = 0.03 \gamma_1 v^2 \beta_v, \quad (3.9)$$

де v – максимальна із середніх швидкостей вітру за румбами за січень, м/с, повторюваність яких складає 16 % та більше, прийнята згідно зі СНиП 2.01.01; β_v – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості повітря за висотою будівлі, який приймається згідно з таблицею Т.1 [16].

Повна розрахункова різниця тисків для підстановки у (3.3)

$$\Delta p = (H - h_1)(\gamma_1 - \gamma_e) + 0.03 \gamma_1 v^2 \beta_v. \quad (3.10)$$

Для світлопрозорих огорожувальних конструкцій необхідний опір повітропроникності визначається за формулою

$$R_{g_n} = \frac{(\Delta p / \Delta p_0)^{\frac{2}{3}}}{G_n}, \quad (3.11)$$

де $\Delta p_0 = 10$ Па – різниця тисків, за якою визначається масова повітропроникність світлопрозорої конструкції під час випробувань згідно з ДСТУ Б В.2.6-18.

Контрольні запитання

1. У яких випадках відбувається фільтрація повітря через захисну споруду?
2. Поясніть зміст терміну "опір паропроникності"?
3. Які позитивні і негативні сторони фільтрації повітря?
4. Роз'ясніть причини і механізми виникнення різниці тисків повітря на різних сторонах огорожувальної конструкції.

Розділ 4. ВОЛОГІСНИЙ РЕЖИМ БУДИНКІВ

4.1 Вплив вологісного режиму на теплозахисні властивості конструкції

Розрізняють декілька видів вологи, які викликають небажане підвищення вологості матеріалів, що входять у склад огорожжючих конструкцій будівель. Такими є: *технологічна (початкова) волога*, яка внесена в захисну конструкцію під час будівництва або під час використання зволжених матеріалів; *атмосферна волога*, яка потрапляє в захисні конструкції при атмосферних опадах (у вигляді дощу або мокрого снігу); *грунтова волога*, яка всмоктується капілярами будівельного матеріалу при відсутності гідроізоляції; *волога у вигляді конденсату*, яка утворюється на внутрішній поверхні захисних конструкцій в приміщеннях із підвищеною вологістю; *експлуатаційна волога*, виділення якої пов'язано з експлуатацією будинку; *волога у вигляді водяної пари*, яка дифундує через захисні конструкції приміщень, які опалюються, і може конденсуватись в товщі захисної конструкції при неправильно обраній конструкції.

Будь-який з цих видів вологи може виявитися причиною підвищеного вологісного стану захищаючих конструкцій. Збільшення вологості матеріалів в конструкціях експлуатованих будівель завжди небажане, а для огорож опалювальних будівель з нормальним вологісним режимом є просто неприпустимим. В результаті тривалих і поступово затухаючих процесів вологообміну введеної в експлуатацію захищаючої конструкції з навколишнім повітряним середовищем, її конструктивні шари отримують рівноважний вміст вологи; в правильно запроектованих конструкціях усталений вміст вологи має бути якомога ближче до повітряно-сухого стану⁸ і порівняно незначно змінюватися в різні періоди року.

Конструкції з повітряно-сухим станом матеріалів володіють достатньо високими теплозахисними властивостями; відносна незмінність повітряно-сухого стану протягом річного циклу є необ-

⁸ Повітряно-сухий стан речовини — такий стан, вміст вологи в якому знаходиться в рівновазі з вологістю навколишнього повітря.

хідною передумовою для забезпечення постійності експлуатаційних якостей і достатньої довговічності конструкції.

Надмірний вологісний вміст захищаючих конструкцій особливо характерний в перші роки експлуатації збудованих будівель і у великій мірі залежить від початкової (технологічної) вологості матеріалів конструкції. Найбільша кількість початкової вологи (наприклад, що вноситься при бетонуванні) присутня в конструкціях з легких бетонів, що укладаються на місці, а також у великоблочних і масивних цегляних стінах (надмірний вологісний вміст крупних блоків, змочування цеглини і кладка його на розчинах з великою кількістю вологи, штукатурка мокрим способом і т.д.).

У шарах захищаючих конструкцій, що межують із достатньо сухим повітряним середовищем, вологість матеріалу швидко зменшується і досягає верхньої межі гігроскопічності (межі сорбційного зволоження). Цим закінчується перший період природної сушки; надалі процес висихання, завершенням якого є досягнення конструкцією рівноважної (нормальної) вологості, істотно сповільнюється. Тривалість природного сушіння, а також і величина рівноважної (нормальної) вологості конструкції, залежать від температури і її коливань, вологісного стану навколишнього повітряного середовища, характерного розміру конструкції, що сохне, і властивостей матеріалу, з якого вона виконана. Розрізняють матеріали, які висихають швидко і повільно. До перших відносяться, наприклад, кераміка, добре обпалена цеглина, конструктивні і великопористі бетони; до других – шлакобетон, золобетони і інші неоднорідні бетони з гігроскопічними компонентами або пористими заповнювачами.

Характерним розміром огорожі, яка висихає, є найбільша відстань (по поперечному перетину конструкції), на яку необхідно переміститися волозі для того, щоб досягти поверхні, з якою відбувається випаровування. При випаровуванні з обох поверхонь однорідної конструкції, це буде половина її товщини, а при односторонньому висиханні – вся товщина.

У пустотних конструкціях цей характерний розмір скорочується за рахунок випаровування частини вологи всередину порожнин або повітряних прошарків. Ця волога, що випарувалася всередину

пусток, як правило, видаляється при фільтрації повітря крізь конструкцію.

Зовнішні стіни, виконані з швидко висихаючих матеріалів і володіючи обмеженою товщиною досягають вологісного стану, що наближається до нормального, протягом одного достатньо жаркого літнього періоду. Масивні стіни, виконані з поволі висихаючого матеріалу, сохнуть протягом ряду років, причому і після природного завершення цього процесу вологість їх шарів, віддалених від поверхні, може виявитися достатньо високою навіть в приміщеннях з вологістю повітря не вище нормальної. При використуванні пористих виробів для таких стін їх нормальна вологість звичайно знижується, а теплозахисні властивості підвищуються.

Для забезпечення задовільного вологісного стану шаруваті конструкції важливо, щоб можливі епізодичні зволоження зовнішніх шарів (наприклад, атмосферою вологою) не спричиняли за собою розповсюдження рідкої вологи по всій товщині конструкції.

У конструкціях шаруватих стін це забезпечується вживанням матеріалів з різною вологоємністю і розміром пір. Рідка волога, що міститься в зовнішньому зволоженому шарі з дрібними пора-

ми, не зможе розповсюдитися всередину стін із заповненням з матеріалів з великими порожнинами.

Якщо середня частина стіни виконана з таких матеріалів (піноскло, комірчаста кераміка із заклеюваною поверхнею і т.д.), її вологість буде менше (рис. 4.1 а) ніж у зовнішніх шарах, виконуваних з щільних матеріалів з більш дрібними порами (конструк-

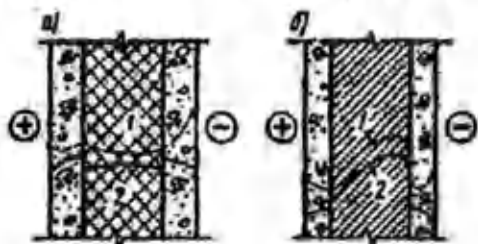


Рисунок 4.1 – Розподіл вологості в шарових стінах із середньою частиною, виконаною з матеріалів з різними властивостями: а – з крупнопористих невологоємних матеріалів, б – з гігроскопічних, вологоємних, повільно висихаючих; 1 – при зволоженні конструкції, 2 – при висиханні конструкції

тивний бетон і т.д.). Такий розподіл вогкості в стінах сприятливий для житлових приміщень у вологому кліматі, вогкість повітря в яких не повинна перевищувати нормальну, не дивлячись на те, що стіни піддаються зволоженню атмосферною вологою. Ця ж конструктивна схема у разі її вживання для стін вологих приміщень із зниженою температурою внутрішнього повітря запобіжить переміщенням вологи зсередини назовні, що відбуваються переважно в рідкій фазі, і забезпечить відносно сухий стан стін.

Навпаки, якщо середня частина стіни виконана з легко змочуваних і поволі висихаючих мілкопористих матеріалів з підвищеною вологостійкістю (наприклад, глинистих і ґрунтових), її вогкість буде вище, ніж зовнішніх облицзовальних шарів (рис. 4.1 б). Подібний розподіл вогкості в масивних стінах може бути сприятливим для малоповерхових будівель, що зводяться в південно-східних районах і що піддаються перегріву протягом тривалого літнього періоду року.

У інших випадках і особливо при обмеженій товщині і стійкості зовнішніх шарів висока вогкість середньої частини стіни може привести до передчасного руйнування конструкції. Зокрема, стіни з легких бетонів, що укладаються між щільним обробним шаром (наприклад, листами сухої гіпсової штукатурки) і зовнішнім конструктивним шаром (наприклад, цегляним або бетонним облицзовуванням), що використовуються як опалубка, не може бути рекомендовано в будь-яких кліматичних умовах і особливо у вологих. Вживання таких стін, крім підвищеної вогкості, приводить до їх поступового руйнування, що виявляється у викривленні, витріщенні і відшаровуванні обробок або в скороченні терміну служби зовнішньої частини конструкції.

Таким чином, використання в суміжних конструктивних шарах матеріалів з різними потенціалами перенесення вологи може викликати поліпшення або, навпаки, зниження теплофізичних властивостей огорожі, залежно від особливостей, зовнішніх дій і умов експлуатації. Такі особливості у великій мірі залежать від параметрів повітряного середовища, дотичного з огорожами будівлі.

4.2 Зв'язок вологи з будівельними матеріалами

За характером своєї взаємодії з водою тверді матеріали діляться на змочувані (гідрофільні) і незмочувані (гідрофобні).

До перших належать, наприклад, гіпс, в'яжучі на водній основі, силкатна цегла, більшість різновидів бетону; до других – бітуми, смоли, мінераловатні вироби на основі незмочуваних в'яжучих, азбест і т.і.

Гідрофільні матеріали активно взаємодіють з водою; у сухому стані їх поверхню енергія має найбільше значення, а при змочуванні зменшується.

Обмежено змочувані і незмочувані матеріали менш активні у взаємодії з водою. Для більшості будівельних матеріалів (наприклад, бетонів, цегли і т.д.) характерна капілярно-пориста структура, особливості якої визначають характер взаємодії матеріалу з вологою при перебуванні його в повітряно-вологоді середовищі або безпосередньому контакті з водою.

У результаті такої взаємодії змінюються фізико-механічні властивості матеріалів, виробів з них та окремих конструкцій будівель. Крім того, для матеріалів гідрофільних, що одержуються на основі структурування водних розчинів в'яжучих або інших матеріальних дисперсних частинок, самі властивості структури матеріалу, що стабілізувався, тобто будова та геометричні розміри пір і капілярів, залежать від початкового вологовмісту та взаємодії речовини з вологою, в процесі технології виробництва будівельних деталей або виробів.

Отже, особливості взаємодії матеріалів з вологою важливі при експлуатації будь-яких будівельних конструкцій, що стикаються з вологим середовищем, а для гідрофільних матеріалів ці особливості та початковий вологовміст вихідних розчинів впливають на технологію виробництва і визначають рівень структурно-механічних властивостей матеріалу та виробів з нього.

За природою енергії зв'язування вологи з речовиною або матеріалом і величиною енергетичного рівня зв'язку розрізняють такі види вологи:

1. **Волога, хімічно зв'язана**, необхідна для виникнення і завершення хімічних реакцій, утворення нової речовини і формування фізико-механічних властивостей матеріалу у виробі або конс-

трукції.

Ця волога входить до складу структурної ґратки матеріалу у вигляді знов утворених хімічних сполук і кристалогідратів і відрізняється високим енергетичним рівнем іонного і молекулярного зв'язку з речовиною.

Природні коливання температури, що відбуваються протягом року на поверхні огорожувальних конструкцій, не в змозі порушити цей зв'язок і виділити хімічно пов'язану вологу; з фізичних методів впливів вона частково може бути вилучена тільки прожарюванням.

2. Волога фізико-хімічного зв'язку, адсорбована на внутрішній поверхні пор і капілярів сформованої структурної решітки матеріалу.

Адсорбована волога може бути підрозділена на вологу первинних мономолекулярного шарів, що відрізняється високим енергетичним рівнем зв'язку з поверхнею гідрофільних матеріалів, і вологу подальших полімолекулярних шарів, що поступово переходить у плівку об'ємної води, що утримується капілярними силами. Адсорбована волога мономолекулярного і частково полімолекулярних шарів не може бути вилучена шляхом природного сушіння матеріалу огорожувальних конструкцій, оскільки для її відриву від гідрофільних поверхонь необхідна висока температура і мала відносна вологість навколишнього повітряного середовища, які не можуть бути досягнуті в умовах зовнішнього клімату і мікроклімату приміщень з відсутністю великих виділень тепла.

При природних коливаннях температури і вмісту вологи зовнішніх огорожувальних конструкцій, виконаних з гідрофільних матеріалів, частина вологи фізико-хімічного зв'язку може переходити в хімічно пов'язану вологу, результатом чого є підвищення міцності бетону та інших гідрофільних неорганічних матеріалів у перші роки експлуатації будівель.

Для деревини та інших органічних матеріалів рослинного походження характерно, крім адсорбованого, присутність в рослинних клітинах осмотично зв'язаної вологи, яка поступово видаляється в процесі природного сушіння будівельних конструкцій в повітряному середовищі зі змінною температурою і низькою від-

носною вологістю. Наслідком цього є усушка і зміна геометричних розмірів виробів і деталей, що відбувається, наприклад, в перші роки експлуатації будівель для елементів дерев'яних конструкцій, навіть у тому випадку, якщо вони виконані з деревини, яка вважається, у відповідності з будівельними правилами, повітряно-сухою (18-20% за вагою).

3. Волога фізико-механічного зв'язку, що утримується в порах і капілярах силами капілярного тиску і змочування гідрофільних матеріалів.

Ця волога переміщається усередині матеріалу при виникненні тисків, що перевищують капілярний і легко випаровується з поверхневих шарів виробу або конструкції, в процесі природної сушки.

Відносно більшим зв'язком з матеріалом характеризується волога, що заповнює мікрокапіляри і утримується підвищеними силами капілярного тиску. Волога, що міститься в макрокапілярах (за винятком мікрошару у стінок, пов'язаного адсорбційно) наближається за своїм фізичним властивостям до вільній воді, відрізняється досить слабким зв'язком з матеріалом і найбільш легко випаровується з поверхневих шарів виробу.

Під час вилучення з водного середовища великопористого виробу або зразка матеріалу частина води, що заповнює великі пори і що є найбільш вільною, витікає під впливом сили тяжіння; кількість води, що витікає, зростає зі збільшенням гідрофобності матеріалу і числа сполучених великих пір в ньому.

4.3 Сорбційні процеси

Отже, у капілярно-пористих матеріалах (наприклад, цеглині, бетоні, природному камені), що знаходяться в природному повітряному середовищі, завжди міститься деяка кількість вологи.

Постійна вага абсолютно-сухого матеріалу P_c виявиться меншою, ніж для повітряно-сухого P_a . Різниця цих ваг рівна вазі вологи, що міститься в матеріалі; відношення такої різниці до ваги сухого зразка (або, що те ж саме, маси вологи до маси сухого зразка) являє собою **питомий вміст вологи** ω матеріалу

$$\omega = \frac{P_s - P_c}{P_c} = \frac{m_s}{m_c}, \quad (4.1)$$

де m_s , m_c – відповідно маси води і маси сухого матеріалу. Вміст води часто виражають у процентах і називають **ваговою вологістю (відносним вмістом води)** і визначається виразом:

$$\omega = \frac{P_s - P_c}{P_c} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

При тривалому перебуванні зразка матеріалу або будівельного виробу в повітрі з постійними температурою і відносною вологістю, кількість води, що міститься в матеріалі, приходить до сталого (рівноважного) значення. Цей рівноважний вміст води відповідає гігротермічному стану зовнішнього повітряно-вологого середовища і, залежно від властивостей матеріалу (хімічного складу, пористості і т.д.), може бути більшим або меншим.

Якщо температура або вологість навколишнього повітря змінилися, поступово приходить у відповідність з цими змінами і кількість води, що міститься в матеріалі.

Процес зволоження сухого матеріалу, поміщеного в повітряне середовище з постійною відотною вологістю, називається **сорбцією**, а процес зменшення вмісту води – надлишково вологого матеріалу в повітряному середовищі – **десорбцією**.

Закономірність змін рівноважного вологовмісту матеріалу, що знаходиться в повітряному середовищі з постійною температурою, але послідовно зростаючої відотною вологістю, виражається **ізотермою сорбції**.

Послідовні значення рівноважної вологості матеріалу, зростаючі при збільшенні відотної вологості середовища і розташовані на кривій ізотермі сорбції, а також форма цієї кривої залежать від природи та структури матеріалу.

Для капілярно-пористих матеріалів, що добре змочуються водою (такі матеріали в будівництві поширені), характерні S-образні ізотерми, опуклі в області малої відотної вологості повітря і увігнуті при високій вологості (ізотерми I і II на рис. 4.2).

Опукла частина ізотерм Γ вказує на присутність усередині матеріалу тільки адсорбованої води, що складається з одного шару простих або складних молекул водяної пари, міцно пов'язаних

з твердою поверхнею пір і капілярів адсорбційними силами (мономолекулярна адсорбція).

Середня частина ізотерм II, близька до прямої лінії, відповідає утворенню на внутрішній поверхні капілярно-пористого матеріалу плівок адсорбованої води, що складаються з багатьох шарів молекул (полімолекулярна адсорбція).

При подальшому підвищенні вологості повітря плівки води



Рисунок 4.2 — Ізотерми сорбції води для характерних груп будівельних матеріалів: I — матеріали із змочуваною поверхнею пір і капілярів і присутністю осмотично зв'язаної води; II — з проміжними властивостями: I — кількість води, що характеризує вологоємність матеріалу при його зволоженні в межах від початкової (рівноважної) вологості до максимальної сорбційної; III — з незмочуваною (гідрофобною) поверхнею

товстішають і заповнюють найбільш вузькі ділянки тонких капілярів, утворюючи в змочуваних матеріалах меніски з увігнутою поверхнею.

Відповідно до закону Лапласа, утворення таких менісків призводить до зниження над ними насичуючої величини парціального тиску водяної пари p_v на величину, пропорційну капілярному тиску. Це викликає конденсацію води в незаповнених частинах тонких капілярів, що відбувається при відносній вологості навколишнього повітряного середовища, що не досягає повного насичення. Таке явище називається **капілярною конденсацією**. Про-

цес капілярної конденсації виражається правою ділянкою К ізотерм сорбції, увігнутість якої свідчить про більш швидке зростання кількості вологи, що поглинається матеріалом з навколишнього повітря, в порівнянні зі збільшенням вологості самого повітря.

За даними кривим сорбції встановлюють відносну вологоємність (паросмність) матеріалу ξ , що являє собою здатність матеріалу додатково поглинати деяку кількість сорбційної вологи при підвищенні відносної вологості повітря до граничного стану ($\varphi = 100\%$).

Відносну вологоємність матеріалу ξ знаходять відношенням різниці граничного та початкового значень сорбційної вологості матеріалу $\omega_{100} - \omega_{поч}$ до різниці відповідних значень відносної вологості повітря $\varphi_{100} - \varphi_{поч}$.

$$\xi = \frac{\omega_{100} - \omega_{поч}}{\varphi_{100} - \varphi_{поч}} \cdot 1000 \text{ г/кг} . \quad (4.3)$$

Так, наприклад, відносна вологоємність матеріалу при його зволоженні від 60% до 100% по ізотермі сорбції (рис. 12) буде:

$$\xi = \frac{\omega_{100} - \omega_{60}}{100 - 60} \cdot 1000 \text{ г/кг} . \quad (4.4)$$

При такому зволоженні змочуваного матеріалу до верхньої межі сорбційної вологості значна кількість вологи є рідкою, оскільки усередині більшості матеріалів при вологості більше 80% відбувається капілярна конденсація.

Якщо в проектуваній конструкції бажано виключити цей процес, що впливає на скорочення термінів служби конструкції, слідє при розрахунках вологісного стану, описаних нижче, враховувати допустиме накопичення вологи тільки в межах до 80%, що характеризується «відотною пароемністю»:

$$\xi' = \frac{\omega_{100} - \omega_{80}}{100 - 80} \cdot 1000 \text{ г/кг} . \quad (4.5)$$

Властивість пароемності важлива для оцінки вологісного стану огорож, що не піддаються безпосередньому зволоженню рідкою вологою.

Внаслідок різниці парціальних тисків повітряних середовищ, які розділені захисною конструкцією, виникає дифузія водяної

пари із середовища з більшим парціальним тиском в середовище з меншим.

Взямку в захисних конструкціях здійснюються, з одного боку, фільтрація повітря із зовнішнього середовища у внутрішнє, а з іншого – дифузія водяної пари в протилежному напрямку – із приміщення назовні (із середовища більш теплого, яке має більшу вологомісткість в середовище більш холоднє).

Дифузію водяної пари через шар матеріалу іноді називають **паропроникненням** матеріалу, яке характеризується коефіцієнтом паропроникності μ . Коефіцієнт паропроникності μ вказує кількість пари (мг), яка дифундує за 1 годину через 1 м² плоского шару, який має товщину 1 м при різниці парціальних тисків водяної пари на поверхнях шару, яка дорівнює 1 Па, [мг/(м·год·Па)] (Додаток Л [16]).

В конструкціях, виконаних з щільних матеріалів, процеси дифузії водяної пари протікають повільно. Якщо постійний потік тепла в таких огорожувальних конструкціях встановлюється протягом декількох діб або навіть годин після того, як температури внутрішнього і зовнішнього повітря стабілізувалися, то постійний потік водяної пари в полегшених конструкціях може встановитися тільки протягом декількох тижнів, а в більш масивних конструкціях, виконаних з щільних матеріалів, – кількох місяців після стабілізації величин парціального тиску водяної пари у внутрішньому і зовнішньому повітрі. Так як у реальних умовах за цей період часу значення тисків водяної пари істотно змінюються, дифузія в порівняно масивних огороженнях опалюваних будинків так і не набуває усталеного характеру. Тому розрахунки дифузії і конденсації водяної пари усередині масивних однорідних огорожень, що проводяться методами, справедливими для усталеного потоку водяної пари, носять дещо умовний характер, який з'ясовує максимально можливий вологісний стан матеріалів конструкції.

У багатошарових конструкціях подібними розрахунками легко встановити найбільш-доцільне (з точки зору запобігання конденсації вологи) розташування конструктивних шарів з різним ступенем проникності.

При встановленому потоці водяної пари, яка дифундує через захисну конструкцію, опір паропроникненню шару огорожувальної конструкції розраховується за формулою

$$R_v = \frac{\delta}{\mu}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}}{\text{мг}} \right] \quad (4.6)$$

де δ – товщина шару.

Опір паропроникненню огорожувальної конструкції

$$R_{v\text{сш}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\mu_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (4.7)$$

де n – загальна кількість шарів у конструкції; δ_i – товщина i -го шару, м; μ_i – паропроникність матеріалу i -го шару, мг/(м·год·Па), що визначається за таблицею Л [16].

Якщо переріз захисної конструкції x , де ми проводимо тепло-технічні розрахунки, проходить не між структурними шарами, а перетинає шар конструкції, опір паропроникненню рівний

$$R_{v_x} = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\mu_i} + \frac{x - \sum_{i=1}^m \delta_i}{\mu_{m+1}}, \quad (4.8)$$

де m – кількість повних шарів від внутрішньої поверхні до перерізу x ; μ_{m+1} – паропроникність матеріалу шару, мг/(м·год·Па), де розташований переріз x .

4.4 Графо-аналітичний метод розрахунку вологісного стану конструкції при усталеному потоці водяного пару

1. На розрізі огорожувальної конструкції (наприклад, залізобетонної панелі, утепленої пінобетоном, рис. 4.3) будується лінія розподілу температур всередині конструкції; при цьому температура зовнішнього повітря (у тому випадку, якщо визначається зимове накопичення вологи, що конденсується усередині конструкції) приймається рівною середній температурі найбільш холодного місяця згідно з СНиП 2.01.01. Для побудови лінії розподілу температур користуються відповідною формулою для стаціонарної теплопередачі (2.16).

2. На тому ж кресленні будується лінія парціальних тисків насиченої водяної пари $E(x)$, відповідна побудованому розподілу температур у товщі конструкції. Тобто, парціальний тиск насиченої водяної пари $E(x)$ визначається згідно з довідковими да-

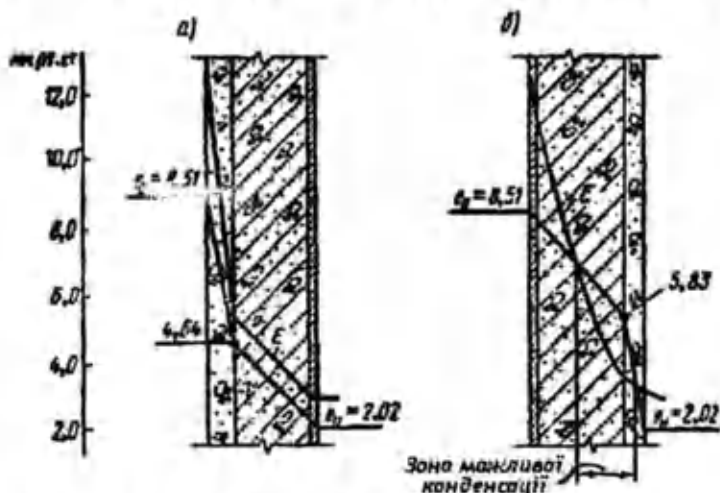


Рисунок 4.3 – Схеми вологісного стану стін з різним розташуванням шарів при усталеному потоці дифузії водяної пари:

а – у стінах із щільним конструктивним шаром, що межують з опалювальним приміщенням, конденсація пари відсутня;

б – у стінах з пористого, захищеного фактурою матеріалу і зовнішнього щільного конструктивного шару, можлива конденсація пари

ними залежності $E(t)$ по розподілу температури в товщі конструкції $t(x)$.

3. Будується лінія падіння дійсних величин парціальних тисків водяної пари e в товщі огорожувальної конструкції.

Якщо лінія e лежить нижче лінії тисків насиченої пари E , то конденсація водяної пари в товщі конструкції не відбувається; перетин ж цих ліній буде вказувати на можливість такої конденсації.

Нахил лінії падіння дійсних тисків водяної пари залежить від величини опору паропроникненню окремих конструктивних шарів. Парціальний тиск водяної пари в товщі шару матеріалу в пере-

різі x визначається за формулою

$$e(x) = e_s - \frac{e_s - e_z}{R_{ex}} R_{ex}, \quad (4.9)$$

де e_s – парціальний тиск водяної пари внутрішнього повітря, Па, що визначається за розрахунковим значенням відносної вологості φ_s , % залежно від призначення будинку згідно з додатком Г [16] і значенням парціального тиску насиченої водяної пари E_s , що залежить від температури, за формулою

$$\varphi_s = \frac{e_s}{E_s} \cdot 100\%, \quad e_s = 0.01 \varphi_s E_s. \quad (4.10)$$

e_z – парціальний тиск водяної пари зовнішнього повітря, що визначається за СНиП 2.01.01 для періоду найбільш холодного місяця року, Па; R_{ex} – опір паропроникненню огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па} / \text{мг}$; R_{ez} – опір паропроникненню огорожувальної конструкції на відстані x від внутрішньої поверхні.

4.5 Нормативні вимоги до вологісного режиму огорожувальних конструкцій

Для зовнішніх огорожувальних конструкцій опалюваних будинків обов'язкове виконання умови:

$$\Delta\omega \leq \Delta\omega_a, \quad (4.11)$$

де $\Delta\omega$ – збільшення вологості матеріалу у товщі шару конструкції, в якому може відбуватися конденсація вологи, за холодний період року, % за масою; $\Delta\omega_a$ – допустиме за теплоізоляційними характеристиками збільшення вологості матеріалу, що встановлюється згідно з таблицею 8 [16] залежно від виду матеріалу.

У разі, якщо $e(x) < E(x)$ для будь-якого $x \in [0, \delta]$, умова за формулою (4.11) вважається виконаною.

У разі, якщо $e(x) = E(x)$ у будь-якому з перерізів огорожувальної конструкції, проводиться розрахунок приросту вологи у шарі матеріалу $\Delta\omega$, у якому відбувається конденсація вологи (у разі розташування зони конденсації на межі шарів приріст розраховується для шару, прилеглого до зони конденсації з боку

внутрішньої поверхні), за формулою

$$\Delta \omega = \frac{P}{\delta_s \rho_s} \cdot 100\%, \quad (4.12)$$

де P – кількість води, що конденсується у товщі огорожувальної конструкції за період накопичення води в конструкції, кг/м^2 , що розраховується за формулою

$$P = \left(\frac{e_a - e_s}{R_{ex}} - \frac{e_s - e_z}{R_{sz} - R_{ex}} \right) Z \cdot 10^{-6}, \quad (4.13)$$

де e_s – парціальний тиск водяної пари, Па, у зоні конденсації, що визначається за формулою (4.9); R_{ex} – опір паропроникненню частини огорожувальної конструкції від внутрішньої поверхні до зони початку конденсації, що визначається за формулою (4.8); R_{sz} – опір паропроникненню огорожувальної конструкції згідно (4.7); Z – період накопичення води в конструкції, год, що дорівнює періоду із середньодобовими температурами зовнішнього повітря менше ніж 8°C за СНиП 2.01.01; δ_s – товщина шару матеріалу, у якому відбувається накопичення води, що конденсується (від зони конденсації до внутрішньої поверхні шару); ρ_s – густина шару матеріалу, в якому відбувається конденсація води, кг/м^3 , що визначається згідно з таблицею Л.1 [16].

Контрольні запитання

1. Перерахуйте види води.
2. Дайте пояснення терміну "повітряно-сухий стан речовини".
3. Що є "характерним розміром огорожі"?
4. Поясніть терміни "гідрофільні" та "гідрофобні" матеріали.
5. Перерахуйте види води в залежності від природи енергії зв'язування води з речовиною або матеріалом і величиною енергетичного рівня зв'язку.
6. Поясніть терміни "сорбція", "десорбція", "ізотерма сорбції".
7. Поясніть зміст терміну "коефіцієнт паропроникності".
8. Поясніть графо-аналітичний метод розрахунку вологісного стану конструкції при усталеному потоці водяного пару.
9. Наведіть нормативні вимоги до вологісного режиму огорожувальних конструкцій.

Розділ 5. АРХІТЕКТУРНА АКУСТИКА

Вступ

З точки зору будівельної фізики розділ «Акустика» може бути розділений на два підрозділи – акустика приміщень і звукоізоляція.

Акустика приміщень розглядає проблеми поширення звуку усередині приміщення для досягнення сприятливого «акустичного клімату».

Інша згадана область стосується впливу і поширення звуку від одного приміщення до іншого, а також від однієї зони до іншої. При цьому мова йде як про конструктивну звукоізоляцію, так і про звукоізоляцію у вільному просторі перед будівлею, причому останню слід розглядати остільки, оскільки вона може впливати на конструктивну звукоізоляцію.

Конструктивні заходи щодо звукоізоляції включають планувальні рішення по розміщенню (з урахуванням їх впливу на акустику) технічних приладів та обладнання, розгляд елементів, що поділяють приміщення з урахуванням їх звукоізолюючих властивостей, а також дверей, вікон і конструктивних отворів.

5.1 Хвильова природа звуку

Відчуття звуку виникає завдяки тому, що коливається вушна перетинка. Ці рухи викликаються молекулами повітря, які коливаються в безпосередній близькості від перетинки. В якості збудника (джерела звуку) служать частинки і об'єми газу, що коливаються або швидко рухаються. Відбувається просторове перенесення цього руху, під час якого сусідні молекули під ударами інших молекул залучаються до аналогічних коливань (рис. 5.1).

Хвиля – зміна стану середовища (збурення), яке поширюється в цьому середовищі й переносить з собою енергію. Іншими словами, **хвиля** – це явище розповсюдження в просторі з плином часу збурення фізичної величини. Перенесення енергії – принципова відмінність хвиль від коливань, в яких відбуваються лише «місцеві» перетворення енергії. Хвилі ж, як правило, здатні віддалятися на значні відстані від місця свого виникнення (з цієї причини хвилі іноді називають «коливанням, що відірвалися від ви-

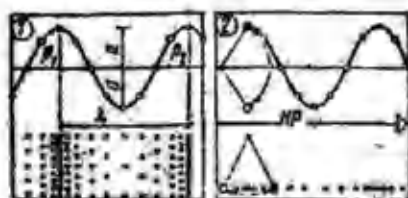


Рисунок 5.1 – Хвильовий рух.

Розподіл молекул (1) залежить від довжини хвилі λ і амплітуди a ; p_1 , p_2 – точки з однаковою фазою. При поперечній хвилі (2, зверху) частинки коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі; при повздовжній хвилі – вздовж напрямку поширення.

проміньовача»).

В основному хвилі не переносять матерію, але можливий варіант, коли відбувається хвильове перенесення саме матерії, а не тільки енергії. Це властивість матеріального випромінювання, що має хвильові зміни кількості випромінюваної матерії. Такі хвилі здатні розповсюджуватися крізь абсолютну порожнечу.

Більшість хвиль за своєю природою є не новими фізичними явищами, а лише умовною назвою для певного виду колективного руху. Так, якщо в об'ємі газу виникла звукова хвиля, то це не означає, що в цьому об'ємі з'явилися якісь нові фізичні об'єкти. **Звук** – це лише назва для особливого скоординованого типу руху тих же самих молекул. Тобто більшість хвиль – це коливання деякого середовища. Поза цим середовищем хвилі даного типу не існують (наприклад, звук у вакуумі).

Звук поширюється у вигляді змінного збурення пружного середовища, тобто у вигляді звукових хвиль. **Звуковими коливаннями** називають коливальні рухи частинок середовища під дією цього збурення. Простір, в якому відбувається поширення цих хвиль, називають **звуковим полем**. Якщо джерело збурення відоме, то простір, в якому можуть бути виявлені звукові коливання, що створюються цим джерелом, називають **звуковим полем**.

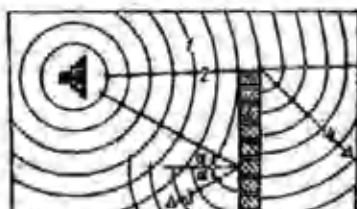


Рисунок 5.2 – Поширення звуку.

- 1 – хвильовий фронт;
- 2 – хвильовий промінь;
- 3 – хвильовий промінь відбитої звукової хвилі;
- 4 – хвильовий промінь звукової хвилі при огинанні перешкоди.

даного джерела звуку. Звукові коливання є окремим випадком механічних коливань.

Звукові коливання в рідких і газоподібних середовищах є **поздовжніми коливаннями**, тобто частинки середовища коливаються вздовж лінії поширення хвилі. У твердих середовищах, крім поздовжніх коливань, мають місце і **поперечні коливання** і хвилі, тобто такі, в яких частки середовища коливаються в напрямку, перпендикулярному лінії поширення хвилі.

Напрямок поширення звукових хвиль називають **звуковим променем**, а поверхня, що сполучає всі суміжні точки поля з однакою фазою⁹ коливання частинок середовища, називають **фронтом хвилі** (рис. 5.2). Фронт хвилі перпендикулярний звуковому променю. У загальному випадку фронт хвилі має складну форму, але в практичних випадках обмежуються розглядом трьох видів фронту хвилі: плоскої, сферичної та циліндричної.

Відстань між двома однаковими фазами, або відстань, яку точка із сталою фазою проходить за час, що дорівнює періоду коливань T , називають **довжиною хвилі** λ . Довжина хвилі залежить від періоду коливань T і від величини, оберненої до періоду коливань, — кількості коливань за одиницю часу (за 1 секунду) — **частоти** $f = 1/T$ цього руху.

Пружні коливання у повітрі і інших середовищах характеризуються великим діапазоном частот і довжин хвиль. До власне звукових коливань відносяться коливання в діапазоні частот від 16 Гц до 20 кГц. Ці частоти лежать у межах зони чутності людського вуха. Звук нижче діапазону чутності людини називають інфразвуком, вище, до 1 ГГц, — ультразвуком, від 1 ГГц — гіперзвуком. Серед звуків слід також особливо виділити фонетичні, мовні звуки і фонему, з яких складається усна мова, і музичні звуки, з яких складається музика.

⁹ Фаза коливання — це фізична величина, що визначає стан коливної системи в будь-який момент часу. Якщо коливання описуються синусоїдальним законом $A \sin(\omega t + \varphi_0)$, то фаза коливання визначається як аргумент періодичної функції, що описує гармонічний коливний процес: $\varphi = \omega t + \varphi_0$, де ω — кутова частота, t — час, φ_0 — початкова фаза коливань, тобто фаза коливань в початковий момент часу $t = 0$.

Довжина звукової хвилі вимірюється в м, період в с, частота – в Гц = с⁻¹. 1 Гц відповідає частоті в одне коливання за 1 с. Залежність між названими вище величинами може бути представлена наступним чином:

$$\lambda = cT = c / f, \quad (5.1)$$

Чим вище частота, тим менше довжина хвилі, яка, у свою чергу, залежить ще і від швидкості поширення звуку c . Швидкість поширення звуку залежить від середовища, що передає звук і у різних середовищах і тілах різна. У газоподібних середовищах швидкість звуку залежить від густини середовища ρ і статичного атмосферного тиску p_{cm} :

$$c = \sqrt{\gamma p_{cm} / \rho},$$

де γ – показник адиабати, $\gamma = C_p / C_v$, C_p і C_v – теплоємності середовища при сталому тиску і сталому об'ємі. Для газів це відношення складає від 1,67 (для аргону) до 1,28 (для метану). Для повітря воно рівне 1,402 при температурі 15°C та нормальному атмосферному тиску 101 325 Па. У рідких і твердих матеріалах швидкість звуку визначається густиною матеріалу ρ і модулем пружності E для відповідного виду деформації (поздовжні коливання, крутильні, деформації на згин та ін): $c = \sqrt{E / \rho}$.

Таблиця 5.1 – Швидкість звуку та питомий акустичний опір для газів та рідин

Середовище	Температура, °C	Густина ρ , кг/м ³	Швидкість звуку c , м/с	Питомий акустичний опір ρc , кг/(м ² ·с)
Водяна пара	100	0,58	405	230
Повітря	0	1,29	331	428
Повітря	20	1,20	343	413
Гелій	0	0,18	970	172
Вода прісна	15	999	1430	1430
Вода солонa 3,5%-ва	15	1027	1500	1550

У табл. 5.1 наведені значення швидкості звуку в деяких газо-подібних і рідких середовищах, а в табл. 5.2 — у твердих середовищах і тілах, в останніх — для випадку повздовжніх коливань у стрижнях. На рис. 5.3 наведена залежність швидкості звуку c , гу-

Таблиця 5.2 – Швидкість звуку та питомий акустичний опір для твердих тіл і матеріалів

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Швидкість звуку, м/с		Питомий акустичний опір ρc , кг/(м ² ·с) $\times 10^6$	
		В необмеженому середовищі	Повздовжня в стрижні	В необмеженому середовищі	Для повздовжніх коливань в стрижні
Залізо	7800	5850	5170	45,6	40,4
Дуб	700	4170*	1520**	2,92*	1,06**
Сосна	500	5030*	1450**	2,77*	0,8**
Лід	916	—	3200	—	2,93
Корок	240	—	500	—	0,12
Каучук натуральний	950	—	30	—	0,028
Мармур	2600	—	3810	—	9,9
Граніт	2700	—	3950	—	10,7
Плестіглас	1180	—	2820	—	3,3
Скло	3250	5660	5300	18,5	17,3

* – вздовж волокна; ** – вздовж радіуса.

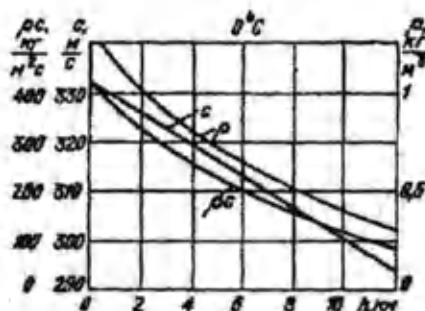


Рисунок 5.3

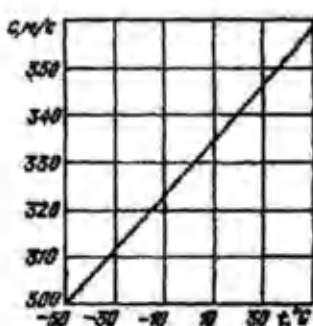


Рисунок 5.4

стщин повітря ρ і питомого акустичного опору ρc від висоти над рівнем моря для температури 0°C (на землі), а на рис. 5.4 – залежність швидкості звуку в повітрі від температури для нормально-го атмосферного тиску $101\,325\text{ Па}$. На висоті 10 км швидкість звуку становить 90% від швидкості на рівні моря (див. рис. 5.3). При зміні температури на 50°C швидкість звуку змінюється на 10% (див. рис. 5.4). Для температури повітря $15\dots 20^\circ\text{C}$ і нормальному атмосферному тиску $c = 340\dots 343\text{ м/с}$.

5.2 Лінійні характеристики звукового поля

До лінійних характеристик звукового поля в рідинах і газах відносять звуковий тиск, зміщення частинок середовища, швидкість коливань і акустичний опір середовища.

Звукові хвилі, як зазначалося, є коливальним процесом. Усяке коливання пов'язане з порушенням рівноважного стану системи і виражається у відхиленні її характеристик від рівноважних значень. Для звукових коливань такою характеристикою є тиск в точці середовища, а її відхилення – звуковим тиском.

Якщо зробити різкий зсув частинок пружного середовища в одному місці, наприклад, за допомогою поршня, то в цьому місці збільшиться тиск. Завдяки пружним зв'язкам частинок тиск передається на сусідні частинки, які, у свою чергу, впливають на наступні, і область підвищеного тиску як би переміщається в пружному середовищі. За областю підвищеного тиску, слідує область зниженого тиску, і, таким чином, утворюється ряд областей стиснення і розрідження, що чергуються і які розповсюджуються в середовищі у вигляді хвилі. Кожна частинка пружного середовища в цьому випадку буде здійснювати коливальні рухи.

Звуковим тиском у газах і рідинах називають різницю між миттєвим значенням тиску $p_{ам}$ в точці середовища при проходженні через неї звукової хвилі і статичним тиском $p_{ат}$ (тобто тиском за умов відсутності звуку) у тій самій точці, тобто

$$p = p_{ам} - p_{ат}$$

Звуковий тиск – величина знакозмінна: у моменти згущення (ущільнення) частинок середовища вона позитивна, в моменти розрідження (розширення) середовища – негативна. Цю величину

оцінюють за амплітудою або за ефективним значенням. Для синусоїдальних коливань ефективне значення складає $1/\sqrt{2} \approx 0.701$ амплітудного $p_e = p_A / \sqrt{2}$.

Звуковий тиск являє собою силу, що діє на одиницю поверхні. У системі СІ його вимірюють у ньютонках на квадратний метр (Н/м^2). Ця одиниця називається Паскалем і позначається Па.

Зміщенням називають відхилення частинок середовища від її статичного положення під дією звукової хвилі. Якщо відхилення відбувається за напрямком руху хвилі, то зміщенню приписують позитивний знак, а при протилежному напрямку – негативний знак. Зсув вимірюють у метрах у системі СІ.

Швидкістю коливань називають швидкість руху частинок середовища під дією звукової хвилі: $v = du / dt$, де u – зміщення частинок середовища; t – час.

При русі частинки середовища у напрямку поширення хвилі швидкість коливань вважається позитивною, а у зворотному напрямку – негативною. Зауважимо, що цю швидкість не можна плутати зі швидкістю руху хвилі, яка постійна для даного середовища та умов поширення хвилі.

Швидкість коливань вимірюють у метрах за секунду (м/с).

Властивість середовища проводити акустичну енергію характеризується **акустичним опором**. Акустичний опір середовища виражається відношенням звукової густини до об'ємної швидкості хвиль. Питомий акустичне опір середовища встановлюється відношенням амплітуди звукового тиску p_A в середовищі до амплітуди швидкості коливань частинок v_A :

$$\delta_e = p_A / v_A.$$

Чим більший акустичне опір, тим вище ступінь стиснення і розрідження середовища при даній амплітуді коливання частинок середовища.

Це справедливо для лінійних умов, зокрема коли звуковий тиск значно менше статичного. Питомий акустичний опір визначається властивостями середовища або матеріалу та умовами розповсюдження хвиль. У табл. 5.1 і 5.2 наведені значення питомого опору для ряду середовищ і умов, а на рис. 5.3 наведена залежність питомого опору від висоти над рівнем моря. Розмірність

питомого акустичного опору в системі СІ Па·с/м (або кг/(м²·с)).

Чисельно, питомий акустичний опір середовища (δ_c) знаходиться як добуток густини середовища (ρ) на швидкість (c) розповсюдження в ньому хвилі:

$$\delta_c = \rho c.$$

5.3 Енергетичні характеристики звукового поля

Причиною виникнення звукової хвилі є частинки матерії, що коливаються. При русі частинок їх внутрішня енергія передається іншим частинкам і розповсюджується в просторі завдяки звуковій хвилі. Показником звукової енергії служить відхилення окремої частинки, що коливається, від свого положення спокою, тобто амплітуда A (м) коливання або звукової хвилі. При однаковій тривалості коливання з більшою амплітудою володіє більшою енергією, ніж коливання з меншою амплітудою. Частинки рухаються при цьому з різними коливними швидкостями v навколо свого положення спокою. Коливна швидкість v , які, повторимо, не слід плутати з постійною швидкістю поширення звуку c , характеризує величину енергії, що міститься в звуковій хвилі. Вона може бути розрахована таким чином:

$$v = 2\pi \cdot f \cdot A.$$

Між швидкістю і звуковим тиском існує пряма розрахункова і фізична залежність.

Швидкість частинок, що коливаються, є найбільшою, коли вони проходять своє положення спокою, в якому тиск рівний нулю. Навпаки, в точках повороту, в яких тиск найбільший, коливальна швидкість рівна нулю. Тому фази швидкості і тиску зміщені одна щодо іншої на 1/4 періоду (рис. 5.5). Отже, точкам максимуму швидкостей або мінімуму тиску відповідають нульові значення іншого параметра.

Енергія звукового поля є функцією звукового тиску p і коливальної швидкості v . Енергетичною величиною, яку застосовують для характеристики звукового поля, є **інтенсивність звуку I** , під якою розуміють середній потік звукової енергії, що переноситься звуковою хвилею за одну секунду через одиничну площадку, нормальну до напрямку поширення звуку. Інтенсивність вимірю-

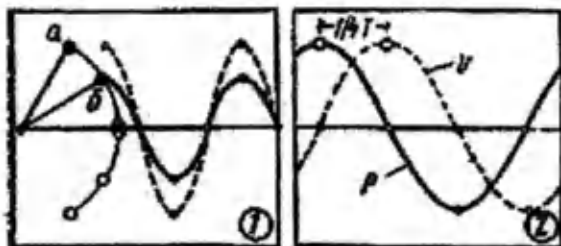


Рисунок 5.5 – Тиск та швидкість звуку. Частинка *a* проходить за той самий час більший шлях ніж частинка *b*; швидкість її коливань більша (1). Крива швидкості *v* (2) зсунута по відношенню до кривої звукового тиску *p* на $\frac{1}{4}$ періоду

ється в Вт/м^2 .

У відповідності з визначенням

$$I = \frac{W_{\text{ак}}}{S_{\text{фр}}},$$

де $W_{\text{ак}}$ – акустична потужність джерела звуку, $S_{\text{фр}}$ – площа фронту хвилі.

Для періодичних процесів

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot v \cdot dt,$$

де p і v – миттєві значення звукового тиску і швидкості коливань.

Для синусоїдальних коливань інтенсивність звуку пов'язана із звуковим тиском і швидкістю коливань співвідношенням

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c},$$

де ρ – густина середовища, c – швидкість поширення хвилі, p_e – ефективне значення звукового тиску.

Густиною звукової енергії ϵ характеризується звуковою енергією в одиниці об'єму; одиниця вимірювання – Дж/м^3 . Густина енергії ϵ пов'язана з інтенсивністю звуку I та швидкістю звуку c співвідношенням

$$\epsilon = \frac{I}{c}.$$

Густина звукової енергії – величина скалярна, важлива характеристика енергії звукового поля у випадках, коли напрям звуко-

вих хвиль є невизначеним. Таке положення спостерігається, наприклад, в деяких закритих приміщеннях.

Джерела звуку характеризуються звуковою потужністю і напрямленістю випромінювання. Звуковою потужністю джерела P називають загальну кількість звукової енергії, що випромінюється джерелом звуку в навколишній простір за одиницю часу; одиниця вимірювання – Вт.

Звукова потужність у вільному звуковому полі визначається інтегруванням інтенсивності звуку за всіма напрямками від джерела, тобто

$$P = \int I_n ds,$$

де I_n – інтенсивність потоку звукової енергії в напрямку, перпендикулярному до елемента поверхні ds .

Часто джерела випромінюють звук нерівномірно за різними напрямками; така нерівномірність випромінювання характеризується коефіцієнтом Φ – **фактором напрямленості**. Він являє собою відношення інтенсивності звуку I , що створюється джерелом в даній точці звукового поля, до інтенсивності $I_{\text{сф}}$, яку мало би джерело з тією самою потужністю, але рівномірно випромінююче звук у різних напрямках (в сферу), тобто

$$\Phi = I / I_{\text{сф}} = p^2 / p_{\text{сф}}^2.$$

5.4 Акустичні рівні

Сила звуків, що сприймаються нормальним людським вухом, міняється в дуже широких межах: в області середніх частот (1000 - 4000 Гц) сила нормально чутного звуку варіює від 10^{-12} Вт/м² поблизу порогу слухового сприйняття до $10^0 = 1$ Вт/м² біля болювого порогу, на якому нормальне слухове відчуття переходить в болюве подразнення органу слуху. Таким чином сила чутних звуків лежить в межах, що відносяться один до одного, як 12:1; це – так званий динамічний діапазон слухового сприйняття.

У менш широких, але теж в значних межах, варіюється і частота чутних звуків: від 15-20 Гц по нижній межі частотного діапазону до 16 000-20 000 Гц на верхній його межі.

Звукові тиски, що сприймаються людиною лежать в межах $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м² (ледь сприймаються) до 20 Н/м² (викликає відчуття бо-

лю).

Дуже істотна та обставина, що людське вухо володіє властивістю однаково реагувати на однакові відносні зміни як частоти, так і сили звуку. Завдяки цьому для вимірювання частот і сил звуку на практиці дуже зручно користуватися логарифмічними одиницями.

Однакові відносні зміни частоти визначають так звані **інтервали**; основним інтервалом є **октава**, що відповідає відношенню частот 2:1. Інтервал між двома тонами з частотами f_1 і f_2 , виражений в октавах, може бути визначений за формулою

$$n = \log_2 \frac{f_2}{f_1} = \frac{\lg(f_2 / f_1)}{\lg 2} \approx 3,32 \lg \frac{f_2}{f_1}.$$

Однакові відносні зміни сили звуку визначають так звані **різниці рівнів**; за основну різницю – бел – приймають різницю рівнів, що відповідає відношенню сил звуку 10:1. Різниця рівнів двох тонів з силами I_2 і I_1 , виражена в белах визначається за формулою

$$N = \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

На практиці виявляється більш зручним покласти в основу різницю рівнів в 10 разів меншу – децибел (дБ); різниця рівнів в децибелах рівна

$$N = 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

Зрозуміло, що логарифмічні одиниці сили звуку – бел і децибел – визначають тільки відношення, але не абсолютне значення величин. Тому для визначеності логарифмічної шкали потрібно умовитися щодо «нульового» рівня, тобто початкової точки шкали, від якої ведеться відлік децибелів.

За умовне (нормоване) значення нульового рівня інтенсивності звуку прийнята інтенсивність $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$. Абсолютний рівень інтенсивності в децибелах

$$L_I = 10 \lg(I / I_0) = 10 \lg(I_{\text{зм}} / 10^{-12}) = 10 \lg(I_{\text{зм}}) + 120,$$

де $I_{\text{зм}}$ – рівень інтенсивності, Вт/м^2 .

В якості базисної величини для рівня звукового тиску взято

тиск $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$

$$L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{\frac{p^2}{\rho c}}{\frac{p_0^2}{\rho c}} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}.$$

За умовне значення нульового рівня за густиною енергії взято $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^{-15} \text{ Дж/м}^3$.

Приклад. Інтенсивність звуку рівна $2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$. Знайти рівень інтенсивності:

$$L_I = 10 \lg(2 \cdot 10^{-4} / 10^{-12}) = 10 \lg(2 \cdot 10^8) \approx 85 \text{ дБ}.$$

Приклад. Звуковий тиск складає $0,1 \text{ Па}$. Знайти рівень звукового тиску:

$$L_p = 20 \lg(0,1 / 2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg(5 \cdot 10^3) \approx 74 \text{ дБ}.$$

Приклад. Рівень інтенсивності рівний 120 дБ . Знайти інтенсивність і звуковий тиск:

$$I = I_0 \cdot 10^{L_I/10} = 10^{-12} \cdot 10^{120/10} = 1 \text{ Вт/м}^2;$$

$$p = p_0 \cdot 10^{L_p/20} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{120/20} = 20 \text{ Па}.$$

5.5 Інтерференція хвиль

При одночасному русі в просторі декількох звукових хвиль у певній точці середовища може відбуватися суперпозиція цих хвиль. Таке накладення хвиль одну на одну носить загальну назву **інтерференції**. Якщо в процесі руху звукові хвилі перетинаються, то в певній точці середовища спостерігається посилення або послаблення коливань. Результат інтерференції залежатиме від просторового співвідношення фаз звукових коливань в даній точці середовища. Якщо звукові хвилі досягають певної ділянки середовища в однакових фазах (синфазно), то зміщення частинок мають однакові знаки і інтерференція в таких умовах сприяє збільшенню амплітуди коливань. Якщо ж хвилі приходять до конкретної ділянки в протифазі, то зсув частинок супроводжуватиметься різними знаками, що призводить до зменшення амплітуди коливань.

Найпростіший випадок інтерференції – додавання двох хвиль

однакової частоти при збігу напрямку коливань у хвилях. У цьому випадку, якщо коливання відбуваються за синусоїдальним (гармонійним) законом, амплітуда (за звуковим тиском) результуючої хвилі в будь-якій точці простору

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos \varphi},$$

де p_1 і p_2 – амплітуди хвиль, а φ – різниця фаз між ними у розглянутій точці. Для когерентних хвиль різниця фаз φ залишається незмінною в даній точці, але може змінюватися від точки до точки і в просторі виходить розподіл амплітуд результуючої хвилі максимумами й мінімумами, що чергуються. Якщо амплітуди хвиль однакові: $p_1 = p_2$, то максимальна амплітуда дорівнює по-

двоєній амплітуді кожної хвилі, а мінімальна – дорівнює нулю.

Найбільший інтерес має випадок, коли дві звукові хвилі з однаковими амплітудами розповсюджуються в протилежних напрямках, тобто утворюється стояча хвиля з пучностями і вузлами. Відстані між сусідніми вузлами, як і відстані між сусідніми пучностями, рівні половині довжини хвилі (рис 5.6), а між пучністю і сусіднім вузлом – чверті хвилі. В пучності тиску амплітуда звукового тиску рівна подвоєній амплітуді біжучої хвилі, у вузлі амплітуда рівна нулю. Пучності тиску і пучності швидкості коливань не співпадають одна з одною, а знаходяться на відстані чверті довжини хвилі (рис. 5.6, а і б). Так само в пучності швидкості коливань амплітуда її виходить подвоєною.

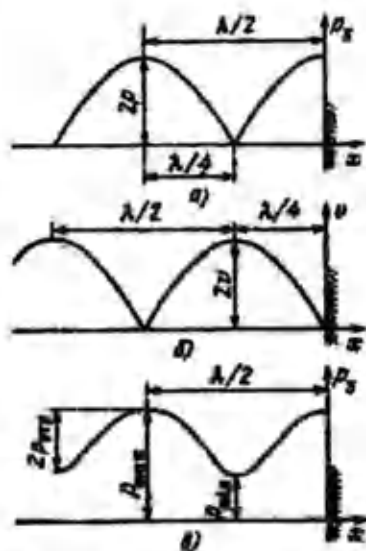


Рисунок 5.6 – Розподіл амплітуд звукового тиску і швидкості коливань підчас інтерференції: а – для однакових амплітуд звукового тиску; б – для швидкості коливань; в – для неоднакових амплітуд звукового тиску

У стоячих хвилях потік енергії рівний нулю, тому їх характеризують або густиною енергії, або квадратом звукового тиску. При неоднакових амплітудах прямої і зворотної хвиль стояча хвиля утворюється із зворотної хвилі і частини прямої, за амплітудою рівній амплітуді зворотної хвилі. Решта прямої хвилі утворює біжучу хвилю (рис. 5.6, в). Амплітуда її за звуковим тиском

$$P_{\text{біж}} = P_{\text{пр}} - P_{\text{об}}.$$

В пучності такої комбінації хвилі амплітуди обох хвиль додаються $P_{\text{макс}} = P_{\text{пр}} + P_{\text{об}}$ у вузлі – віднімаються $P_{\text{мін}} = P_{\text{пр}} - P_{\text{об}}$. Якщо відомі значення амплітуд тисків в пучності та вузлі, то

$$\frac{P_{\text{об}}}{P_{\text{пр}}} = \frac{(P_{\text{макс}} - P_{\text{мін}})}{(P_{\text{макс}} + P_{\text{мін}})} = \frac{1 - \delta}{1 + \delta},$$

а $P_{\text{мін}} / P_{\text{макс}} = \delta$, де δ – коефіцієнт біжучої хвилі. В цьому випадку потік енергії створюється лише біжучою хвилею, Густина енергії складається з двох складових – густини біжучої хвилі і густини стоячої хвилі

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{біж}} + \varepsilon_{\text{ст}}.$$

5.6 Відбивання звуку

Якщо звукова хвиля зустрічає на своєму шляху перешкоду чи інше середовище з іншими параметрами, то відбувається **відбивання звукової хвилі**. Закони відбивання звукових хвиль аналогічні законам відбиття світлових хвиль: кут падіння φ_1 дорівнює

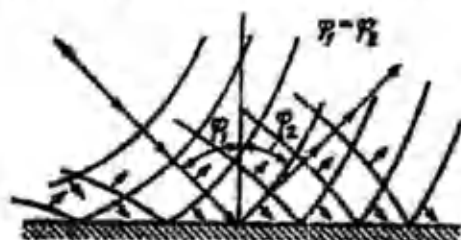


Рисунок 5.7 – Відбивання хвилі

куту відбиття φ_2 (рис.5.7).

Ефективність відбивання характеризує коефіцієнтом відбивання, тобто відношення інтенсивності відбитої звукової хвилі до інтенсивності падаючої

$$\alpha_{\text{від}} = I_{\text{від}} / I_{\text{пад}}.$$

Ефективність відбивання залежить від ступеня відмінності акустичних опорів обох середовищ: якщо падаюча хвиля має звуковий тиск $P_{\text{пад}}$, то звуковий тиск в відбитій хвилі

$$p_{\text{від}} = \frac{\delta_{\text{над}} - \delta_{\text{від}}}{\delta_{\text{над}} + \delta_{\text{від}}} p_{\text{над}} = \beta \exp(i\psi) p_{\text{над}},$$

де $\delta_{\text{над}}$ і $\delta_{\text{від}}$ – питомі акустичні опори середовища, що відбиває і середовища, в якому розглядається поширення хвилі (відбиття відбуваються на межі цих двох середовищ); β – модуль коефіцієнта відбивання за тиском; ψ – зсув фаз у хвилях тиску при відбиванні.

Коефіцієнт відбивання за інтенсивністю визначається за формулою

$$\alpha_{\text{від}} = \left| \frac{\delta_{\text{над}} - \delta_{\text{від}}}{\delta_{\text{над}} + \delta_{\text{від}}} \right|^2 = \left| \frac{p_{\text{від}}}{p_{\text{над}}} \right|^2 = \beta^2.$$

Приклад. Визначимо коефіцієнт відбивання (за інтенсивністю звуку) від межі поділу повітряних мас з температурами 20°C і 0°C. Беремо дані з табл. 5.1 і підставляємо їх у формулу. Маємо

$$\alpha_{\text{від}} = \left| \frac{428 - 413}{428 + 413} \right|^2 \approx 3,2 \cdot 10^{-4},$$

тобто дуже маленький коефіцієнт відбивання.

У випадку, коли відбивання відбувається на межі повітря і водяної пари, коефіцієнт відбивання складає

$$\alpha_{\text{від}} = \left| \frac{413 - 230}{413 + 230} \right|^2 \approx 0,08,$$

тобто відбивається 8% всієї енергії.

Якщо відбивання відбувається від води, то коефіцієнт відбивання

$$\alpha_{\text{від}} = \left| \frac{413 - 1,43 \cdot 10^6}{413 + 1,43 \cdot 10^6} \right|^2 \approx 0,9988,$$

тобто відбивається 99,88% всієї енергії.

Коефіцієнти відбивання залежать від кута падіння звукових хвиль, тому в таблицях зазвичай приводять величини дифузних коефіцієнтів відбивання, виміряних для всіляких кутів падіння хвиль і нормальних (для кута падіння 90°).

Якщо зсув фаз за тиском при відбиванні рівний нулю (акустичний опір середовища, що відбиває, набагато більший за акустичний опір первинного середовища), то біля межі розділу середовищ утворюється пучність звукового тиску (рис. 5.8, а), а швид-

кість коливань матиме вузол коливань. При зворотному співвідношенні акустичних опорів обох середовищ зсув фаз для звукового тиску виходить рівним 180° : біля межі розділу будуть вузол звукового тиску (рис. 5.8, в) і пучність швидкості коливань.

Якщо зсув фаз при відбиванні за звуковим тиском відрізняється від 0° та 180° , то вузли і пучності відповідно зсуваються від поверхні розділу. На рис. 5.8, б показаний випадок зсуву фаз на 90° .

5.7 Заломлення звуку

Звукова хвиля, падаючи на поверхню розділу двох середовищ, як і світлова хвиля, частково проходить в інше середовище. При цьому відбувається заломлення хвилі, тобто якщо хвиля падає на

поверхню поділу під кутом φ_1 , то в наступному середовищі напрям руху хвилі (звукового променя) буде під кутом φ_2 . Відношення кута падіння до кута заломлення (рис. 5.9) визначається відношенням швидкостей поширення звукових коливань в цих середовищах:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2},$$

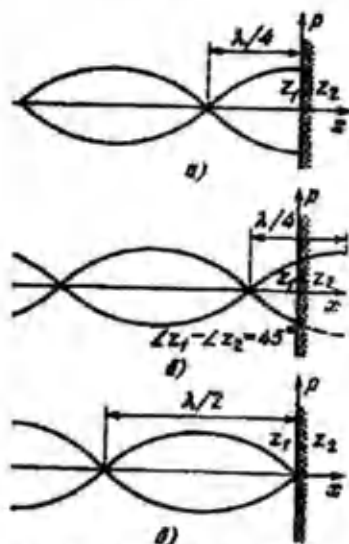


Рисунок 5.8 – Розподіл амплітуд звукового тиску при відбиванні з різним зсувом фаз: а – без зсуву фаз; б – із зсувом фаз на 90° ; в – із зсувом фаз на 180°

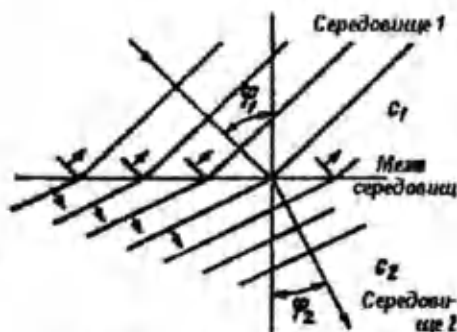


Рисунок 5.9 – Ілюстрація заломлення хвиль

де c_1 і c_2 – швидкості звуку в обох середовищах. Якщо питомі акустичні опори обох середовищ близькі один до одного, то майже вся енергія перейде з одного середовища в інше.

Якщо середовище має змінні параметри (наприклад, атмосферний тиск і густина), то відбувається вигинання звукових хвиль (рис. 5.10). Наприклад, для горизонтального поширення хвилі при поступовому збільшенні швидкості звуку з висотою звуковий промінь згинатиметься вниз (рис. 5.10, а), а при зменшенні – вгору (рис. 5.10, б). На вигинання звукових хвиль сильно впливають вітер і потоки повітря в різних напрямках.

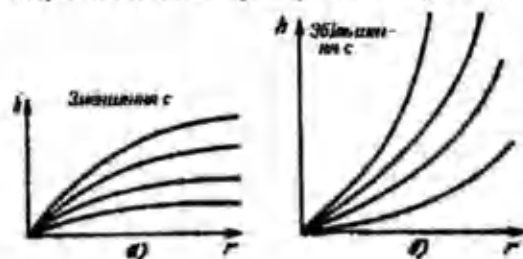


Рисунок 5.10 – Ілюстрація вигинання звукових хвиль при зміні швидкості звуку: а – при її зменшенні; б – при її збільшенні

Приклад. Унаслідок повітряних течій і вітру швидкість поширення звукових хвиль змінюється на 1 м/с при зміні висоти на 2 м. Визначити траєкторію поширення хвилі, якщо початковий кут звукового променя до вертикалі 89° , а швидкість поширення 340 м/с.

Вважатимемо, що швидкість звуку змінюється стрибками по 1 м/с. При падінні на сусідній шар під кутом 89° відбудеться заломлення звукового променя. Кут з вертикаллю складатиме

$$\varphi_1 = \arcsin[(c_1 / c_0) \sin \varphi_0].$$

Підставляючи в цю формулу 89° , одержуємо кут

$$\varphi_1 = \arcsin[(339 / 340) \sin 89^\circ] = 85,5^\circ.$$

В цьому шарі промінь знаходитиметься до зустрічі з наступним

Рисунок 5.11 – Траєкторія звукового променя під час поширення його вздовж земної поверхні, якщо швидкість звуку змінюється з висотою



шаром. Визначимо по тій же формулі кут заломлення під час переходу променя в наступний шар. Він рівний $83,7^\circ$. Для наступного шару одержимо $82,3^\circ$ і т.д. Для десятого заломлення кут складатиме 76° , для тридцятого – $61,9^\circ$. При цьому промінь відхилиться від горизонталі на 60 м і знаходитиметься від першої точки заломлення на 240 м. На рис. 5.11 побудована розрахункова траєкторія цього променя.

5.8 Дифракція хвиль

Дифракцією звуку називають відхилення поширення звуку від законів геометричної акустики, обумовлене його хвильовою природою.

Прикладами результатів дифракції звуку можуть служити розбіжність звукових пучків при віддаленні від випромінювача або після проходження через отвір в екрані; загинання звукових хвиль в область тіні позаду перешкод, великих в порівнянні з довжиною хвилі λ , відсутність тіні позаду перешкод, малих в порівнянні з λ , і т.і.

Дифракційні ефекти залежать від співвідношення між довжиною хвилі звуку і характерним розміром неоднорідностей середовища або неоднорідностей структури самої хвилі. Найбільш сильно вони виявляються при розмірах неоднорідностей порівнянних з довжиною хвилі звуку.

Для об'єктів, на яких відбувається дифракція звуку, великих в порівнянні з довжиною хвилі, ступінь відхилень від геометричної картини залежить від значення хвильового параметра $P = \sqrt{\lambda r} / D$, де D – поперечник об'єкту (наприклад, поперечник УЗ-випромінювача або перешкоди), r – відстань точки спостереження від цього об'єкту. Поблизу поршневого випромінювача звуку при $P \ll 1$ ("ближня", або "прожекторна", зона) поле в основному утворено циліндричним пучком проміння, що витікає з випромінювача, і в межах пучка має в цілому характер плоскої хвилі з інтенсивністю, постійною по перерізу і не залежної від відстані, відповідно до законів геометричної акустики, а дифракційні ефекти виражаються тільки в розмиванні меж пучка. У міру віддалення від випромінювача дифракційні ефекти посилюються, і при $P \sim 1$ поле втрачає характер плоскої хвилі і є складною ів-

терференційною картиною. На ще більших відстанях, при $P \gg 1$ ("дальня" зона), пучок перетворюється на хвилю, що сферично розходить, з інтенсивністю, що убуває як $1/r^2$, і з кутовим розподілом інтенсивності, не залежним від відстані; в цій області поле знову підкоряється законам геометричної акустики. Аналогічна картина спостерігається в пучку, що вирізається з плоскої хвилі отвором в екрані (рис. 5.12). При розмірах випромінювача (або отвору в екрані), малих в порівнянні з довжиною хвилі звуку λ , прожекторна зона відсутня і звукове поле є хвилею, що розходиться, вже на відстанях порядку λ .



Рисунок 5.12 – Проходження плоскої хвилі через отвір в екрані при різних співвідношеннях між розміром отвору і довжиною хвилі звуку. Чим менше отвір, тим швидше хвиля розходить в сторони після проходження отвору.



Рисунок 5.13 – а – утворення звукової тіні позаду перешкоди, більшою у порівнянні з довжиною звукової хвилі; б – огинання хвилею малої перешкоди

Аналогічно розмиванню пучка в прожекторній зоні розмивається звукова тінь позаду перешкоди, великої в порівнянні з λ (рис. 5.13, а); в області $P \gg 1$ тінь практично зникає. За перешкодою з розмірами $\sim \lambda$ і менше звукова тінь практично не утворюється (відбувається "огинання" перешкоди – рис. 5.13, б).

5.9 Загасання звуку

При поширенні звукової хвилі в реальних середовищах у заданому напрямку відбувається поступове її згасання, тобто зменшення інтенсивності і амплітуди. Згасання обумовлюється рядом факторів, які проявляються в тій чи іншій мірі залежно від характеристик самого звуку (і в першу чергу, його частоти) і від властивостей середовища. Всі ці чинники можна поділити на дві великі групи. У першу входять фактори, пов'язані з законами хвильового поширення в середовищі. Так, при поширенні в необмеженому середовищі звук від джерела кінцевих розмірів інтенсивність його спадає обернено пропорційно квадрату відстані. Згасання внаслідок розбіжності хвилі пов'язано з тим, що на великих відстанях від джерела потік випромінюваної звукової енергії у міру поширення хвилі розподіляється на все більш зростаючу площу хвильової поверхні і, відповідно, зменшується потік енергії, що припадає на одиницю поверхні, тобто інтенсивність звуку. Неоднорідність властивостей середовища викликає розсіювання звукової хвилі по різних напрямках, що приводить до ослаблення її в первісному напрямку, наприклад розсіювання звуку на бульбашках у воді, на схвильованій поверхні моря, в турбулентній атмосфері, на рідких краплях у повітрі – тумані. На поширення звуку в атмосфері і в морі впливає розподіл температури і тиску, сили та швидкості вітру. Ці фактори викликають викривлення звукових променів, тобто рефракцію звуку, яка пояснює, зокрема, той факт, що за вітром чути звук далі, ніж проти вітру. Розподіл швидкості звуку з глибиною в океані пояснює наявність т.з. підводного звукового каналу, в якому спостерігається наддалеке поширення звуку, наприклад звук вибуху поширюється в такому каналі на відстань понад 5000 км.

Друга група чинників, що визначають загасання звуку, пов'язана з фізичними процесами в речовині – необоротним переходом звукової енергії в інші форми (головним чином у тепло), тобто з поглинанням звуку, обумовленим в'язкістю і теплопровідністю середовища («класичне поглинання»), а також переходом звукової енергії в енергію внутрішньомолекулярних процесів (молекулярне або релаксацийне поглинання). Поглинання звуку помітно зростає з частотою. Тому височастотний ультразвук та гіпер-

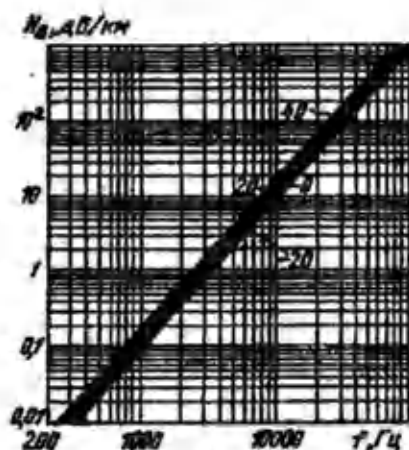


Рисунок 5.14 – Залежність в'язкого загасання плоскої звукової хвилі в сухому повітрі від частоти та температури (зазначена на прямих)

залежності для молекулярного загасання від частоти, вологості і температури. Обидві залежності подають загасання в децибелах на кілометр.

Повне загасання N визначається сумою загасання через в'язкість і молекулярного загасання. Для визначення молекулярного загасання по рис. 5.15, проводимо прямі:

а) від заданої точки на осі температур (див. вертикальну вісь вгору на рис. 5.15) по горизонталі вліво до перетину з кривою заданої відносної вологості, далі по вертикалі вгору до середини області T , по горизонталі вправо до перетину з кривою заданої частоти і потім по вертикалі вниз до перетину з віссю абсцис графіка частот F ;

б) від заданої точки на осі температур по горизонталі вправо до перетину з кривою M , далі по вертикалі вгору до перетину з віссю абсцис графіка M .

Отримані таким чином на абсциса точки F і M з'єднаємо прямою, в точці перетину якої зі шкалою декрементів відлічуємо шукану величину за масштабом кілометричного загасання.

звук поширюються, як правило, лише на дуже малі відстані, часто всього на кілька см. В атмосфері, у водному середовищі та в земній корі на найбільші відстані поширюються інфразвукові хвилі, що відрізняються малим поглинанням та слабо розсіюються.

На рис. 5.14 наведені залежності загасання звукових хвиль внаслідок в'язкості при його поширенні у сухому повітрі (від частоти коливань і температури), а на рис. 5.15 – за-

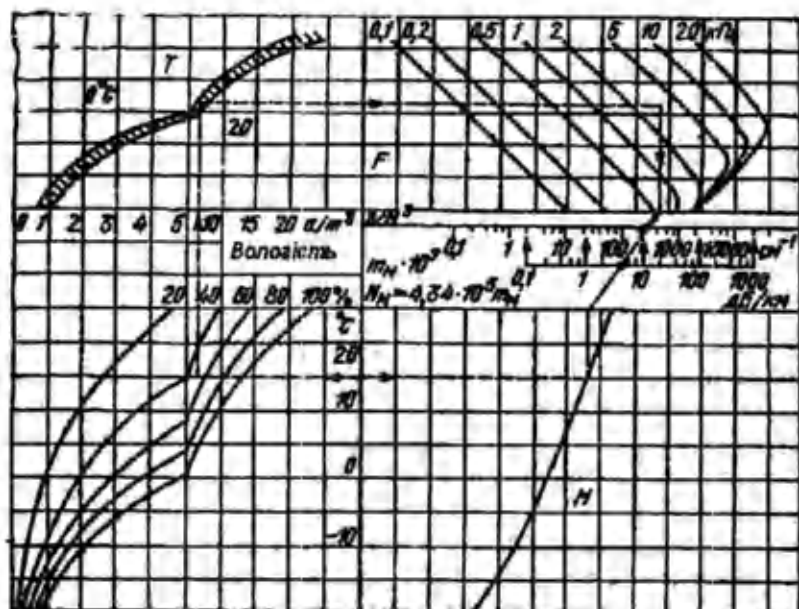


Рисунок 5.15 – Залежність молекулярного загасання плоскої звукової хвилі від температури, відносної вологості і частоти.

Приклад. Знайти молекулярне загасання для температури 15°C , вологості 50%, частоти 3 кГц. З номограми рис. 5.15 для цих даних знаходимо молекулярне загасання, що дорівнює 4,3 дБ/км, і коефіцієнт загасання $\mu = 250 \text{ см}^{-1}$, а з рис. 5.14 – значення в'язкого загасання, що дорівнює 0,9 дБ/км. Загальне загасання складе 5,2 дБ/км.

Звукові хвилі загасають при поширенні уздовж поглинаючої поверхні. При цьому чим більше коефіцієнт поглинання цієї поверхні, тим більше загасання вона вносить в хвилю, що поширюється. Наприклад, при поширенні звукової хвилі щодо до поглинаючої поверхні (наприклад, публіки) відбувається значне загасання звуку. Так, на частоті 800 Гц звуковий тиск зменшується за квадратичним законом замість гіперболічного. Точніше, на цій частоті звукова хвиля відчуває додаткове загасання на 21 дБ при десятикратній зміні відстані (загальне загасання виходить рівним

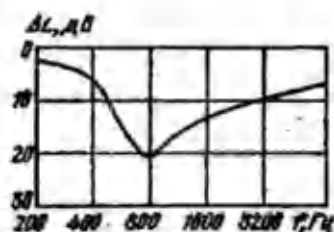


Рисунок 5.16 – Залежність загасання звуку від частоти при поширенні його вздовж публіки при десятикратній зміні відстані

загасання визначається вітром і неабиякою мірою потоками повітря у вертикальному напрямі (через різницю температур землі та повітря, а також різниці тиску з висотою).

41 дБ). На частоті 250 Гц додаткове загасання складає 3 дБ, а на частоті 6400 Гц – 8 дБ. На рис. 5.16 наведена ця залежність.

Особливо слід сказати про закони поширення звуку на великі відстані (понад 1 км). Виявилось, що крім «класичного» загасання, яке визначається за рис. 5.14 і 5.15, що враховує вплив в'язкості середовища і молекулярного загасання, істотну роль грає загасання через турбулентність повітря. Це

5.10 Основні властивості слуху

Всі передачі по системах мовлення, телефонного зв'язку, звукопідсилення, запису та відтворення звуку і т.і. призначені для людини. Тому для правильного проектування та експлуатації цих систем необхідно знати властивості слуху людини, тим більше, що орган слуху людини є своєрідним приймачем звуку, що різко відрізняється від приймачів звуку, створених людиною.

Вуху людини має властивості частотного аналізатора, дискретним сприйняттям по частотному і динамічному діапазоні (аналоговий звуковий сигнал перетворюється в послідовність електричних імпульсів двійкового типу). Всі ці операції здійснюються у внутрішньому вусі, в так званому равлику. У равлику знаходиться основна (базиларна) мембрана, що складається з великого числа волокон, слабо пов'язаних між собою. Уздовж основної мембрани розташовані нервові закінчення, кожне з яких (а їх понад 20 000) збуджується від дотику до них волокон основної мембрани, посилюючи в слуховий центр мозку електричні імпульси. Там ці імпульси піддаються складному аналізу, в результаті якого людина визначає повідомлення.

5.10.1 Сприйняття за частотою

Кожне з волокон основної мембрани резонує на цілком визначеній для неї частоті. Складний звук, що складається з ряду частотних складових, викликає коливання ряду волокон відповідно частотам складових. На рис. 5.17 наведено схематичний розріз равлика основної мембрани. По осі абсцис дано відстань (у міліметрах), від початку равлика до відповідного волокна основної мембрани, там же зазначені частоти, на які відгукуються ці волокна. Частоти нижче 60 Гц сприймаються за суб'єктивними гармоніками.



Рисунок 5.17 – Повздовжній розріз равлика вздовж основної мем-

Роздільна здатність слухового аналізатора невелика, смуга пропускання резонатора слухового аналізатора, визначена на рівні -3 дБ, складає для моноурального (одновухого) слухання на частоті 300 Гц близько

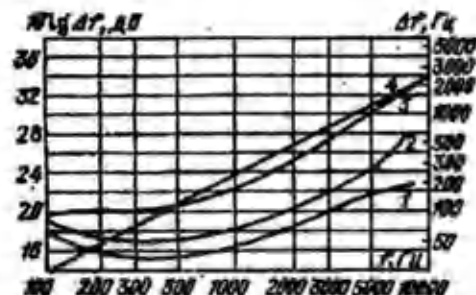


Рисунок 5.18 – Криві частотної залежності ширини критичних смужок та частотних груп слуху в герцах (праві ординати), і в децибелах $10 \lg \Delta f$ (ліві ординати) для моноурального (1) та бінаурального (2) слухання за Флетчером, бінаурального слухання за Цвікером (3), ширина третиннооктавних смуг(4)

50 Гц, на 1000 Гц – 60 Гц, на 3000 Гц – 150 Гц. Ці смуги пропускання носять назву критичних смужок слуху. Величини цих критичних смужок слуху для моноурального і бінаурального (двовухого) слухання (за Флетчером) наведено на рис. 5.18. За даними Цвікера критичні смужки слуху (див. рис. 5.18), названі ним «частотними групами», в 2-3 рази ширше, ніж за даними Флетчера. Критичними смужками за Флет-

чером (за Флеттчером) наведено на рис. 5.18. За даними Цвікера критичні смужки слуху (див. рис. 5.18), названі ним «частотними групами», в 2-3 рази ширше, ніж за даними Флетчера. Критичними смужками за Флет-

чером користуються при розрахунку розбірливості мовлення, а частотними групами за Цвікером – при розрахунках гучності шуму. Ширина частотних груп на частотах вище 400 Гц близька до ширини третиннооктавних смуг (див. криву 4 на рис. 5.18).

Сприймається слухом частотний діапазон обмежений знизу частотою 16 ... 20 Гц, а зверху – частотою 20 000 Гц. У цьому діапазоні людина запам'ятовує лише кілька сотень градацій частоти, причому число цих градацій різко зменшується зі зменшенням інтенсивності звуку і в середньому становить не більше 100 ... 150. Сусідні градації в середньому відрізняються одна від одної по частоті не менше ніж на 4% (найкращі музиканти не можуть помітити різниці у звучанні фільмів, знятих для кіно, зі швидкістю 24 кадри/с при демонстрації їх по телебаченню зі швидкістю 25 кадрів/с, і навпаки).

5.10.2 Сприйняття по амплітуді

Поріг чутності. Якщо волокно основної мембрани при своїх коливаннях не дістає до найближчого до нього нервового закінчення, то людина такий звук не чує. Але як тільки при збільшенні амплітуди коливань волокна воно торкнеться нервового закінчення, відбудеться це подразнення. Нервові закінчення відразу ж почне посылати електричні імпульси в слуховий центр мозку, і звук буде почутий. Цей стрибкоподібний перехід з чутного стану в нечутний і назад називають **порогом чутності**. Абсолютне значення слухового відчуття на порозі чутності мало,

але все таки має цілком кінцеве значення.

Поріг чутності залежить від частоти. На рис. 5.19 наведені ці залежності, причому по осі ординат для зручності відкладені рівні звукового тиску. Часто доводиться мати справу з різними залежностями порога чут-

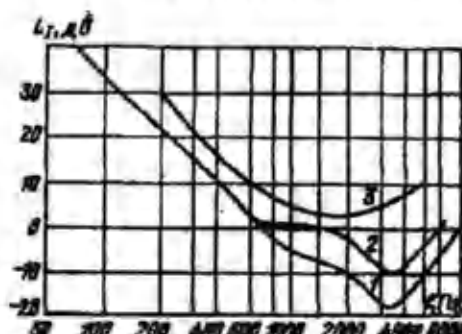


Рисунок 5.19 – Частотна залежність рівнів порогу чутності.

ності від частоти (див. рис. 5.19). Різниця між ними обумовлена різницею в умовах вимірювань порога. Так, наприклад, крива 1 – наведена для бінаурального слухання, коли тиск створюється множиною джерел звуку, що хаотично розташовані в горизонтальній площині навколо голови (дифузійний поріг), крива 2 дана для випадку вимірювання рівня тону в точці звукового поля до розміщення в ній голови людини і при слуханні двома вухами, тиск створюється джерелом звуку, розташованим на деякій відстані перед слухачем – фронтальне падіння звукової хвилі (фронтальний поріг). Крива 3 дає поріг чутності для рівнів звуку, вимірюваних близько вушної раковини при слуханні через телефон (моноуральний поріг по тиску).

Рівень відчуття. При плавному збільшенні інтенсивності звуку вище порогової слухове відчуття наростає стрибками у міру збільшення числа порушених нервових закінчень.

Значення стрибків $\Delta I / I_0$ можуть бути знайдені з рис. 5.20, на якому наведені ледве помітні відносні зміни інтенсивності звуку в залежності від частоти тону. З малюнка випливає, що на високих і середніх рівнях поріг помітності зміни інтенсивності звуку

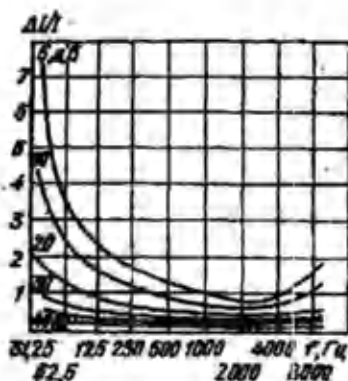


Рисунок 5.20 – Частотна залежність порогу чутності відносно зміни інтенсивності тону $\Delta I / I_0$ (параметр кривих – рівень відчуттєвості тону)

складає 0,05 на частоті 1000 Гц; 0,15 – на 100 Гц і 0,12 – на 8000 Гц. На низьких рівнях відчуття ці значення значно більші: для рівня 30 дБ вони відповідно становлять 0,6 на частоті 100 Гц; 0,35-на 1000 Гц і 0,4- на 8000 Гц. Отже, поріг помітності зміни інтенсивності на високих і середніх рівнях відчуття складає 0,2 ... 0,6 дБ, на низьких рівнях він доходить до декількох децибел, а в середньому трохи менше 1 дБ.

Збільшення рівня інтенсивності тону в кінці кінців призводить до появи відчуття болю, настає больовий поріг, який

на максимумі складає по інтенсивності близько 1 Вт/м^2 , тоді як мінімальний поріг чутності складає на частоті 3000 Гц близько 10^{-13} Вт/м^2 , тому динамічний діапазон за рівнем звуку від порога чутності до больового порогу дорівнює 130 дБ.

Між больовим порогом і порогом чутності кілька сотень елементарних стрибків відчуття, причому на низьких і високих частотах їх значно менше, ніж на середніх. Дискретність сприйняття слуху по частоті та амплітуді дає близько 22 000 елементарних градацій у всій області слухового сприйняття, обмежених знизу порогом чутності, зверху – больовим порогом і охоплює діапазон частот 20 ... 20 000 Гц.

Вебер і Фехнер сформулювали наступний закон відчуття звуку: однакові відносні зміни подразнюючої сили викликають однакові прирости слухового відчуття, тобто слухове відчуття пропорційно логарифму подразнюючої сили: $E = \lg(I/I_{ac})E$, де I_{ac} – подразнююча сила на порозі чутності.

Величину E називають рівнем відчуття. При $a=10$ рівень відчуття виражається в децибелах: $E = 10 \lg(I/I_{ac})$. Рівень відчуття $E = L_I - L_{ac}$, де L_{ac} – рівень порога чутності; $L_I = 10 \lg I + 120$ – рівень інтенсивності звуку I , Вт/м^2 . Рівень відчуття являє собою рівень над порогом чутності, тобто відносний рівень.

Гучність і рівень гучності. Рівень відчуття неточно характеризує суб'єктивне відчуття. Введено поняття рівня гучності. Домовилися за рівень гучності будь-якого звуку (або шуму) приймати рівень в децибелах рівноголосного з ним чистого тону 1000 Гц. За одиницю рівня гучності прийнятий фон, тому $L_{G, \text{фон}} = L_{I, 1000 \text{ Гц}}$ дБ при $G_s = G_{1000 \text{ Гц}}$, де G_s і $G_{1000 \text{ Гц}}$ – гучності виміряного звуку й тону 1000 Гц. Щоб визначити рівень гучності якого-небудь звуку, достатньо взяти чистий тон 1000 Гц і змінювати його рівень до тих пір, поки його гучність не буде на слух однаковою з гучністю досліджуваного звуку. При цьому шукана величина рівня гучності цього звуку буде чисельно дорівнювати рівню еталонного тону (1000 Гц). На рис. 5.21 наведені **криві рівної гучності (або ізофони)**, визначені для чистих тонів при слуханні двома вухами.

Цифри, які стоять над кривими на малюнку 5.21, відповідають

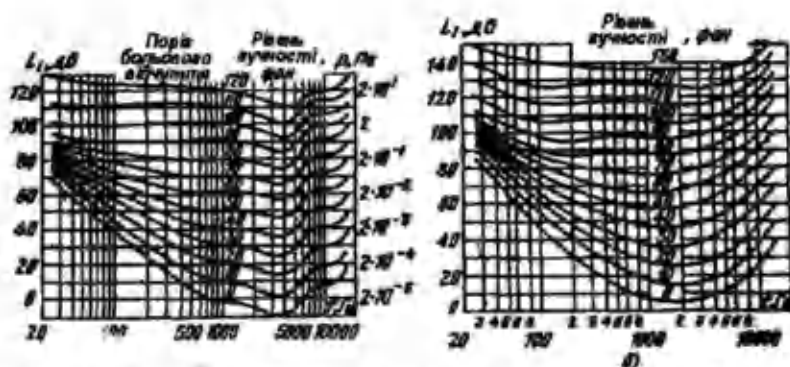


Рисунок 5.21 – Криві рівної гучності для бінаурального (а) і мо-
ноурального (б) слухання. Параметр кривих – рівень гучності.

числу фон, які дорівнюють числу децибел звуку з частотою 1000 Гц. Тобто, число фонів, яке оцінює рівень гучності звуку, співпадає з кількістю децибелів, що вимірюються звуковий тиск рівногучного еталонного тону. Знаючи частоту даного сигналу і його рівень звукового тиску, можна, користуючись представленими кривими, визначити його рівень гучності у фонах.

Приклад. Задано чистий тон з частотою 100 Гц і рівнем звукового тиску, що дорівнює 60 дБ. Знайти його рівень гучності при слуханні у вільному полі. Лінії, що відповідають абсцисі 100 Гц і ординаті 60 дБ, на рис. 5.21, а перетинаються між кривими з параметрами 30 і 40 фон. Отже, рівень гучності визначуваного тону дорівнює 35 фон.

Якщо проаналізувати криві рівної гучності, то видно, що при малих рівнях звукового тиску оцінка рівня гучності дуже сильно залежить від частоти – слух менш чутливий до низьких і високих частот, і потрібно створити набагато більші рівні звукового тиску, щоб звук став звучати рівногучно з еталонним звуком 1000 Гц. При великих рівнях ізофони вирівнюються, підйом на низьких частотах стає менш крутим – відбувається більш швидке наростання гучності звуків низької частоти, ніж середніх і високих. Таким чином, при великих рівнях низькі, середні і високі звуки оцінюються за рівнем гучності більш рівномірно.

Це властивість слуху має величезне значення для техніки зву-

козапису, тому що відносна гучність звуків різної частоти змінюється при зміні загального рівня запису, але тільки в тому випадку, якщо запис відтворюється на тому ж рівні, що й оригінальний джерело. Тоді в ній зберігається природний баланс по гучності. Якщо ж запис відтворюється на більш низьких рівнях, низькі і високі частоти як би зникають, баланс порушується. Це одна з причин того, чому спів і мова здаються бубочящими при відтворенні на високих рівнях через гучномовці: слухач сприймає в них низькі частоти значно більш гучними, ніж при прослуховуванні природного джерела на більш "тихих" рівнях.

Ця властивість слуховий системи — по-різному оцінювати рівень гучності сигналу в залежності від його частоти та рівня звукового тиску — враховується в сучасних приладах для вимірювання рівнів шуму та інших складних звуків. У них застосовуються заважені коригувальні криві, які послаблюють низькі частоти в залежності від рівня сигналу так, як це робить слухова система.

Оцінка рівня гучності не еквівалентна оцінці зміни абсолютної гучності. Наприклад, якщо є два сигнали з рівнями гучності 40 та 80 фон, то це не означає, що один голосніше іншого в два рази. Зв'язок рівня гучності з абсолютною оцінкою гучності носить досить складний характер.

Поряд зі створенням методів порівняльної оцінки рівня гучності, постійно тривають спроби побудови шкали для оцінки абсолютного відчуття гучності. Формування шкали гучності виявилось можливим завдяки тому, що людина легко реєструє на слух подвоєння гучності звуку. Значення збільшення гучності визначається менш точно. У цілому виявилось, що з достатньою для технічних цілей точністю закон сприйняття гучності звуку можна висловити таким чином: кожне збільшення рівня гучності звуку на 10 фон відповідає подвоєнню гучності звуку, що сприймається людиною. Таким чином, зменшення рівня гучності на 20 фон відповідає зменшенню його гучності в 4 рази, на 30 фон у 8 разів і т.д. За одиницю гучності взяли гучність звуку частотою 1000 Гц з рівнем гучності 40 фон (що приблизно відповідає шепіту на відстані 30 см від джерела звуку). Ця одиниця називається **соном**. Кількісний зв'язок між рівнями гучності L і суб'єктивної гучністю S наведено на рисунку 5.22 і описується співвідношенням

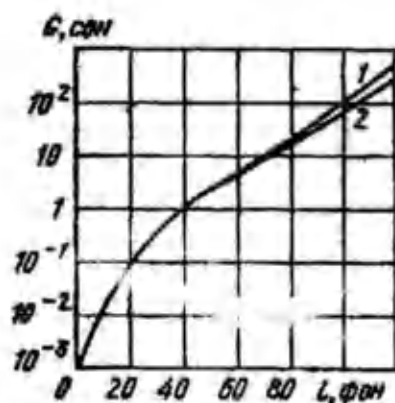


Рисунок 5.22 – Залежність гучності (в сонах) від рівня гучності (в фонах): 1 – експериментальна, 2 – нормалізована.

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}}$$

Звернемо увагу на те, що згідно формули і згідно таблиці 3 отримується дещо занижене значення гучності, особливо для її великих значень у порівнянні з експериментальними даними.

Для порівняння гучності двох звуків з відомими рівнями гучності необхідно визначити відповідні цим рівням суб'єктивні гучності в сонах. Відношення отриманих чисел вкаже, у скільки разів один звук голосніше іншого.

Таблиця 5.3 – Середній рівень гучності найбільш поширених звуків і шумів

Джерело шуму і місце його вимірювання	Рівень гучності, фон	Гучність, сон
Шуми назовні приміщення		
Шум в кабіні літака	128..130	875..1400
Авіаційний двигун на відстані 5 м	116..120	346..556
Гучний автомобільний гудок на відстані 8 м	95..100	57..88
Електропоїзд на естакаді на відстані 6 м	90	38
Шум в поїзді метро під час руху	85..90	25..38
Автобус (повний хід) на відстані 5 м	85..88	25..32.2
Трамвай на відстані 10 ... 20 м	80..85	17.1..25
Тролейбус на відстані 5 м	77	13.5
Вантаж. автомобіль у місті на відстані 5...20м	60..75	4.35..11.4
Легковий автомобіль у місті на відстані 5...20м	50..65	2.2..5.87
Велика демонстрація:		
з оркестром на відстані 5 м	96	62

Джерело шуму і місце його вимірювання	Рівень гучності, фон	Гучність, сон
з співом на відстані 5 м	60..62	4.35..9.12
Свисток міліціонера на відстані 20 м	70	7.95
Вулиця з інтенсивним рухом і трамваем	75..80	11.4..17.1
Гучна вулиця без трамвайного руху	60..75	4.35..11.4
Звичайний середній шум на вулиці	55..60	3.08..4.35
Те ж, у момент затишшя вдень	40	0.975
Тиха вулиця (без руху транспорту)	30..35	0.36..0.62
Тихий сад	20	0.097
Театри, школи, лікарні		
Оркестр	80..90	17.1..88
Зал при масових сценах	75..95	11.4..57
Оплески	60..75	4.35..11.4
Голосна музика по радіо	80	17.1
Радіоцентр (студія під час виконання соло)	40..50	0.98..2.2
Актові зали у школах під час перерви	55..62	3.08..4.65
Аудиторія при відповідях учнів	30..32	0.36..0.46
Бібліотеки	25..30	0.2..0.36
Лікарні	20..30	0.1..0.36
Установи		
Шумні збори	65..70	5.87..7.95
Голосна розмова по телефону	55	3.08
Канцелярія при відвідувачах	40..45	0.98..1.5
Коридори	35..40	0.62..0.98
Бухгалтерія без відвідувачів	30..35	0.36..0.62
Загальна їдальня	50..52	2.2..2.51
Жилі приміщення		
Шумна кімната	40..50	0.98..2.2
Їдальня під час обіду	45..48	1.5..1.92
Кухня на одну сім'ю	25..28	0.2..0.29
Кімната тиха	25..30	0.2..0.36
Кабінет при одному працюючому	20..25	0.1..0.2
Розмова трьох людей у звичайній кімнаті	45..50	1.5..2.2
Шепіт середньої гучності на відстані 1м	20	0.1
Цокання годинника на відстані 0,5 м	30	0.36
Ступені музикальної гучності		
Форте-фортіссімо	100	88

Джерело шуму і місце його вимірювання	Рівень гучності, фон	Гучність, сон
Фортіссімо	90	38
Форте	80	17,1
Меццо-форте	70	7,95
Меццо-піано	60	4,35
Піано	50	2,2
Піанісимо	40	9,98
Піано-піанісимо	30	0,36
Поріг слухового відчуття	0	0

Введено поняття **кривих рівної неприємності**. Вони представляють собою частотну залежність рівнів інтенсивності тону або вузькосмугового шуму, що суб'єктивно відчуються з однаковою неприємністю. Ці рівні визначають шляхом підбору такого рівня чистого тону 1000 Гц, який буде чути з однаковою неприємністю з заданим рівнем тону (або шуму) на заданій частоті. На рис. 5.23 наведені криві неприємності для різних рівнів (параметром кривих служить рівень тону 1000 Гц). Для широкосмугових шумів криві рівної неприємності відповідають рівням шуму в смугах частот груп. Для зручності ці криві перераховують у октавні рівні і відносять до середньої частоти октави. Відповідні криві називають **граничними спектрами**. Для кожного граничного спектру визначають

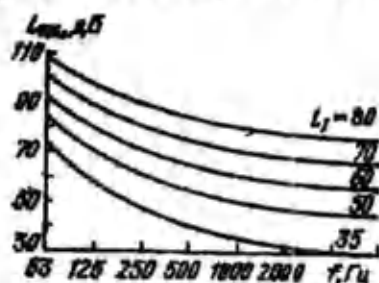


Рисунок 5.23 — Частотні залежності рівня звукового тиску тону однаково неприємного з тоном 1000 Гц заданого рівня (параметр кривих — рівень тону 1000 Гц)

загальний рівень гучності, який вимірюють шумоміром за шкалою А. У таблиці 5.4 наведені граничні спектри (ГС) для різних рівнів. Число при них означає рівень шуму в октавній смузі з середньою частотою 1000 Гц. У цій же таблиці наведені сумарні рі-

зв'язок між рівнем звуку та рівнем гучності. Число при них означає рівень шуму в октавній смузі з середньою частотою 1000 Гц. У цій же таблиці наведені сумарні рі-

вні гучності всього шуму для даного спектра. (Ці криві використовуються при визначенні рівня шуму за санітарними нормами.)

Таблиця 5.4 – Граничні спектри шумів за рівнем звукового тиску

Тип	Граничні спектри шумів за рівнем звукового тиску								рівень, дБ
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ГС-20	51	39	31	24	20	17	14	13	25
ГС-25	55	44	35	29	25	22	20	18	30
ГС-30	59	48	40	34	30	27	25	23	35
ГС-35	63	52	45	39	35	32	30	28	40
ГС-40	67	57	49	44	40	37	35	33	45
ГС-45	71	61	54	49	45	42	40	38	50
ГС-50	75	66	59	54	50	47	54	43	55
ГС-55	79	70	63	58	55	52	50	49	60
ГС-60	83	74	68	63	60	57	55	54	65
ГС-65	87	78	73	68	65	62	60	59	70
ГС-70	89	82	77	73	70	68	66	65	75
ГС-75	94	87	82	78	75	73	71	70	80
ГС-80	99	92	88	83	80	78	76	74	85

Приклад. Знайти рівень шуму для октавних смуг з середніми частотами 125 і 8000 Гц, що однаково неприємні зі звучанням смуги частот із середньою частотою 1000 Гц, що має рівень інтенсивності 60 дБ. З табл. 5.3 для ГС-60 знаходимо, що ці рівні відповідно рівні 74 і 54 дБ.

Приклад. Знайти рівні тонів 125 і 8000 Гц, що звучать однаково неприємно з тоном 1000 Гц, які мають рівень 60 дБ. З рис. 5.23 знаходимо для кривої 60 дБ значення таких рівнів: 80 і 55 дБ.

Ефект маскування. В умовах тиші чути писк комах, дзижчання мухи, цокання годинника і інші звуки, а в умовах шуму і перешкод можна не почути навіть голосну розмову. Іншими словами, в умовах шуму і перешкод поріг чутності для прийому слабого звуку зростає. Це підвищення порога чутності називають **маскуванням**. Величина маскування визначається величиною підвищення порога чутності для прийнятого звукового сигналу

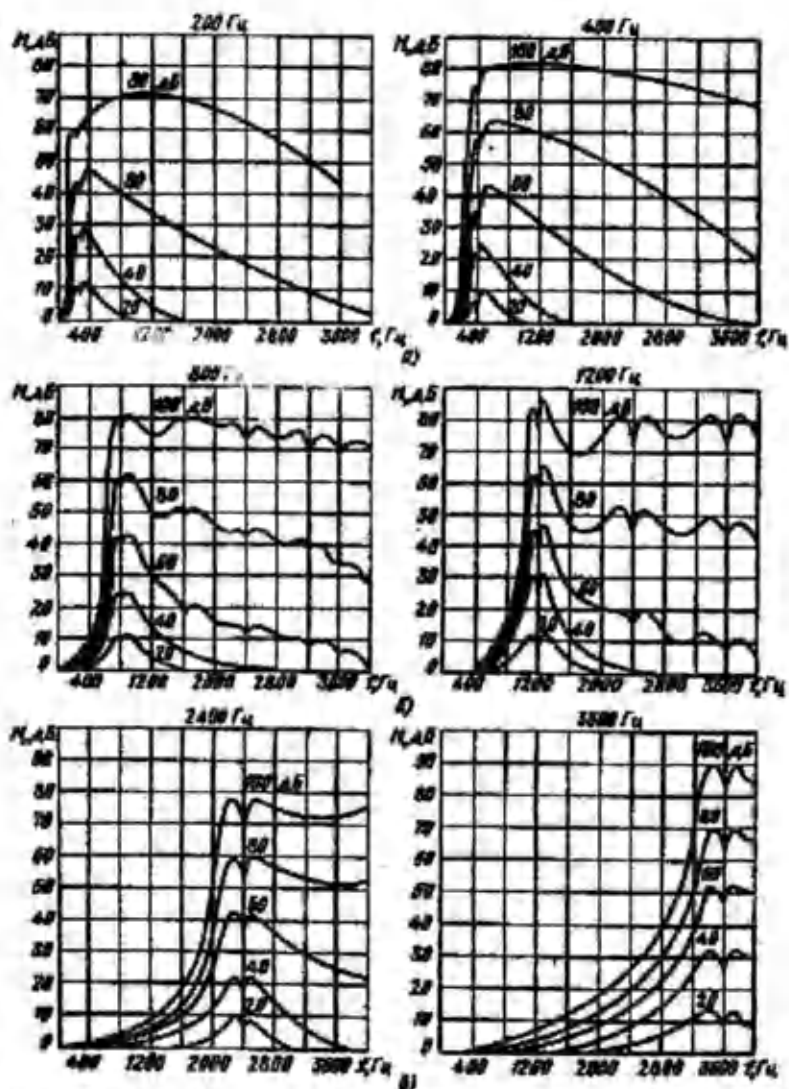


Рисунок 5.24 – Криві маскування для ряду частот тонів та їх рівнів. За віссю абсцис відкладена частота тону, що створює маскування, за віссю ординат – величина маскування; параметр кривих – рівень відчутності тону, що створює маскування; зверху графіка – його частота

$$M = L_{n,n,m} - L_{p,n,m}$$

де $L_{п.ч.т.}$ і $L_{п.ч.ш.}$ – рівні порогу чутиності в тиші і при шумі.

При підвищенні порога чутиності відповідно змінюється і рівень відчуття. У цьому випадку рівень відчуття

$$E_{ш} = 10 \lg(I / I_{п.ч.т.}) = L_I - L_{п.ч.т.} = E_{т.} - M, \quad .$$

де $E_{т.}$ – рівень відчуття того ж звуку в тиші. Рівень відчуття звукового сигналу змінюється при зміні рівня шумів і перешкод навіть при незмінному рівні сигналу.

Низькочастотні тони сильніше маскують високочастотні, ніж навпаки. На рис. 5.24 наведені криві маскування для ряду частот і рівнів тонів. При різниці частот близько кількох десятків герц величина маскування починає зменшуватися (з-за биття), і при рівності частот вона має мінімум. Точно такі ж мінімуми спостерігаються і на частотах, кратних частоті маскує тону.

Приклад. Тон, що заважає, має частоту 400 Гц і рівень 80 дБ. Знайти мінімальний рівень для тону 1200 Гц, який може бути почутий на фоні заважаючого тону. З кривої рис. 5.24 для параметрів 400 Гц і 80 дБ знаходимо для частоти 1200 Гц величину маскування, рівну 60 дБ. Так як для частоти 1200 Гц поріг чутиності в тиші (див. криву 2 на рис. 5.19) дорівнює 0 дБ, поріг чутиності в шумі буде дорівнювати 60 дБ. Тому рівень інтенсивності тону 1200 Гц повинен бути не менше 60 дБ. Якщо ж тон, що заважає, буде мати частоту 2400 Гц і рівень 80 дБ, то величина маскування на 1200 Гц (див. криві на рис. 5.24 для параметрів 2400 Гц і 80 дБ) буде дорівнювати 5 дБ. Отже, можна не враховувати маскування від дії тону 2400 Гц.

5.10.3 Часові характеристики слуху

При зникненні подразнюючої сили слухове відчуття зникає не відразу, а поступово зменшується до нуля. Цей ефект називають **слуховим враженням**. Час, протягом якого відчуття за рівнем гучності падає на 8,7 фон, вважається **постійною часу слуху**. Величина цієї постійної часу залежить від низки обставин і навіть від параметрів звуку. У середньому вона вважається рівною 150 ... 200 мс.

Якщо до слухача приходять два звуки з тривалістю менше 50 мс, але один з них запізнюється на час не більше 50 мс (зона 0

на рис. 5.25), то обидва звуку завжди сприймаються зливо. При запізнюванні на час більше 50 мс ці звуки можуть сприйматися роздільно. Але якщо другий звук буде мати рівень нижче першого, то він може не сприйматися (зона I) або сприйматися роздільно залежно від того, наскільки рівень другого звуку нижче рівня першого. На рис. 5.25 наведена залежність між часами запізнювання і різницею рівнів обох звуків, при яких вони вже сприймаються роздільно (див. криву 1). Якщо звуки виходять з одного джерела звуку, але один з них проходить більший шлях, наприклад, через відбивання від будь-якої перешкоди, то можливість роздільного сприйняття цих звуків називають луною.

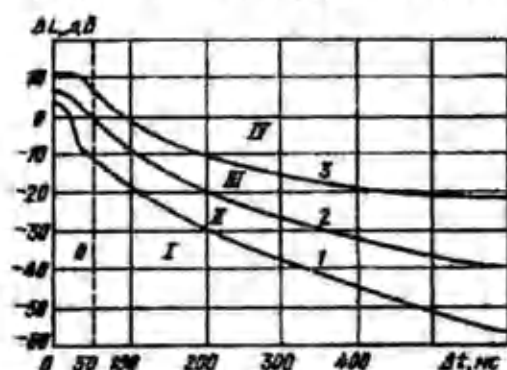


Рисунок 5.25 – Залежність між різницею рівнів прямого та відбитого (запізнюючогося) звуків і часом запізнювання відбитого звуку: 1 – межа чутності луни; 2 – межа помітності луни; 3 – межа заважаючої дії луни; зони: I – луна нечутна; II – луна чутна; III – луна чутна але не заважає сприйняттю мовлення; IV – луна знижує розбірливість мовлення

Якщо різниця рівнів прямого і відбитого звуку не перевищує межі позначеної кривою 2, то звук, що запізнюється, можна почути (зона II), при перевищенні цієї межі запізнюючийся звук помітний у вигляді луни, але ще не знижує розбірливість мовлення (зона III). При різниці рівнів, що перевищують криву 3 (зона IV), спостерігається зниження чіткості мовлення через відлуння.

Користуватися цими кривими не дуже зручно, краще мати їх аналітичне представлення у вигляді апроксимації. Було запропоновано досить точна апроксимація (точність близько 1 дБ) наступного виду:

для кривої 1
$$\Delta L_1 = \frac{100}{3} \lg \Delta t_{\text{мс}} - 45 \text{ дБ},$$

де Δt — час запізнювання в мс

для кривої 2 $\Delta L_2 = 35 \lg \Delta t_{\text{мс}} - 54 \text{ дБ},$

і для кривої 3 $\Delta L_3 = \frac{80}{3} \lg \Delta t_{\text{мс}} - 51 \text{ дБ},$

якщо підкласти різницю ходу, наприклад для 3-ї кривої, то отри-

маємо $\Delta L_3 = \frac{80}{3} \lg \Delta x - 38 \text{ дБ}.$

Приклад. Слухач знаходиться між джерелом звуку і стіною, що відбиває, на відстані 17 м від них. Якщо коефіцієнт відбиття звуку від стіни близький до одиниці, то інтенсивність прямого звуку буде в $51^2:17^2 = 9$ разів більше інтенсивності відбитого звуку (17 м і $17+17+17=51$ м — відстані які проходять прямий і відбитий промені; інтенсивність звуку зменшується обернено пропорційно до квадрату відстані). За рівнем ця різниця становитиме $10 \lg 9 = 9,5$ дБ. Різниця ходу відбитого звуку і прямого складе 34 м, тому відбитий звук буде запізнюватися по відношенню до прямого на $(34 \cdot 1000)/340 = 100$ мс. З рис. 5.25 випливає, що це буде помітно. А якщо джерело звуку буде знаходитися на відстані 3 м від слухача, то різниця рівнів буде складати $10 \lg(3 + 2 \cdot 17)^2 / 3^2 = 21,8 \text{ дБ}.$ Це вже буде за межами чутності (зона І).

Слухове враження дає можливість порівнювати частоти двох тонів при швидкому переключенні з одного на інший і виявляти навіть невелику різницю між частотами двох тонів і помічати невеликі зміни частоти тону.

5.11 Акустичні процеси у закритому приміщенні (статистична теорія)

Задачі і метод архітектурної акустики. Проблеми акустики великих закритих приміщень, пов'язані з визначенням умов гарної чутності, належать до числа завдань, поставлених ще за часів класичної старовини. Проте перші успіхи архітектурної акустики датуються лише початком поточного сторіччя, коли Уоллес Селів, експериментально встановив один з найважливіших факторів, що визначають акустичну якість аудиторій. Перші практичні успіхи надовго визначили шляхи подальшого розвитку акустики

закритих приміщень; аж до порівняно недавнього часу науково-технічна робота в цій області не виходила за межі горизонту, окресленого цими роботами. Тому видається доцільним викласти попередньо деякі міркування, що визначають завдання та метод архітектурної акустики в період її перших практичних успіхів.

Коли в закритій аудиторії звучить мова, то кожен її склад, що представляє собою короткий звуковий імпульс, доходить до слухача не тільки по прямій лінії, але і шляхами, які є багаторазово зламані завдяки відбиванню звуку від стін, стелі і підлоги приміщення. При кожному відбитті імпульсу від поверхонь, що обмежують приміщення, деяка частина звукової енергії поглинається; тому при кожному сказаному складі вухо слухача сприймає послідовний ряд імпульсів з поступово спадною інтенсивністю. Інтервали часу, що відокремлюють один від одного елементи такого ряду, досить малі в порівнянні з тривалістю імпульсу, в зв'язку з чим явище не носить характеру відлуння; не розрізняючи окремих членів серії затихаючих імпульсів, слухач сприймає кожен новий склад промови на злитому фоні низки попередніх складів, що ще не встигли відлунати до моменту виголошення чергового складу. Неважко зрозуміти, що, якщо поглинання звуку невелике, то відлуння відбувається дуже повільно, причому наявність імпульсів, ще не відлунали, сильно заважає чіткості чергових складів зв'язного мовлення. У цьому випадку приміщення виявляється надмірно лунким, іноді в такому ступені, що мова стає абсолютно нерозбірливою.

Все сказане зберігає своє значення і в застосуванні до приміщень, призначених для слухання музики. Кожен такт музичного твору, кожна музична фраза представляють собою послідовності звукових імпульсів, що піддаються в аудиторії процесу поступового відгону. Зрозуміло, що при затягнутому відгомоні фон, що виникає при суперпозиції ряду повільно затухаючих імпульсів, порушує нормальне сприйняття музики тим сильніше, чим швидше темп музичного твору. На прикладі музики легко усвідомити собі і іншу сторону справи: акустичним дефектом приміщення може з'явитися не тільки надмірна тривалість відгону, але також і недостатня його тривалість. Дійсно, при дуже швидкому відгомін (при значному поглинанні звуку) музика звучить

сухо, втрачаючи ту зв'язність звучання, до якої ми звикли при слуханні концертної музики в якості одного з факторів її естетичного впливу. Певною мірою це стосується і до слухання мовлення; хоча при короткому відгомоні розбірливість мови цілком задовільна, зате своєрідна безжизнівість її звучання в заглушеному приміщенні відчувається — особливо при сприйнятті художнього слова — як деякий безумовно неприємний дефект.

З цих міркувань випливає, що основним чинником, що визначає акустичне якість аудиторій, є тривалість процесів відгону або, як інакше говорять, тривалість **реверберації**. Під цим терміном розуміють залишкове звучання в приміщенні після припинення дії джерела звуку. Як показує досвід, тривалість реверберації повинна лежати в деякій області оптимальних значень, за межами якої аудиторія виявляється акустично неповноцінною або дефектною.

Значення, яке приписується тривалості реверберації як критерію оцінки акустичної аудиторій, пояснює ту обставину, що теоретичні інтереси архітектурної акустики направлені в першу чергу на дослідження нестационарних акустичних процесів, до числа яких відноситься відгомін. Проблема стаціонарного режиму має в акустичній приміщенні другорядне значення.

Якщо тепер ми спробуємо уявити собі характер завдань, що встають перед нами при дослідженні звукового поля у закритому приміщенні — і притому незалежно від того, чи йде мова про стаціонарний або про нестационарний режим, — то з очевидністю з'ясовується і той метод дослідження, завдяки якому ми можемо розраховувати на отримання практично придатних результатів. Справді, через кожен точку в об'ємі приміщення (якщо поглинання звуку не дуже велике) одночасно проходить дуже велика кількість відбитих хвиль, що рухаються у всіхляких напрямках.

Звуковий тиск і вектор швидкості коливань в кожній окремій точці визначаються результатом інтерференції всіх цих хвиль; якщо збагнути, що цей результат повинен бути розрахований для будь-якої точки в об'ємі приміщення і для будь-якої частоти в межах основної частини діапазону чутиності, то вже сама постановка задачі досить наочно свідчить про складність її *динамічного дослідження*. Однак саме дуже велика кількість інтерферуючих

хвиль наводить на думку про те, що принаймні в деяких випадках завдання піддається *статистичному* трактуванню з використанням основних прийомів математичної теорії ймовірностей; досить згадати про значення статистичного методу в молекулярній фізиці, де у зв'язку з величезною кількістю молекул, що беруть участь у досліджуваних процесах, доводиться відмовитися від розгляду їх індивідуальних траєкторій і швидкостей, що зовсім не перешкоджає аналітичному визначенню багатьох важливих закономірностей.

Архітектурно-акустична теорія з часу Себіна встала на шлях статистичного опису звукових полів, оперуючи середніми значеннями густини звукової енергії в приміщенні і не претендуючи на визначення тисків і коливальних швидкостей в окремих його точках. Припускаючи, що орієнтації, амплітуди і фази хвиль, що накладаються одна на одну, розподілені більш-менш хаотично, ми можемо розглядати ці хвилі як некогерентні і вважати, що густина енергії в кожній точці приміщення є сума густин енергії, пов'язаних з кожною з цих хвиль. Якщо хвильовий рух у приміщенні дійсно має такий невпорядкований (або, як кажуть, *ергодичний*) характер без наявності переважаючих напрямків коливального руху і симетрії в розподілі амплітуд, то статистичні методи дослідження абсолютно законні і призводять до важливих практичних результатів.

Середній час і довжина вільного пробігу хвилі. Статистичне дослідження звукових полів у закритих приміщеннях вимагає попереднього визначення середнього часу між двома послідовними відбиттями звуку від обмежують приміщення поверхонь, так само як і середнього числа відбиттів, яке зазнають звукові хвилі в одиницю часу.

Уявімо собі елемент dS поверхні, що обмежує об'єм V приміщення та звукову хвилю, що рухається під кутом θ до нормалі елементу dS (рис. 5.26). Яка ймовірність того, що за час від t до $t+dt$ ця хвиля впаде на площадку dS ? Зауважимо, що за час dt на площад-

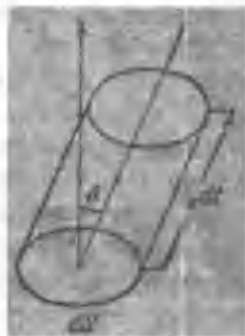


Рисунок 5.26

ку dS може впасти під кутом θ тільки та звукова енергія, яка міститься в об'ємі циліндра з основою dS і висотою $c_0 dt \cos \theta$ (c_0 – швидкість звуку); об'єм цього циліндра є

$$dV = c_0 dt \cos \theta \cdot dS$$

Шукана ймовірність W_1 визначається відношенням об'єму dV до всього об'єму приміщення V

$$W_1 = \frac{1}{2} \frac{dV}{V} = \frac{1}{2} \frac{c_0 dt \cos \theta \cdot dS}{V}, \quad (5.2)$$

причому множник $1/2$ пояснюється тим, що рух хвилі під кутом θ може з рівною ймовірністю відбуватися як у напрямку до площадки dS , так і в протилежному напрямку.

Необхідно, далі, врахувати, яка ймовірність того, що деяка на-

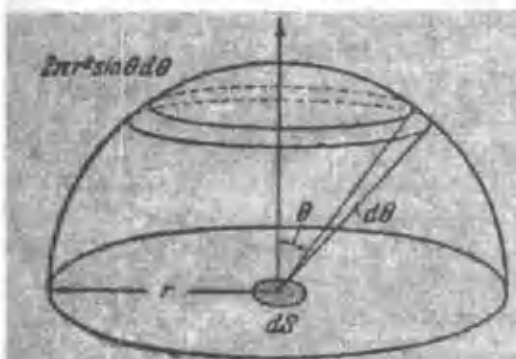


Рисунок 5.27

значення цієї ймовірності оточимо площадку dS півсферою довільного радіуса r і виділимо на півсфері пояс з площею $2\pi r \sin \theta \cdot r \cdot d\theta$, на якому радіус-вектор r утворює з нормаллю до dS кут θ (рис. 5.27). Ймовірність падіння хвилі під кутом, що лежить в межах від θ

до $\theta + d\theta$, є відношення площі пояска до площі півсфери $2\pi r^2$:

$$W_2 = \frac{2\pi r \sin \theta \cdot r \cdot d\theta}{2\pi r^2} = \sin \theta \cdot d\theta. \quad (5.3)$$

Тепер можна зазначити, яка ймовірність падіння звука на площадку dS за час dt під кутом, що лежить в межах від θ до $\theta + d\theta$; оскільки ймовірності W_1 і W_2 взаємно незалежні, то шука-на результуюча ймовірність згідно теореми про добуток ймовірностей статистично незалежних величин визначається добутком W_1 і W_2 :

$$W_3 = W_1 W_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0 \cdot dt \cdot dS}{V} \cos \theta \sin \theta \cdot d\theta.$$

Ймовірність же падіння звуку на dS під будь-яким кутом в межах від 0 до $\pi/2$ отримується, згідно правила додавання ймовірностей, шляхом інтегрування цього результату по θ

$$W_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0 \cdot dt \cdot dS}{V} \cdot \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta \cdot d\theta = \frac{c_0 \cdot dt \cdot dS}{4V}. \quad (5.4)$$

Нарешті, ймовірність падіння звуку за час dt під будь-яким кутом і на будь-який елемент поверхні S , що обмежує об'єм приміщення V , є

$$W = \frac{c_0 dt}{4V} \int_S dS = \frac{c_0 S}{4V} dt. \quad (5.5)$$

Знайдена нами ймовірність, зрозуміло, пропорційна інтервалу часу dt . Збільшуючи цей інтервал, ми, врешті-решт, отримаємо такий проміжок часу τ , в межах якого падіння звуку на будь-яку точку поверхні S має відбутися неодмінно. Так як ймовірність достовірної події дорівнює одиниці, то шуканий інтервал τ , тобто середній час між двома послідовними відбиваннями звуку, визначиться з умови

$$\frac{c_0 S}{4V} \tau = 1,$$

звідки

$$\tau = \frac{4V}{c_0 S}. \quad (5.6)$$

Середня кількість відбивань звуку за одиницю часу

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{c_0 S}{4V} \tau, \quad (5.7)$$

а середня довжина вільного пробігу звукової хвилі

$$\lambda = c_0 \tau = \frac{4V}{S}. \quad (5.8)$$

Остання формула піддається експериментальній перевірці. У тривимірних моделях приміщень різноманітної форми можна вимірювати відрізки траєкторії вузького пучка світла, посланого в деякому довільному напрямку і послідовно відображеного маленькими дзеркалами, які розміщені на стінках моделі в точках па-

діяння світла; вимірявши досить велика кількість таких відрізків, неважко вирахувати їх середню довжину. Результати таких вимірювань добре узгоджуються з (5.8). Слід, звичайно, мати на увазі, що в моделях правильної форми (наприклад, у формі прямокутного паралелепіпеда) початковий напрямок світлового пучка не повинен бути паралельним будь-якій з обмежуючих поверхонь; якщо ця умова не виконана, то орієнтації відбитих пучків не будуть мати статистично безладного розподілу, поза яким розрахунок ймовірностей позбавлений сенсу. Вимірювання за пучком світла, паралельним ребру або межі паралелепіпеда, абсолютно явно не мали б ніякого відношення до архітектурно-акустичної статистики; це тривіальне міркування має, проте, характер серйозної вказівки на ту обставину, що для приміщень з правильною геометричною формою статистичний метод може іноді призвести до помилкових результатів.

Середній коефіцієнт поглинання звуку. Як вже зазначалося вище, при кожному відбиванні звуку від поверхонь, що обмежують приміщення, деяка частина звукової енергії поглинається; очевидно, що для розрахунку тривалості реверберації необхідно вказати кількісну міру поглинальної здатності цих поверхонь. Позначимо символом α середнє значення відносного зменшення енергії при кожному окремому акті звукопоглинання:

$$\alpha = \frac{\Delta E}{E}, \quad (5.9)$$

тут E – загальний запас енергії в приміщенні перед актом поглинання, ΔE – середня величина енергії, що поглинається поверхнею приміщення в одиничному акті. Цілком зрозуміло, що величина, яка визначається формулою (5.9), має чисто статистичний зміст: так як окремі акти звукопоглинання мають місце при падінні хвиль під різними кутами на поверхні, що мають, взагалі кажучи, різні поглинальні здатності, то звукова енергія ΔE , що поглинається в одиничному акті, фактично може мати найрізноманітніші значення, що підлягають статистичному усередненню при незмінній величині E . Остання умова задовольняється, очевидно, в стаціонарному режимі, коли енергія, що випромінюється джерелом звуку, безперервно поповнює втрати, обумовлені поглинанням звуку в приміщенні. Ми вважаємо, однак, що відносна

змiна α не залежить вiд того, яка загальна величина енергiї E , що мiститься в примiщеннi; кажучи iнакше, ми припускаємо, що середня енергiя, що поглинається в одиничному актi, пропорцiйна загальному запасу енергiї в примiщеннi:

$$\Delta E = \alpha E.$$

Оскiльки за одиницю часу вiдбувається ν актiв поглинання, то середня величина звукової енергiї, що поглинається за одиницю часу

$$\delta E = \nu \Delta E = \alpha \nu E = \alpha \frac{c_0 S}{4V} E. \quad (5.10)$$

Формула (5.9) визначає α як середнє вiдносне зменшення звукової енергiї в примiщеннi в одиничному актi поглинання, але поруч з цим коефiцiєнту α можна надати i iншого трактування.

Звукову енергiю $\Delta' E$, що попадає за малий час Δt на поверхню S , що обмежує об'єм примiщення V , можна визначити, помноживши загальний запас енергiї E ймовiрнiсть її падiння, розраховану для часу Δt ; згiдно (5.5), ця ймовiрнiсть рiвна $\frac{c_0 S}{4V} \cdot \Delta t$.

Запишемо

$$\Delta' E = \frac{c_0 S}{4V} \cdot \Delta t \cdot E.$$

Енергiя $\delta' E$, що потрапляє на поверхню S , за одиницю часу, рiвна

$$\delta' E = \frac{\Delta' E}{\Delta t} = \frac{c_0 S}{4V} E. \quad (5.11)$$

Порiвнюючи цей результат з (5.10), маємо

$$\alpha = \frac{\delta E}{\delta' E}. \quad (5.12)$$

Якщо уявити собі, що примiщення обмежено однорiдною за своїм фiзичним властивостям поверхнею, то (5.12) визначає коефiцiєнт α як вiдношення енергiї, поглиненої цiєю поверхнею, до енергiї, що дифузно падає на неї. Термiн «дифузне падiння» вiдноситься до *ергодичного процесу*, коли всi напрямки перенесення звукової енергiї рiвномiрнi. Можна, отже, визначити α як коефiцiєнт поглинання звуку (в умовах дифузного поля) такою однорiдною поверхнею, яка, обмежуючи примiщення, обумовлює її

ж втрати звукової енергії, як і фактично наявна *неоднорідна* поверхню. Зважаючи на це величина α називається **середнім коефіцієнтом поглинання**; її добуток на поверхню S

$$A = \alpha S \quad (5.13)$$

прийнято називати **загальним поглинанням** приміщення.

Якщо приміщення обмежено поверхнями $S_1, S_2, \dots$ з коефіцієнтами поглинання $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ (виміряними в умовах дифузного звукового поля), то загальне поглинання визначається сумою поглинань окремих ділянок поверхні:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i. \quad (5.14)$$

При цьому середній коефіцієнт поглинання

$$\alpha = \frac{A}{S} = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i. \quad (5.15)$$

Надалі ми ще будемо мати випадок повернутися до розрахунку середнього коефіцієнта поглинання при більш загальних умовах розподілу звукопоглинання.

Наростання звуку, стаціонарний режим і відгомін. Міркування, розвинені вище, дають нам можливість статистичного розрахунку явищ встановлення акустичного режиму в закритих приміщеннях.

Нехай в момент часу $t = 0$ в приміщенні починає діяти джерело звуку з акустичною потужністю P_a . За час τ , що дорівнює середньому часу вільного пробігу звукової хвилі, джерело звуку віддає в приміщення енергію $P_a \tau$. В результаті першого відбивання, тобто до моменту часу 2τ , від цієї енергії залишиться частка

$$P_a \tau (1 - \alpha)$$

як це впливає з визначення середнього коефіцієнта поглинання за формулою (5.9). Але в інтервал часу від τ до 2τ джерело звуку знову віддає в приміщення енергію $P_a \tau$; таким чином до моменту $t = 2\tau$ в приміщенні буде існувати енергія

$$P_a \tau + P_a \tau (1 - \alpha) = P_a \tau [1 + (1 - \alpha)].$$

Міркуючи таким же чином далі, ми встановлюємо, що до моменту часу $t = 3\tau$ енергія в приміщенні буде дорівнювати

$$P_a \tau + P_a \tau [1 + (1 - \alpha)](1 - \alpha) = P_a \tau [1 + (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2].$$

До моменту $t = n\tau$ (де n — достатньо велике число) запас енергії в

приміщенні буде

$$\begin{aligned} E &= P_a \tau [1 + (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2 + \dots + (1 - \alpha)^{n-1}] = \\ &= P_a \tau \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{1 - (1 - \alpha)} = \frac{P_a \tau}{\alpha} [1 - (1 - \alpha)^n] \end{aligned}$$

(за відомою формулою суми членів геометричної прогресії).

Вважаючи $n = \frac{t}{\tau}$ і підкладаючи значення τ з (5.6) маємо:

$$E = \frac{4P_a V}{c_0 \alpha S} [1 - (1 - \alpha)^{\frac{c_0 S}{4V} t}],$$

Використавши тотожність

$$(1 - \alpha)^x = \exp[x \ln(1 - \alpha)]$$

і використавши (5.13), отримаємо формула зростання звукової енергії в приміщенні після включення джерела звука:

$$E(t) = \frac{4P_a}{c_0 A} V \left[1 - \exp\left(\frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t\right) \right]. \quad (5.16)$$

Для зростання середньої густини звукової енергії маємо

$$w(t) = \frac{E(t)}{V} = \frac{4P_a}{c_0 A} \left[1 - \exp\left(\frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t\right) \right]. \quad (5.17)$$

Оскільки $\alpha < 1$ (за визначенням цієї величини), то $\ln(1 - \alpha)$, а отже і показник експоненти – від'ємні; таким чином

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\exp\left(\frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t\right) \right] = 0.$$

Тому для стаціонарного режиму, коли втрати енергії внаслідок поглинання повністю компенсуються енергією, що надходить від джерела звуку з (5.16), (5.17) виходять формули

$$E_0(t) = \frac{4P_a}{c_0 A} V, \quad (5.18)$$

$$w_0(t) = \frac{E(t)}{V} = \frac{4P_a}{c_0 A}. \quad (5.19)$$

Перейдемо тепер до дослідження процесу відгону або реверберації. Нехай в момент часу $t = 0$, коли енергія, що міститься в приміщенні, має деяку величину E_0 , джерело звуку вимикається. Через час τ в приміщенні залишиться енергія $E_0(1 - \alpha)$; до моме-

нту часу 2τ запас енергії зменшиться до величини $E_0(1-\alpha)^2$ і т.д. До моменту $t = n\tau$ енергія буде рівна

$$E(t) = E_0(1-\alpha)^n = E_0(1-\alpha)^{\frac{t}{\tau}}.$$

Замінивши показникову функцію експоненціальною і підставляючи значення середнього часу вільного пробігу τ згідно (5.6), знайдемо формули відгону в приміщення після вимкнення джерела:

$$E(t) = E_0 \exp\left(\frac{c_0 S \ln(1-\alpha)}{4V} t\right), \quad (5.20)$$

$$w(t) = w_0 \exp\left(\frac{c_0 S \ln(1-\alpha)}{4V} t\right). \quad (5.21)$$

Графіки процесів наростання звуку і відгону, побудовані за рівнянням (5.20), (5.21), представлені на рис. 5.28 а; тут зображено типовий хід цих процесів, що спостерігаються за допомогою будь-якого об'єктивного вимірювального приладу. Зовсім іншу і

притому більш характерну картину ми отримаємо, відкладаючи по осі ординат не саму густину w звукової енергії, а її логарифм; вибір логарифмічної шкали продиктований тією обставиною, що людський орган слуху оцінює інтенсивність зовнішнього подразнення в логарифмічному масштабі, однаково реагуючи на однакові відносні (а не абсолютні) зміни звукового тиску. На рис. 5.28 б відтворений графік тих же нестационарних процесів, як і на рис. 5.28 а, з тією лише різницею, що по осі ординат відкладений рівень звукової енергії (в децибелах);

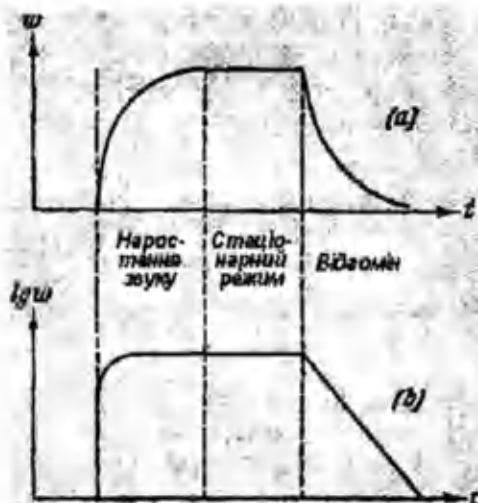


Рисунок 5.28

нарих процесів, як і на рис. 5.28 а, з тією лише різницею, що по осі ординат відкладений рівень звукової енергії (в децибелах);

при цьому виходить картина, яка добре характеризує слухове сприйняття нестационарних процесів у закритому приміщенні. Впадає в очі суб'єктивна швидкоплинність процесу наростання рівня, завдяки якій це явище не грає скільки-небудь істотної ролі в оцінці акустичної якості аудиторії; разом з тим абсолютно чітко видно значення процесу спадання рівня, представленого на графіку у вигляді відрізка спадаючої прямої. Нахил цієї прямої до осі абсцис визначає швидкість спадання рівня звуку в дБ/с. Формулу для швидкості спадання легко отримати, помітивши, що за рівнянням

$$N = 10 \lg \frac{w_0}{w} = -\frac{c_0 S}{4V} \ln(1-\alpha) \cdot t (10 \lg e) = \left(\frac{10 c_0 S}{4V} \lg \frac{1}{1-\alpha} \right) t;$$

звідки видно, що швидкість спадання рівня в процесі відгону рівня

$$\beta = \frac{N}{t} = \frac{10 c_0 S}{4V} \lg \frac{1}{1-\alpha}. \quad (5.22)$$

Час стандартної реверберації. З початку поточного століття тривалість процесу відгону, оскільки вона залежить від властивостей самого приміщення, прийнято характеризувати часом, протягом якого звукова енергія в приміщенні зменшується при вимкненому джерелі звуку в 10^6 разів; це відповідає зниженню рівня енергії на $10 \lg 10^6 = 60$ дБ. Визначена таким чином величина називається часом **стандартної реверберації** (іноді для скорочення - просто реверберацією).

Якщо процес відгону відбувається за експоненціальним законом згідно (5.20), то час стандартної реверберації однозначно пов'язаний зі швидкістю спадання рівня звукової енергії. Дійсно, нехай рівень убуває зі швидкістю β дБ/с; тоді час його зниження на 60 дБ (а це, згідно з визначенням, і є час стандартної реверберації T) дорівнює

$$T = \frac{60}{\beta}. \quad (5.23)$$

Підкладаючи значення β з (5.22), отримаємо

$$T = \frac{60 \cdot 4V}{10 c_0 S \lg \frac{1}{1-\alpha}} = \frac{24V}{c_0 S \lg \frac{1}{1-\alpha}}. \quad (5.24)$$

В цій формулі c_0 , S і V мають бути виражені в абсолютних одиницях. Якщо виражати S в м^2 , V – в м^3 , то підкладаючи $c_0 = 340 \text{ м/с}$, отримаємо розрахункову формулу

$$T = \frac{0,07V}{S \lg \frac{1}{1-\alpha}} = \frac{0,07V}{-S \lg(1-\alpha)} = \frac{0,161V}{-S \ln(1-\alpha)}. \quad (5.25)$$

Ця формула відома під назвою **формули Ейрінга**. В приміщеннях з невеликим середнім коефіцієнтом поглинання ($\alpha < 0,2$) можна розраховувати час стандартної реверберації за спрощеною формулою, яка отримується розкладанням функції логарифма в ряд

$$\lg \frac{1}{1-\alpha} = -\lg(1-\alpha) = -0,434 \ln(1-\alpha) = 0,434 \left(\alpha + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\alpha^3}{3} + \dots \right),$$

при малому значенні α можна обмежитись лише врахуванням першого члену ряду, і ми отримаємо результат

$$T = \frac{0,161V}{\alpha S}, \quad (5.26)$$

відомий під назвою **формули Себіна** (ця формула була встановлена Себіном експериментально).

На високих частотах (зазвичай понад 2 кГц) потрібно рахуватися з тим, що звукова енергія поглинається не тільки при відбиваннях, але і на шляху вільного пробігу внаслідок в'язкості і теплопровідності повітря. З урахуванням цього чинника формула Ейрінга приймає вигляд

$$T = \frac{0,161V}{-S \ln(1-\alpha) + 4\mu V},$$

де μ – показник загасання, рівний величині того зворотного шляху, на якому густина енергії зменшується в e раз. Величина μ залежить від вологості і від частоти. Залежності μ від відносної вологості на різних частотах при кімнатній температурі наведені на рис. 5.29.

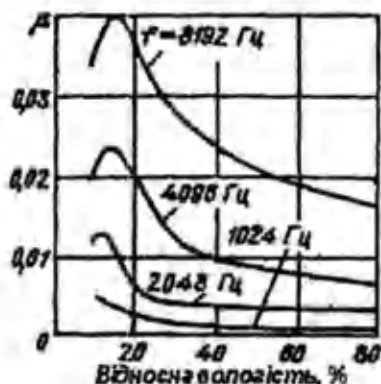


Рисунок 5.29 – Криві коефіцієнта поглинання

Формула Ейрінга (5.25) є основною формулою для обчислення часу реверберації при акустичному проектуванні аудиторії. Обчислення реверберації за формулою (5.26) вимагає знання середнього коефіцієнта поглинання α , який обчислюється для порожнього приміщення за формулою (5.15). Коефіцієнти α , для різних видів поверхонь (зокрема, для поверхонь, покритих звуковбирними матеріалами) визначені численними вимірюваннями, виконаними у спеціальних ревербераційонних камерах; значення цих коефіцієнтів для ряду частот у діапазоні від 100 до 4000 Гц наводяться в інструкціях з архітектуриної акустики і в довідниках, якими і належить користуватися при проектуванні.

В аудиторіях з великим числом слухачів і виконавців (театри, лекційні зали і т.і.) поглинання, що вноситься людьми, становить основну частину загального звукопоглинання. Розрахунок поглинання, яке вноситься слухачами та виконавцями, проводиться на підставі значень додаткового поглинання, що припадає на одну людину.

Отже, для визначення часу реверберації в приміщенні необхідно визначити його об'єм V , м^3 , сумарну площу обмежуючих поверхонь $S_{\text{зов}} \text{ м}^2$, еквівалентну площу звукопоглинання $A_{\text{зов}} \text{ м}^2$. Остання величина визначається при 70% заповненні залів для трьох частот: 125, 500 і 2000 Гц. Визначають $A_{\text{зов}}$ за формулою

$$A_{\text{зов}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A + \alpha_{\text{доп}} S_{\text{зов}}$$

де $\sum \alpha_i S_i$ - сума добутків коефіцієнтів звукопоглинання α окремих поверхонь на їх площі, м^2 ; $\sum A$ - сума, еквівалентних площ звукопоглинання глядачами і кріслами, м^2 ; $\alpha_{\text{доп}}$ - середній коефіцієнт додаткового звукопоглинання, що враховує звукопоглиначі, фактично існуючі в залах (освітлювальна арматура; повітряні порожнини, сполучені з основним об'ємом залу; щілини і тріщини; вентиляційні ґрати і ін.).

Середній коефіцієнт додаткового звукопоглинання в середньому може бути прийнятий рівним 0,08-0,09 на частоті 125 Гц і 0,04-0,05 на частотах 500-2000 Гц. Для залів, в яких вказані умови, що викликають додаткове звукопоглинання, сильно виражені, слідують значення збільшити приблизно на 30%, а в залах, де ці умови виражені слабо, приблизно на 30% зменшити.

Приклад. Визначити час реверберації для пустого залу розмірами 33х22х11,5 м. Об'єм приміщення 8349 м^3 , $S_{\text{заг}} = 2717 \text{ м}^2$. Площі окремих поверхонь та їх коефіцієнти звукопоглинання наведено у таблиці.

Поверхні, матеріал	Площа $S, \text{ м}^2$	Значення α і $\alpha S, \text{ м}^2$, на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		α	αS	α	αS	α	αS
Стеля, суха штукатурка	726	0,02	14,5	0,06	43,6	0,05	36,3
Підлога, паркет	726	0,04	29	0,07	50,8	0,07	50,8
Стіни, суха штукатурка	1265	0,02	25,3	0,06	75,9	0,05	63,3

Додаткове звукопоглинання на частоті 125 Гц рівно $217,4 \text{ м}^2$ ($0,08 \cdot 2717 \text{ м}^2$), а на частотах 500 і 2000 Гц – $108,7 \text{ м}^2$ ($0,04 \cdot 2717 \text{ м}^2$). Загальна еквівалентна площа звукопоглинання дорівнює на частотах: 125 Гц – $A_{\text{заг}} = 14,5 + 29 + 25,3 + 217,4 = 286 \text{ м}^2$; 500 Гц – $A_{\text{заг}} = 279 \text{ м}^2$; 2000 Гц – $A_{\text{заг}} = 259 \text{ м}^2$.

Середній коефіцієнт звукопоглинання $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{заг}} / S_{\text{заг}}$ на частотах: 125 Гц – $\alpha_{\text{ср}} = 286/2717 = 0,105$; 500 Гц – $\alpha_{\text{ср}} = 279/2717 = 0,1$; 2000 Гц – $\alpha_{\text{ср}} = 259/2717 = 0,095$.

Оскільки $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$, то час реверберації визначаємо за формулою $T = 0,161 V / A_{\text{заг}}$ на частотах:

125 Гц – $T = 0,161 (8349/286) = 4,75 \text{ с}$;

500 Гц – $T = 0,161 (8349/279) = 4,85 \text{ с}$;

2000 Гц – $T = 0,161 (8349/259) = 5,25 \text{ с}$.

Одержаний час реверберації порівнюється з рекомендованим (оптимальним) часом для даного типу залу і його об'єму.

5.12 Об'ємний та частотний оптимуми реверберації

Оптимумом реверберації – називають таку тривалість реверберації, за якої мовлення звучить (при достатньому рівні гучності) абсолютно розбірливо, а звучання музики або співочого голосу дає найбільший естетичний ефект.

Питання про оптимальність реверберації, очевидно, може бути вирішене тільки експериментальним шляхом; справа зводиться

ся до обробки великого числа суб'єктивних оцінок, що виносяться слухачами, що сприймають у приміщеннях зі змінною реверберацією зв'язне мовлення або музику різного характеру. Перші систематичні досліді цього роду були проведені С.Я. Ліфшицем. В даний час проєктувальник має у своєму розпорядженні більшість надійних експериментальних даних, що дозволяють йому вибрати

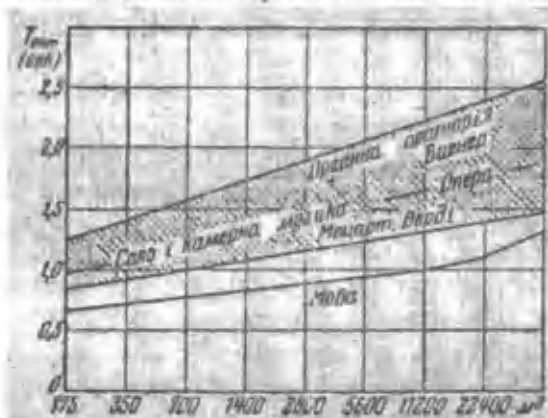


Рисунок 5.30

На рис. 5.30 наведено графік оптимальних значень часу стандартної реверберації на частоті 500 Гц у залежності від кубатури аудиторії; ці значення рекомендовані В.О.Кнудсенем - одним із найбільших фахівців в області архітектурної акустики. Найменші значення рекомендуються для мовних аудиторій (лекційні зали, зали засідань і зборів), відзначимо, що більш швидкий підйом кривої при великих кубатурах ($> 10000 \text{ м}^3$) обумовлений тим, що випромінювана оратором акустична потужність обмежена, причому для забезпечення достатнього рівня гучності непоміченої мови у великих аудиторіях доводиться використовувати відображену енергію ефективніше, ніж у приміщеннях меншого розміру.

Оптимальні реверберації для музичних аудиторій (концертні зали, оперні театри) займають, як видно з графіка, досить широку смугу значень за заданої кубатури приміщення. Це пов'язано з тим, що музичні твори різного характеру і стилю вимагають різного часу реверберації, змінного у відомих межах: від мінімальних значень для легкої і мелодійної музики Моцарта або Верді,

ти для кожного окремого випадку частотну характеристику оптимальної реверберації, що найкращим чином відповідає об'єму і призначенню проєктованої аудиторії. Такі дані можна знайти в довідкових виданнях і в спеціальних монографіях.

очевидно вже недостатніх для належного враження від драматичної музики Вагнера, до максимальних тривалостей, характерних для величної і повільною органної музики. Природно, що різноманітність стилів вносить деяку невизначеність у завдання, яке розв'язує проектувальник в тих випадках, коли проєктована аудиторія призначається для слухання музики різного характеру. У таких випадках доводиться вибирати компромісне рішення; певною мірою такі компроміси виправдовуються тим, що людське вухо не помічає відхилень від оптимуму порядку $\pm 10\%$.

Графік рис. 5.30 визначає оптимум реверберації для однієї тільки частоти (500 Гц); оптимальний час реверберації на інших частотах може бути визначено по частотній характеристиці оптимуму, на якій значення при 500 Гц прийнято за одиницю. Слід зазначити, що в питанні про оптимальну форму частотної характеристики реверберації аж до теперішнього часу існують різні точки зору, так що це питання є до певної міри дискусійним. Можна з деякою упевненістю вважати, що в приміщеннях невеликого розміру (особливо в таких, які призначаються для слухання або передачі мови) бажана приблизно однакова реверберація для всіх частот у діапазоні від 100 до 4000 Гц. У музичних аудиторіях великого обсягу оптимум реверберації підвищується в бік нижніх частот з крутизною, яка залежить від об'єму і призначення залу.

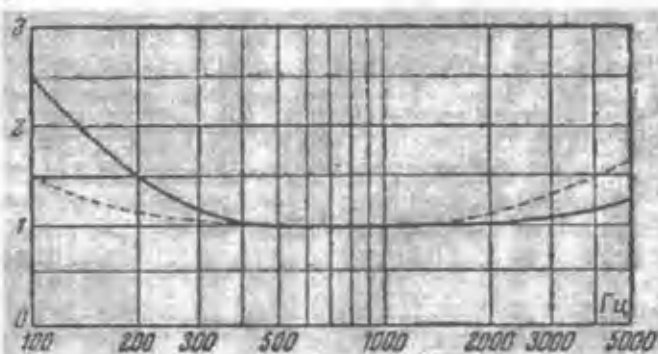


Рисунок 5.31 а

Рекомендовані форми оптимальних частотних характеристик показані на рис. 5.31, а (за Кнудсенom); суцільна крива дає опти-

мум для музики, пунктирна — для мови. Ординати відповідають відносним значенням оптимуму (оптимум при 500 Гц прийнятий за одиницю).

Криві частотного оптимуму реверберації, рекомендовані Кнудсеном (рис. 5.31), побудовані відповідно до вимоги, згідно з якою час відгуку має бути однаковим для всіх компонент складного звуку, інакше кажучи, всі компоненти повинні затухати до порога чутності до одного і того ж моменту часу. Якби поріг чутності мав однакове значення для всіх частот і відгомін усіх компонент складного звучання починався б з одного і того ж рівня, то оптимальна реверберація була б однаковою для всіх частот. Проте розподіл акустичної потужності природних джерел з частотного спектру не є рівномірним: на область середніх частот доводиться (у середньому) більша потужність, ніж на область низьких частот. Крім того, крива слухового порогу (див. рис. 5.21) піднімається у бік низьких частот. Врахування цієї обставини, поряд з відомим розподілом рівнів за частотним спектром (а цей розподіл є різним для музики і для мови), призводить до характеристик, представлених на рис. 5.31, а.

Інші передумови лежать в основі рекомендацій С.Я.Ліфшиця, який визначає частотний оптимум відповідно до вимоги, згідно з якою швидкість зменшення рівня гучності повинна бути однако-

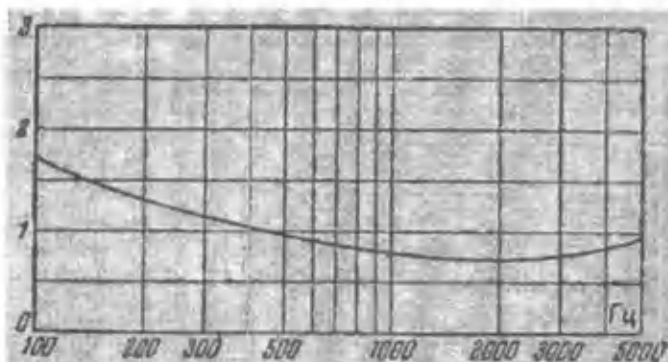


Рисунок 5.31 б

вою для всіх компонент складного звуку. Звертаючись до кривих рівної гучності (рис. 5.21), ми бачимо, що ці криві зближуються одна з одною у бік низьких частот; очевидно, що якщо рівень си-

ли звуку буде спадати в процесі відгону з однаковою швидкістю ($\beta = 60/T$, див. формулу 5.23), тобто якщо час реверберації буде одним і тим же для всіх частот, то рівень гучності буде спадати тим швидше, чим нижче частота. Для того щоб рівень гучності зменшувався однаково швидко для всіх частот, швидкість спадання рівня сили звуку повинна спадати у бік низьких частот, а це означає, що час реверберації має подовжуватися у міру пониження частоти (однаково для музики і для мови), як це представлено на рис. 5.31, б.

5.13 Акустичні процеси у закритому приміщенні (хвильова теорія)

Ми застосовували статичну теорію для розгляду процесів відгону. У статистичній теорії відгомін розглядається як загасання послідовного ряду відбитих звукових імпульсів, що випромінюються джерелом звуку. Мається на увазі, що форма імпульсів, отже, і їх спектр, задані джерелом звуку, при відбиваннях залишаються незмінними. Таке уявлення викликає сумніви принципового характеру: адже замкнутий повітряний об'єм приміщення, якщо його розміри порівнянні з довжиною хвилі або більше її, слід розглядати як коливальну систему з розподіленими параметрами, яка володіє спектром власних (резонансних) частот. Після припинення дії джерела звуку, що підтримує вимушені коливання повітря в приміщенні, в системі здійснюються тільки власні коливання, вони загасають у міру поглинання енергії. У явищі реверберації немає місця залишковому коливальному процесу, нав'язаному раніше дією змушуючої зовнішньої сили; відгомін є власне затухаюче коливання повітряного об'єму з частотами, що залежать від розмірів і форми приміщення.

Отже, суттю реверберації є не багаторазові відбивання, а поступово затухаючі власні коливання об'ємного резонатора, що не залежать від зовнішніх впливів.

Такий погляд покладений в основу хвильової теорії акустичних процесів в приміщенні.

Згідно хвильової теорії власні частоти f приміщення з довжиною, шириною і висотою ℓ_1, ℓ_2 і ℓ_3 визначаються згідно виразу:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{\ell_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{\ell_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{\ell_3}\right)^2},$$

де c – швидкість звуку в повітрі; n_1, n_2, n_3 – цілі числа від нуля до нескінченності. Кожному із співвідношень чисел n_1, n_2, n_3 відповідає одна з власних частот приміщення.

У якості прикладу на рис. 5.32 а представлений спектр власних частот повітряного об'єму приміщення з розмірами 10 м, 6 м і 4 м. На рисунку показані лише частоти, що лежать в інтервалі 0 ... 100 Гц. В області низьких частот, що відповідає малим значенням чисел n_1, n_2, n_3 , власні частоти відокремлені одна від одної порівняно великими інтервалами. Спектр власних частот має тут істотно дискретну структуру. В області більш високих частот спектр помітно ущільнюється, інтервали між суміжними власними частотами скорочуються і число власних коливань у заданій ділянці спектра швидко збільшується. В окремих випадках різні форми власних коливань, тобто форми, які відповідають різним комбінаціям чисел n_1, n_2, n_3 , можуть збігатися за частотою. Такі форми відзначені на рис. 5.32 а подовженими лініями. Цифри, що стоять

над ними, вказують число форм із співпадаючими частотами.

При вимиканні джерела звуку процес загасання коливань в ньому відбувається на всіх власних частотах приміщення.

Якщо два з параметрів n дорівнюють нулю, то хвилі зазнають відбивання тільки від однієї пари протилежних стінок, вони називаються **осьовими**.

Якщо один з параметрів n дорівнює нулю, хвилі відбиваються від двох пар стінок і називаються **дотичними**. Стоячі ж хвилі з частотами, для яких жоден з

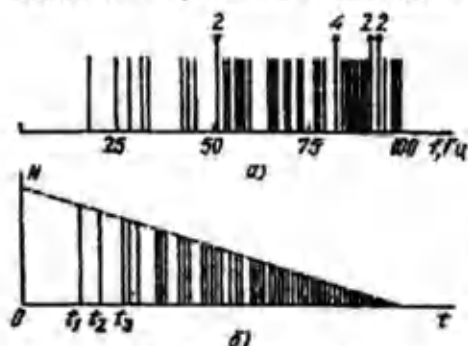


Рисунок 5.32 – Спектр власних частот приміщення (а) і часова структура сигналу, що реверберує в ньому (б)

параметрів n не дорівнює нулю, мають вектор швидкості з трьома відмінними від нуля компонентами; вони називаються **косими** і зазнають відбиття від всіх стінок приміщення.

Як ми казали, процес затухання коливань у приміщенні носить назву реверберації. Крива загасання звуку не має монотонної форми із-за биття між власними частотами. На рис. 5.32 б зображена приблизна часова структура сигналу, що реверберує, в припущенні експоненціального загасання, коли рівень відбитих сигналів убиває з часом за лінійним законом. У початковій стадії процесу відгомону структура відбитих сигналів (ехосигналів) істотно дискретна. По мірі зростання часу запізнювання ехосигнали зближуються і утворюють дуже щільну послідовність, можна вважати, що вони зливаються один з одним.

Акустичне відношення і ефективна реверберація. Міркування, викладені вище, призвели до розуміння про прямолінійне спадання рівня звукової енергії (рис. 5.28, б) у припущенні, що стаціонарне звукове поле в приміщенні є абсолютно дифузним (всі напрямки перенесення звукової енергії рівноймовірні). Неважко, однак, звернути увагу, що поблизу від джерела звуку стаціонарна густина w_n прямої звукової енергії повинна становити (особливо при великому поглинанні) значну частину від густини загальної енергії, що складається з енергії прямого і «дифузно-перемішаного» звуку, що зазнала деяке число відбивань від поверхні, що обмежує приміщення:

$$w = w_n + w_d$$

(w_d – густина дифузної звукової енергії). Відношення

$$R = \frac{w_d}{w_n} \quad (5.27)$$

характеризує ступінь дифузності звукового поля в даній точці, прийнято називати **акустичним відношенням**.

Густина прямої звукової енергії може бути визначена (у припущенні ненаправленого джерела, випромінюючого сферичну хвилю) за формулою

$$w_n = \frac{I}{c_0} = \frac{P_a}{c_0 \cdot 4\pi r^2},$$

де P_a – акустична потужність ненаправленого джерела, r – від-

стань від джерела до точки спостереження, а

$$I = \frac{P_a}{4\pi r^2}$$

– сила звуку, що створюється джерелом в необмеженому просторі. Густина ж дифузно-перемішаної енергії можна визначити як густину енергії, що залишається в приміщенні до моменту першого відбивання, коли прямої енергії вже не існує

$$w_a = \frac{4P_a}{c_0 A} (1 - \alpha) = \frac{4P_a}{c_0 S} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha}.$$

Підклавши значення w_n і w_a у співвідношення (5.27) знаходимо:

$$R = \frac{16\pi r^2}{S} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \quad (5.28)$$

Істотний інтерес представляє питання про сприйняття звуку, що реверберує, в умовах, коли акустичне відношення має невелику величину, так що пряма енергія, зникаюча відразу після вимкнення джерела, відіграє помітну роль у загальному балансі звукової енергії. Для роз'яснення цього питання звернемося до графіка рис. 5.33, що зображає хід спадання рівня з урахуванням прямої звукової енергії.

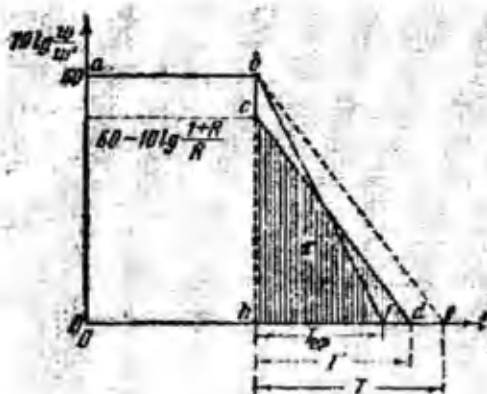


Рисунок 5.33

Нехай потужність джерела відрегульована таким чином, що стаціонарний рівень енергії становить 60 дБ над пороговим значенням w' :

$$10 \lg \frac{w_n - w_d}{w'} = 60 \text{ дБ.}$$

Після виключення джерела рівень густини звукової енергії стрибком зменшиться до значення

$$10 \lg \frac{w_a}{w'},$$

причому, як виявляється з попереднього рівняння

$$10^6 = \frac{w_n + w_o}{w'} = \frac{w_o}{w'} \left(1 + \frac{w_n}{w_o} \right) = \frac{w_o}{w'} \left(1 + \frac{1}{R} \right),$$

звідки випливає, що

$$\frac{w_o}{w'} = 10^6 \frac{R}{1+R}.$$

Таким чином при виключенні джерела рівень енергії змінюється стрибком на 60 дБ до значення

$$10 \lg \frac{w_o}{w'} = 60 - 10 \lg \frac{1+R}{R},$$

після чого убуває, згідно похилої прямої. Описаний процес представлений на рис. 5.33 ламаною лінією *abcd*. Відрізок часу T' , що відповідає похилій прямій *cd*, є час відгомону до порога чутності. Як видно з графіка, час відгону T' менше часу стандартної реверберації T , якому відповідає похила пряма *be*, що зображає хід спадання рівня в абсолютно дифузному полі ($R = \infty$). З подібності трикутників *hcd* і *hbe* випливає, що

$$\frac{T'}{T} = \frac{60 - 10 \lg \frac{1+R}{R}}{60} = 1 - \frac{1}{6} \lg \frac{1+R}{R}. \quad (5.29)$$

При описаних умовах слухач, як показує досвід, отримує враження дещо зменшеної реверберації. Деякі факти, пов'язані з психофізіологією слухового сприйняття, дають привід вважати, що суб'єктивна оцінка тривалості реверберації спирається на сприйняття так званої *протяжності* (інтеграла рівня за часом):

$$\tau = \int_0^{T'} 10 \lg \frac{w}{w'} dt, \quad (5.30)$$

де T' — час відгону. Відповідно до цієї гіпотези, ефективна реверберація, що сприймається за наявності стрибкоподібного зменшення рівня в момент вимкнення джерела, визначається часом T_{ef} , протягом якого рівень мав би зменшитися на 60 дБ рахуючи від початкового рівня

$$10 \lg \frac{w_n + w_o}{w'}$$

за умови незмінної протяжності τ (процес *abf* на рис. 5.33). При прямолінійному спадання рівня протяжність в процесі *abcd* ви-

значається площею заштрихованої трикутника hcd ; умова незмінної протяжності зводиться при цьому до рівності трикутників hcd і hbf . Ця умова дає

$$60T_{ef} = \left(60 - 10 \lg \frac{1+R}{R}\right) T',$$

або, ввівши замість T' стандартну реверберацію T згідно (5.29),

$$60T_{ef} = \left(60 - 10 \lg \frac{1+R}{R}\right) \frac{T}{60}.$$

Звідси отримаємо вираз ефективної реверберації T_{ef} через стандартну реверберацію T і акустичне відношення R :

$$T_{ef} = T \left(1 - \frac{1}{6} \lg \frac{1+R}{R}\right)^2. \quad (5.31)$$

Залежність відношення T_{ef}/T від акустичного відношення R наведена на рис. 5.34. Як бачимо з графіку, ефективна реверберація, яку сприймає слухач, помітно відрізняється від стандартної лише при $R < 1$



Рисунок 5.34

(як показує досвід, і ми про це вже згадували, зміни реверберації на $\pm 10\%$ як правило не помічаються).

Оптимальне значення акустичного відношення для передачі мови знаходяться в межах 0,5 ... 4, а для музичних передач 2 ... 8. Якщо акустичне відношення нижче цієї межі, то передача звучить уривчасто, сухо. Якщо воно більше верхньої межі, то мова стає погано розбірливою, а музична передача – «забрудненою».

Радіусом гулкості називають відстань від центру джерела звуку, для якого акустичне відношення дорівнює одиниці, тобто в цих точках рівні прямого та дифузного звуків рівні один одному.

Час запізнювання перших (ранніх) відображень та їх структура, поряд з часом реверберації, має першорядне значення для оцінки залу. Відсутність перших відбиттів в партері театру є одним із частих і типових недоліків залу. Л. Беранек розробив ме-

тодику оцінки акустики залу, по якій зазначає, що цей чинник в 3 рази вагоміший для акустики в порівнянні з іншими. Час запізнювання першого відображення обумовлює враження «присутності», «близькості», «камерності» слухача.

Враження слухача про розміри залу визначаються саме часом запізнювання першого відбиття щодо прямого звуку. Зал володіє акустичною близькістю, якщо музика, що виконується в ньому, звучить так само, як і при виконанні в малому залі – «камерно». Час запізнювання перших відбиттів у таких залах не перевищує 20 мс.

"Ранній звук" визначається як прямий звук і відбивання, що поступили протягом перших 80 мс після приходу прямого звуку. Причому істотне значення має напрям приходу цих ранніх звуків – так, наприклад, звуки, що прийшли від бічних стін в перші 80 мс, створюють відчуття розширення джерела звуку, що покращує якість сприйняття музики.

"Гучність ранніх звуків" визначається енергією прямого звуку плюс енергія відбитих звуків, що прийшли в перші 80 мс.

"Гучність ревербераційного звуку" визначається загальною звуковою енергією, яка досягає слухача після 80 мс.

"Ранній час реверберації" (РВЗ) – час загасання звуку після виключення джерела, коли рівень звукового тиску зменшується на 10 дБ. Крім того, для порівняння з суб'єктивними оцінками використовується також час реверберації (ЧР) при спаді звукового тиску від -5 до -35 дБ при заповнених залах (тобто частина ревербераційної кривої).

Окрім цих, для порівняння з суб'єктивними оцінками використовується і цілий ряд інших параметрів.

"Гулкість-життєвість" – ці терміни перш за все пов'язані з оцінкою загального враження від акустики залів, тобто, як було вказано вище, в значній мірі зв'язані з часом реверберації (ЧР). Всі приміщення по цьому критерію ранжируються достатньо чітко (собори, концертні зали, студії і ін.). Для кожного виду музики і мови існують оптимальні межі змін часу реверберації, які залежать від об'єму приміщення і частоти (рис. 5.30), яке міняється в межах від 0,4 до 1 з для мови, від 1 до 1,5 з для камерної музики, від 1,8 до 2,2 з для симфонічної і т.д. Реверберація – один з ефек-

тів, який враховувався композиторами при створенні творів, наприклад, композитори органної музики спеціально робили паузи, щоб була чутна довга реверберація в соборі.

Найбільший вплив на відчуття "життєвості" звуків відіграє час реверберації на середніх частотах. У приміщеннях, зокрема в студіях, де час реверберації дуже короткий для даного музичного жанру, звук характеризується як "мертвий", "сухий". Всі, хто чув, як звучить музика в заглушеній камері, можуть виразно уявити, що саме мається на увазі. Навпаки, якщо час реверберації дуже великий для даної музики, звук характеризується як дуже "брудний", "водянистий". Тому введення при обробці додаткових ефектів реверберації, не відповідних стилю і характеру музики, може викликати аналогічні суб'єктивні відчуття.

Взагалі, суб'єктивна оцінка акустики залу – питання досить проблематичне. Труднощі оцінки визначаються, по-перше, відсутністю необхідних понять, які можуть характеризувати усі властивості звучання і опису цих властивостей, по-друге, відсутністю до цього часу чітких фізичних об'єктивних критеріїв, з якими можна було б зіставити дані суб'єктивної оцінки. Існує великий словник, яким користуються музиканти для опису свого враження при слуханні музики. Цей словник істотно відрізняється від того, яким користуються акустики і навряд чи може бути пов'язаний з певними фізичними властивостями залу. Такі слова, як «повітряно», «чудово» неможливо перекласти на мову конкретних понять акустики. Більш того, навіть такий відомий і найбільш простий фізичний критерій, як реверберація, далеко не завжди пов'язується у поданні музикантів з певними акустичними властивостями.

Вивченням суб'єктивних характеристик залу багато займався Л.Баранек. Він розрізняє 18 суб'єктивних оцінок музично-акустичної якості. Найважливіші з них наступні:

Повнота тону (звучність). У студії або концертному залі звук продовжує існувати протягом приблизно двох секунд після того, як звук самого інструменту вже припинився. Повнота тону залежить від спільної дії власне часу реверберації і відносини гучності звуку, що реверберує і прямого звуку.

Чим більше відношення гучності реверберуючого звуку до

прямого, тим більша повнота тону. Для кожного жанру музики характерно певне співвідношення. Так, старовинні псалми й органна музика написані для церков – приміщень з більшою реверберацією і великим співвідношенням реверберуючого і прямого звуків. У приміщенні з малою реверберацією таким творам не вистачає повноти тону і вони втрачають свій шарм. Гучність прямого звуку визначається не тільки ним самим, але й першими відбиваннями, які створюються найближчими до інструменту поверхнями. Відношення гучності прямого і реверберуючого звуків визначається таким чином часом реверберації і формою околосценічного простору (портальна частина залу).

Виразність звучання визначається як музичними факторами, так і акустикою приміщення. Розрізняють два види чіткості музичного звучання – горизонтальну, тобто виразність звучання послідовних тонів в мелодії, і вертикальну – виразність тонів, що одночасно звучать, в гармонії.

Акустичні фактори, що впливають на горизонтальну чіткість часу реверберації, і відношення гучності прямого і реверберуючого звуку визначають повноту тону, але в зворотному відношенні. З музичних факторів на горизонтальну чіткість впливають темп виконання і майстерність виконавця. Вертикальна чіткість визначається особливостями музики, підбором тонів, що одночасно звучать, виконанням, здібностями слухача. Акустичні фактори, що впливають на вертикальну чіткість, включають в себе баланс між різними інструментами, ступінь змішуваності звуків різних інструментів, реверберацію, відношення гучності прямого і реверберуючого звуків.

Інтимність (буквальний переклад з нім. і англ.), – **присутність, камерність, близькість** – допомагає слухачеві скласти уявлення про розміри приміщення, в якому виконується твір.

Теплота (повнота басового тону) визначається як звучність басів в порівнянні з звучністю середніх тонів. Теплота забезпечується у випадку, коли час реверберації для низьких частот рівний або дещо більший реверберації на середніх частотах.

Гучність прямого звуку зменшується з віддаленням від сцени. Найбільш сприятливою відстанню при прослуховуванні пря-

мого звука від оркестру є відстань 18 м для окремих інструментів і 6...15 м для солістів.

Баланс забезпечується спільною дією багатьох факторів музичного та акустичного характеру. Баланс повинен мати місце як між різними групами інструментів оркестру, так і між оркестром, з одного боку, і виконуючим соло інструментом, з іншого боку. Баланс залежить від особливостей околосценічного простору, розміщення оркестрантів і здібностей диригента і виконавців.

Ансамбль. Ритмічна точність виконання окремих партій вважається такою, якщо кілька добре музиканти чують один одного. Таким чином почуття ансамблю залежить з акустичною боку від конструкції сцени або відбиваючих поверхонь поблизу оркестру.

Крім цих властивостей, що характеризують акустику залу, слід згадати такі, як **яскравість** (наявність високих частот), **швидкість відгону** приміщення, **дифузність**. Поза всяким сумнівом, в залі не повинно утворюватися луна і прослуховуватися шум.

5.14 Розбірливість мовлення в приміщенні

В приміщеннях, призначених для прослуховування мови (аудиторії, драматичні театри), головне значення мають чіткість і розбірливість мови. Критерієм для оцінки чутності мови є артикуляція, яка оцінюється у відсотках правильно понятих слів або складів по відношенню до всіх вимовлених. Тому артикуляція є суб'єктивним критерієм. Для визначення чіткості користуються експериментальним методом. Диктор погально читає таблиці однокладових, що не мають сенсу складів (складова розбірливість; такий спосіб виключає заповнення поганої чутності складів здогадкою слухачів) або фраз, (розбірливість фраз), і слухачі, що знаходяться в різних точках приміщення, записують їх. У залах, в яких складова артикуляція дорівнює 85-96% (розбірливість фраз більша за 97%), розбірливість мови вважається відмінною; якщо артикуляція знаходиться в межах 75-85% (розбірливість фраз – 94-97%), розбірливість вважається доброю; 65-75% (розбірливість фраз – 90-94%) – задовільною; менше 65% (менше 90% розбірливості фраз) – розбірливість мови незадовільна.

На артикуляцію впливають наступні основні фактори: час ре-

верберачії (коефіцієнт K_1), рівень гучності мови (K_2), відношення рівня заважаючого шуму до рівня гучності мови (K_3), форма і розміри залу (K_4). Тоді процент артикуляції буде рівний (формула Кнудсена)

$$PA = 96K_1K_2K_3K_4.$$

Визначення артикуляції згідно цієї формули є наближенням. Тим не менше наведені нижче значення коефіцієнтів дозволяють уникнути грубих акустичних помилок ще на стадії проектування. Значення K_1 , отримані, дослідним шляхом, за часу реверберації приблизно 0,5-0,8 с приймаються за одиницю; при збільшенні часу реверберації артикуляція падає приблизно на 10% на кожну секунду часу. Так, при часі реверберації, що дорівнює 4 с, $K_1 = 0,65$, а, отже розбірливість мови буде незадовільною ($PA = 62\%$) навіть при всіх інших коефіцієнтах, рівних 1. Найбільша розбірливість мови має місце при рівні мовлення близько 70-80 дБ. При 60 і 100 дБ $K_2 = 0,95$; 50 дБ – 0,9; 40 дБ – 0,8-0,85 і при 30 дБ – 0,65.

При рівності рівня заважаючого шуму і рівня мови коефіцієнт $K_3 = 0,6-0,7$, тобто артикуляція практично стає незадовільною. При відношенні рівня шуму до рівня мови 0,7, $K_3 = 0,8$; при 0,6 $K_3 = 0,85$; при 0,4 $K_3 = 0,9$; при 0,3 $K_3 = 0,92$; при 0,2 $K_3 = 0,95$; при 0,1 $K_3 = 0,98$. Коефіцієнт K_4 залежить від форми і розмірів залів. Для великих залів $K_4 = 0,90-0,95$; для прямокутних порівняно невеликих залів $K_4 = 1,0$.

Приклад. Потрібно визначити артикуляцію для великої зали прямокутної форми при $T = 2$ с і рівні шуму близько 50 дБ.

При $T = 2$ с коефіцієнт $K_1 = 0,85$; $K_2 = 1$ ($L = 70-75$ дБ); $K_3 = 0,8$ (відношення рівня шуму до рівня мови $50/72,5 \approx 0,7$); $K_4 \approx 0,95$.

Згідно формули Кнудсена $PA = 96 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 62\%$. Отже, в залі буде незадовільна артикуляція. Для її поліпшення необхідно зменшити час реверберації і рівень шуму, що заважає.

5.15 Основи геометричної акустики закритих приміщень

У перелік основних акустичних умов приміщення входять його об'єм, конфігурація, форма поверхонь, що його обмежують, а також властивий йому час реверберації.

Об'єм приміщення. Максимальний об'єм приміщення залежить від джерела звуку та його рівня потужності. У таблиці 5.5 наведені граничні значення для оцінки максимального об'єму приміщення при звучанні без посилення звуку електроакустичним установками (ЕАУ). Якщо використовуються ЕАУ, то об'єм приміщення може бути необмеженим.

Таблиця 5.5 – максимальні об'єми приміщення для виступів (без підсилювачів)

Джерело звуку	об'єм, м ³
Малодосвідчений оратор	3 000
Досвідчений оратор	6 000
Співак або музикант (соло)	10 000
Великий симфонічний оркестр	20 000
Зведений хор	50 000

Форма приміщення. Другий фактор (форма приміщення) впливає на дифузну і пряму складові звукового поля.

Спрощено співвідношення сторін прямокутного приміщення може бути визначено за графіком на рис. 5.35. При цьому необхідно зазначити, що межі оптимального співвідношення сторін

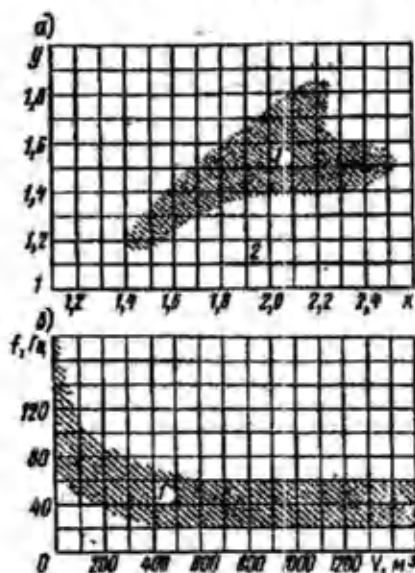


Рисунок 5.35 – Оптимальні пропорції приміщення: а – розподіл власних частот прямокутного приміщення з паралельними обмежувачими поверхнями із співвідношенням сторін 1:х:у; 1 – сприятлива область, 2 – несприятлива; б – область застосування діаграми а.

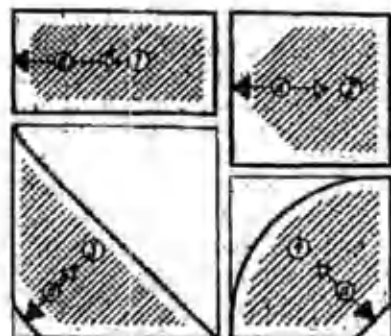


Рисунок 5.36 – Форма приміщень в плані. Всі плани володіють рівною корисною площею поверхні S_n при різних загальних площах поверхні $S_{\text{заг}}$ і середніх відстанях до слухачів d

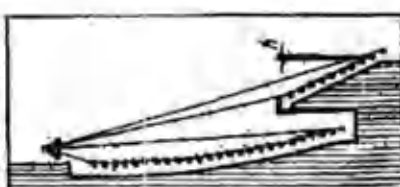


Рисунок 5.37 – розташування сидячих місць для прямого озвучування. Рекомендується перевищення висоти сидінь між сусідніми рядами h приблизно на 8 см.

	1	2	3	4
$S_n/S_{\text{заг}}$	0,63	0,55	0,62	0,66
d/d_1	1	0,83	0,61	0,64

мають другорядне значення і можуть тому сильно коливатися.

Істотним є вимога до достатнього озвучення слухачів при рівномірному рівні прямого та дифузного звуку у всіх зонах приміщення. Це можливо при найменшому видаленні джерела звуку від слухача, визначених формах приміщення за рівної кількості слухачів. На рис. 5.36 представлені чотири принципово різні плани приміщення. Прямокутне приміщення витягнутої форми не є оптимальним рішенням. Однак навіть за сприятливих варіантів необхідний рівень забезпечується лише для певної зони. Оскільки рівень дифузного звуку у всіх зонах приміщення є рівномірним, а рівень прямого звуку з відстанню знижується, теоретична вимога про однакові умови для обох рівнів у великих приміщеннях не може бути забезпечена. Його слід замінити на більш високий рівень прямого звуку для кожного слухача.

При цьому слід мати на увазі, що відстань до глядачів може бути зменшена як шляхом вибору сприятливої форми плану, так і шляхом підвищення рівня підлоги приміщення. Дослідження показали, що підвищення висоти рядів h на 8 см може бути достатнім і до нього слід прагнути (рис. 5.37).

Ще один шлях зміни відстані між слухачами та джерелом звуку в дуже великих приміщеннях – використання балконів і галерей. Ці заходи бажано поєднати з підвищенням висоти розташування джерела звуку, тому що завдяки цьому відразу досягається поліпшення озвучування прямим звуком.

5.16 Пристрої, що регулюють акустику приміщень.

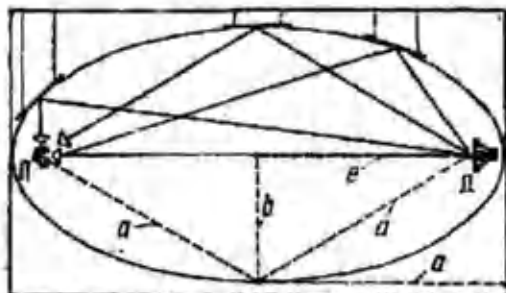


Рисунок 5.38 – Еліпс відбивання. Основними геометричними параметрами еліпса є a, b, e ($a^2 = b^2 + e^2$). Якщо джерело звуку Д і приймач П розташовані в фокусах еліпса, усі звукові промені мають довжину ℓ , рівну $2a$. Різниця довжин шляхів звуку у всіх випадках складає $\Delta\ell = 2a - 2e$

Відбивачі. Відбивачі підсилюють прямий звук у великих приміщеннях, створюючи хорошу чутність. В якості відбивачів можуть бути використані поверхні, що володіють високим коефіцієнтом відбиття ρ і мають достатню величину по відношенню до довжини хвилі звуку, що відбивається.

Для геометричного визначення місць розташування відбивачів в приміщенні використовується показаний на рис. 5.38 спосіб контролю довжини шляхів.

Дифузори. Відбивачами особливого виду є дифузори. Вони призначені для створення рівномірного, дифузного звукового поля шляхом ненаправленого, розсіяного відображення і ефективні лише в зонах частот, довжини хвиль яких менша, ніж розміри дифузорів.

Поглиначі. Звук поглинається, коли частина падаючої на поверхню звукової енергії не відбивається, а проникає в конструкцію і переходить в теплову енергію. При цьому розрізняють два види поглиначів – пористі і механічні, звані також резонаторами. При використанні пористих поглиначів коефіцієнт поглинання α

залежить від аеродинамічного опору матеріалу. Наявність великої кількості дрібних пір створює високий аеродинамічний опір, це лише в певному інтервалі розміру пор.

Аеродинамічний опір матеріалу поряд з виглядом і розташуванням пір залежить також від його товщини. З підвищенням товщини шару збільшується поверхня тертя і тим самим аеродинамічний опір. При цьому коефіцієнт поглинання має граничні значення, які досягаються, коли по мірі збільшення товщини шару аеродинамічний опір стає таким великим, що звукові хвилі не можуть проникнути в глибину матеріалу. Зони шару, розташовані



Рисунок 5.39 – Ефективна товщина пористих поглиначів: а – звук, що впливає на огорожу; r_1 – відбитий абсорбуючою поверхнею звуковий промінь; r_2 – відбитий від задньої стіни огороження звуковий промінь; 1 – внаслідок малої товщини шару звук відбивається задньою стіною; 2 – внаслідок великої товщини частина шару не працює; 3 – ефективна товщина шару

ристі поглиначі ефективні тоді, коли коливальний рух молекул повітря стає найбільш інтенсивним, або, іншими словами, швидкість звуку досягає максимуму. Таким чином, пористий поглинач забезпечує оптимальну ефективність у тому випадку, коли хвиля в своїм максимумом швидкості знаходиться в шарі. Тому товщина матеріалу повинна бути рівна не менше чверті довжини хвилі. Це обставина – причина поганої поглинаючої дії пористих матеріалів у зоні низьких частот.

В основі наведених стверджень лежать наступні міркування. При падінні звукової хвилі на звуконепроникну відбиваючу стіну

глибше, стають, таким чином, неефективними для звукопоглинання. Тому в залежності від специфічного аеродинамічного опору і фактичного рівня шуму може бути визначена максимальна ефективна товщина поглинаючого матеріалу (рис. 5.39).

До теперішнього часу різниця в довжинах хвиль не враховувалася, хоча вона відіграє істотну роль. По-

швидкість хвилі v стає рівною 0. Внаслідок цього на відстані від стіни, що дорівнює $\lambda/4$, швидкість звуку максимальна. Якщо звукопоглинальний матеріал встановлено на відстані, відповідній одній чверті довжини хвилі, то в цьому випадку матеріалом охоплюється зона максимальної швидкості, що збільшує ефективність пористого поглинача для відповідної зони (рис. 5.40, 5.41). При визначенні часу реверберації зазначалося, що внаслідок ди-

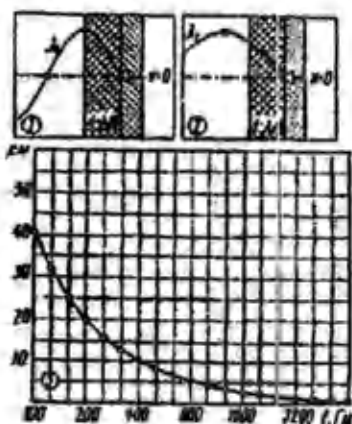


Рисунок 5.40 – Вплив товщини шару пористого поглинача: 1 – товщина шару $d = \lambda_1/4$; максимум швидкості звукових хвиль довжиною λ_1 розташований в шарі пористого матеріалу; 2 – товщина шару $d = \lambda_2/4$; максимум швидкості звукових хвиль довжиною λ_2 розташований поза шаром пористого матеріалу, ефективність шару зменшується; 3 – необхідна товщина шару ізоляції d для $\alpha = 0,8$ в залежності від частоти f

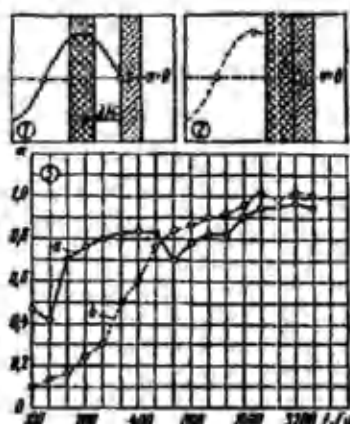


Рисунок 5.41 – Вплив відстані між пористим поглиначем і стіною: 1 – звукопоглинальний шар розташований на відстані $\lambda/4$ від стіни, максимум швидкості звукових хвиль знаходиться в товщі шару; 2 – звукопоглинальний шар розташований безпосередньо на стіні, максимум швидкості знаходиться поза шаром, його ефективність зменшується; 3 – коефіцієнт звукопоглинання α плити з мінерального волокна товщиною 40 мм; а – відстань між звукопоглинаючим шаром і стіною 27 см; б – шар прикріплений безпосередньо до стіни

фракції може відбутися підвищення коефіцієнта звукопоглинання. Явище огинання виникає тоді, коли поглинаючі поверхні по-

риваються відбиваючими. У цьому випадку звукові хвилі, огинаючи краї поверхні і проникаючи в звукопоглинальний матеріал, вносять до нього додаткову енергію. Це явище також залежить від частоти. Щоб підвищити поглинаючу дію матеріалу в певній смузі частот, краї поглинаючої поверхні повинні бути розташовані від найближчого краю відбиваючої поверхні не менше, ніж на відстані $0,75 \lambda$.

У будівельній акустиці часто зустрічається здатна до коливань резонансна система. Остання утворюється при поєднанні компонентів маса-пружина-маса, комбінація яких залежно від величини маси та жорсткості пружини викликає явище резонансу. Резонансна або власна частота f_0 знижується при збільшенні маси поверхні і зниження жорсткості пружини, причому «маса» і «пружина» інтерпретуються довільно. У стані резонансу необхідний лише незначний імпульс енергії, щоб зберегти коливання системи. З іншого боку, перенесення звуку через таку систему під час резонансу значно посилюється, і втрати звукової енергії, тобто поглинення її приміщенням, стають високими. Це поглинання характеризується частотною залежністю.

Розрізняють два типи резонаторів (або резонансних поглиначів) - плитний і Гельмгольца.

Плитний резонатор являє собою систему, маса якої утворюється відносно тонкими, але щільними плитами (наприклад, з фанери, гіпсокартону) і пружиною, у якості якої виступає повітряний зазор між масивною конструкцією і установленою перед нею на відстані d_0 (см) плитою.

Плитні резонатори використовуються при звукових коливаннях у смузі частот від низьких до середніх, при цьому в порівнянні з пористими поглиначами вони перекривають лише вузьку смугу частот.

Особливою формою плитних резонаторів служать перфоровані, які так само ефективні, як і плитні резонатори. Поряд з відстанню d_0 вирішальне значення має «ефективна маса отворів», величина якої визначається числом і розмірами отворів.

Принципове пристрій резонаторів Гельмгольца показано на рис. 5.42. Як і в перфорованих плитних резонаторах, маса резонаторів Гельмгольца утворюється горловиною резонатора, пружина

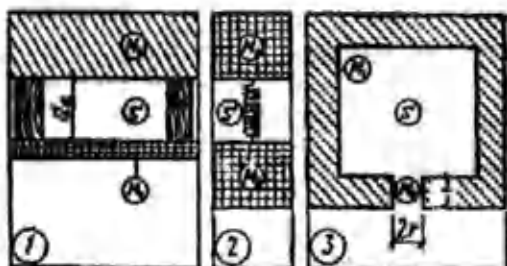


Рисунок 5.42 – Типи резонансних звукопоглиначів: 1 – плитний резонансний звукопоглинач: маса M (наприклад, стіна або плита перекрыття), пружина S' (наприклад, повітряний прошарок); маса M_2 (наприклад, плита з гіпсокартону); 2 – система маса-пружина-маса; 3 – резонатор Гельмгольца: маса M_1 (ящик з ДСП і т.і.), пружина S' (об'єм повітря), маса M_2 (об'єм горловини резонатора)

–об'ємом повітря, що перебуває у камері. При цьому смуга резонансних частот може бути збільшена шляхом встановлення пористих матеріалів у горловині резонатора. Застосування резонаторів Гельмгольца, велика ефективність яких унаслідок низьких резонансних частот лежить саме в цій смузі частот, дозволяє створити приміщення з необхідними акустичними властивостями.

Поверхні, що обмежують приміщення. Форма і характер поверхонь, що обмежують приміщення, мають для акустики велике значення. Наявність поверхонь, що відображають і поглинають, а також форма приміщення в значній мірі сприяють регулюванню рівня звуку. Якщо площа поверхонь, що відбивають, недостатня для підвищення рівня звуку або з-за своєї геометрії не придатна для того, щоб забезпечити необхідні відображення в певні зони приміщення, слід влаштовувати додаткові відбивачі. Через занадто великі різниці часу проходження звуку може виникнути відлуння, тому шлях відбитого звуку не повинен перевищувати шлях прямого звуку більше ніж на 17 м (відстань, яку проходить звук швидкістю 340 м/с за час 50 мс (максимально можливий час між приходом звукових променів)). Якщо відбивачі мають форму еліпса, то різниця $\Delta l = 2a - 2e$ не може перевищувати 17 м.

На рис. 5.38 показані можливі варіанти встановлення відбивачів, які рекомендується розташовувати якомога ближче до джерела звуку. При відповідному виборі матеріалу, що відбиває, і його

го розмірів слід впливати на смугу частот посиленого звуку. Однак для підтримки прямого звуку відбивачами відстань між джерелом звуку і останнім рядом слухачів не повинно бути більше 7-10 м. Для рівномірного розподілу рівня звуку в приміщенні необхідно запобігати його концентрації, що може бути створена відбивачами. Небезпека цього явища особливо велика при наявності увігнутої поверхні огороження. Тому необхідно передбачати опуклу форму поверхні огорожень (рис. 5.43).

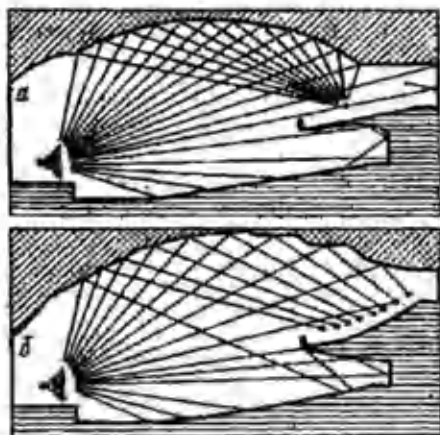


Рисунок 5.43 – Концентрація звуку увігнутою поверхнею перекриття. Запобігання концентрації звуку опуклими (а) або розсіюючими (б) поверхнями перекриттів

Поверхні, що відбивають сильно поглинаючими матеріалами, і особливу увагу потрібно приділяти обробці огорожень, що зазнають максимального звукового тиску (задня стіна приміщення).

Для запобігання вібруючій луни застосовується також спеціальна обробка поверхонь стін і перекриттів. Наприклад, при паралельно розташованих конструкціях звук відбивається дифузно. Таке відображення, що сприяє також запобігання концентрації звукової енергії, досягається шляхом установки дифузорів. В якості останніх служать циліндричні, трикутні, пилоподібні та зубчасті поверхні або кесони (рис. 5.44). Ефективно також пластичне членування стін вікнами і простінками, причому відкоси вікон повинні бути глибиною не менше 50 см, а простінки, що залишають між ними – від 50 см до 2 м. Подібних результатів можна досягти створенням по всій поверхні поверхонь, що чергуються і поглинають чи відбивають.

Слід також відзначити, що дифузори у великих приміщеннях

простої геометричної форми (квадратної або кубічної) потрібніше, ніж у приміщеннях більш складної конфігурації.

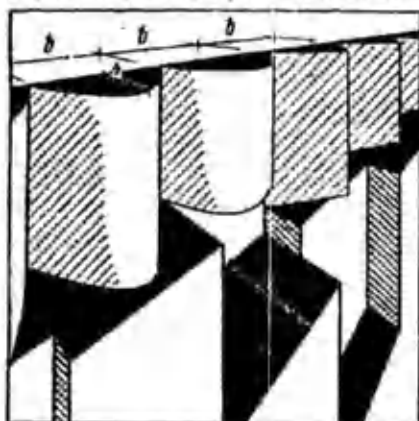


Рисунок 5.44 – Дифузори з циліндричних, трикутних, пілоподібних призм та квадратних кесонів: b – від 0,8 до 2 м; h – від 0,4 до 0,5 м.

Досягнення оптимального часу реверберації забезпечується застосуванням відповідних звукопоглинаючих матеріалів.

Застосування різних типів поглиначів залежить від ступеня їх поглинаючої дії. Так, пористі поглиначі володіють, як правило, широкосмуговою, а в зоні низьких частот – поганою поглинаючою здатністю. Ці негативні фактори можуть бути поліпшені різними конструктивними заходами. Крім того, при поділі поглинаючої поверхні

на безліч окремих ділянок, вкритих відбиваючими матеріалами, коефіцієнт поглинання може бути підвищений для бажаної смуги частот. Однак внаслідок великих відстаней між поверхнями, в основному в смузі низьких частот, для яких цей спосіб був би особливо ефективний, ця можливість практично не використовується.

5.17 Акустика відкритих театрів

При акустичному проектуванні відкритих театрів необхідно враховувати:

- особливості поширення звуку за різних атмосферних умов;
- акустичні характеристики навколишньої місцевості (шумовий фон, епізодичні шуми та ін.);
- універсальність призначення відкритих театрів, що використовуються для концертних, оперно-драматичних, хореографічних, хорових виступів, а також для демонстрації кінофільмів і т.і.

При поширенні сферичних хвиль від точкового джерела звуку різниця в рівнях звукового тиску ΔL в точках, що знаходяться від джерела на відстані D_1 і D_2 , визначається формулою

$$\Delta L = 20 \lg \frac{D_1}{D_2}.$$

З цієї формули можна визначити, що рівень акустичного тиску зменшується на 20 дБ при кожному збільшенні відстані в 10 разів або на 6 дБ – при його подвоєнні.

На поширення звуку в атмосфері суттєво впливають напрям і швидкість вітру, а також розподіл температури повітря з віддаленням від поверхні землі. Вітер і розподіл температури повітря за висотою відчутно впливають на швидкість поширення звуку.

При збігу напрямів вітру і поширення звукових хвиль результуюча швидкість рівна сумі швидкостей звуку і вітру; при цьому спостерігається «притискання» звукових хвиль до землі.

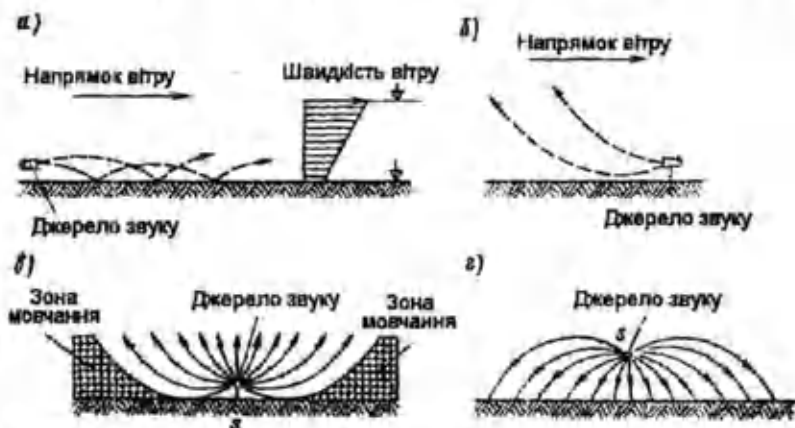


Рисунок 5.45 – Вплив вітру і температури на хід звукових хвиль
 а – напрямок вітру співпадає з напрямком поширення звукових хвиль;
 б – напрямок вітру протилежний до напрямку поширення звукових хвиль;
 в – схема викривлення руху звукових променів від точкового джерела при зниженні температури повітря при віддаленні від поверхні землі;
 г – схема викривлення руху звукових променів від точкового джерела при збільшенні температури повітря при віддаленні від поверхні землі на деяку висоту

Навпаки, при протилежному напрямленні поширення звуку і вітру сумарна швидкість звукових хвиль рівна різниці швидкостей звуку і вітру; в цьому випадку спостерігається «відрив» звукових хвиль від землі. Схеми цих двох протилежних випадків наведені на рис. 5.45 (а також на рис. 5.10, 5.11). Таким чином, при виборі варіантів розташування відкритого театру щодо пануючих за літній період вітрів (сезонна роза вітрів) слід віддавати перевагу розташуванню поздовжньої осі театру так, щоб напрям пануючих вітрів співпадав з напрямом від сцени (або естради) до амфітеатру, а не навпаки.

На рис. 5.46 наведена схема, що характеризує вплив вітру на

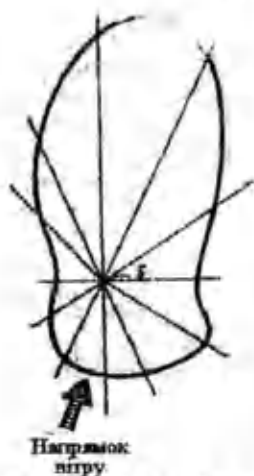


Рисунок 5.46 – Вплив вітру на рівень звукового тиску при різних напрямках поширення звуку

рівень звукового тиску у різних напрямках. Вектор, проведений з точки, де розташовується точкове джерело звуку, характеризує амплітуду звукової хвилі в даному напрямі при постійній заданій відстані від джерела звуку. При порівнянні довжини цих векторів можна бачити, що амплітуда коливання звукової хвилі, що поширюється у напрямі вітру, майже втричі більше амплітуди коливання в напрямі, протилежному дії вітру.

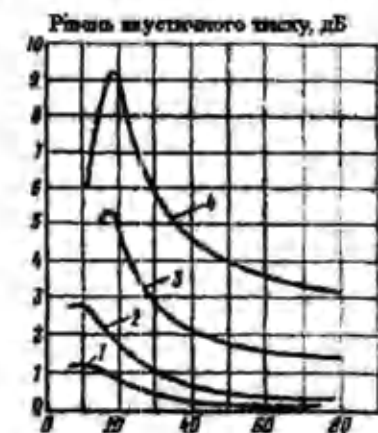
Впливає на поширення звуку у відкритому театрі і розподіл температури повітря за висотою. У найчастіших випадках коли температура повітря з відстанню від землі знижується, випромінювані джерелом верхні звукові хвилі поширюються сповільнено в порівнянні з нижніми, що приводить до згинання вгору фронту звукових хвиль.

Проте при розташуванні відкритих театрів в деяких долинах гір спостерігається підвищення температури повітря із віддаленням від землі. У цих випадках звукові хвилі верхнього рівня володіють підвищеною швидкістю в порівнянні із звуковими хви-

лями в долинах; в результаті фронт звукових хвиль в таких місцевостях згинається у напрямку до землі. Багато разів підбиваю-

чись від землі і верхніх тепло-
вих шарів повітря, звукова ене-
ргія збільшує акустичний тиск
на території відкритого театру.

Внаслідок нерівномірного
поглинання повітрям звуків рі-
зної частоти виникає необхід-
ність при акустичному проєк-
туванні відкритих театрів пе-
редбачати архітектурно-
будівельні заходи і засоби для
збереження природності зву-
чання. До них відносяться фо-
рма і конструкція акустичних
раковин, застосування резона-
торів і ін. Звукові спотворення
особливо суттєві в повітрі з ви-
сокою відносною вологістю. На
рис. 5.47 наведені криві загас-
ання плоских звукових хвиль
високих частот (від 1500 до
10 000 Гц) при температурі по-
вітря 20°C залежно від відносної вологості повітря. Загасання
звуку виражається в дБ на кожні
30 м відстані від джерела звуку.



Відносна вологість повітря, %

Рисунок 5.47 – Лінії зменшен-
ня рівня звуків високої частоти
в залежності від відносної во-
логості повітря (в дБ на кожні
30 м відстані до джерела звуку)
1 - частота коливань 1500 Гц;
2 – 3000 Гц; 3 – 10 000 Гц

вітря 20°C залежно від відносної вологості повітря. Загасання
звуку виражається в дБ на кожні
30 м відстані від джерела звуку.

Знаючи відносну вологість повітря влітку, можна визначити
зниження рівня акустичного тиску в амфітеатрі залежно від зада-
ної відстані глядача до джерела звуку.

Приклад. Визначити зниження рівня акустичного тиску в ам-
фітеатрі на відстані 30 і 60 м від джерела звуку при відносній во-
логості повітря 50%.

По графіку на рис. 5.47 знаходимо, що зниження складає від-
повідно 4 і 8 дБ.

Коливання повітря (флуктуації), які виникають унаслідок різ-
ного нагрівання сонцем поверхонь територій з неоднорідним під-
стилаючим шаром (пісок, трава, чагарник, скеля і т. п.) суттєво

впливають на якість акустики відкритих театрів. Ці флуктуації найістотніше впливають на якість звучання, коли підстилаючий шар володіє високим альбедо (альбедо – фізична величина, що описує здатність поверхні відбивати та розсіювати випромінювання (світло); взагалі альбедо — це відношення потоку відбитого (розсіяного) поверхнею у всіх напрямках випромінювання до потоку падаючого випромінювання).

Для врахування акустичних особливостей місця будівництва відкритого театру архітектору необхідно перед проектуванням мати в своєму розпорядженні дані з результатами ретельного вивчення метеорологічних і акустичних характеристик місцевості. Це дозволить йому встановити важливі початкові положення:

можливість виникнення на території театру луни від навколишніх гір, лісу, будівель і споруд;

розрахункові рівні зовнішнього шуму: від автостради, стадіону та ін.;

ступінь захищеності відкритого театру від вітру.

При цьому треба враховувати наступні вимоги норм проектування: рівень звукового тиску в амфітеатрі не повинен перевищувати 40 дБ, а швидкість вітру повинна бути не більше 4 м/с.

Гранично допустима відстань між глядачами і джерелом звуку визначається призначенням споруди. При необхідності гарної розбірливості мови в місцях, віддалених від естради, складова артикуляція повинна бути не менше 75%. На рис. 5.48 приво-

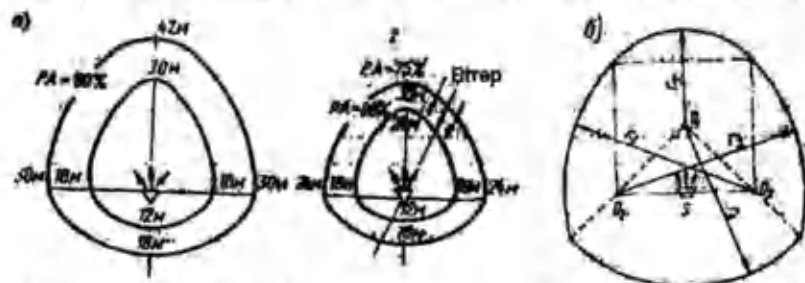


Рисунок 5.48 – Криві 75% артикуляції. Розбірливість мови за відсутності вітру задовільна: а – характер кривих рівної артикуляції; 1 – за відсутності вітру; 2 – при швидкості вітру 10 м/с; б – графічний спосіб побудови форми відкритого театру із задовільною чутністю на всіх місцях

дяться криві артикуляції, одержані експериментальним шляхом, і спосіб побудови форми амфітеатру, що забезпечує задовільну чутність звучання.

Для відкритих драматичних або естрадних театрів межа віддаленості без звукопідсилення звичайно обмежується 30 м при місткості від 1500 до 2500 чоловік. Проте за наявності гарної захищеності амфітеатру від шуму і вітру вказана віддаленість останнього ряду місць від естради може бути збільшена до 40 м.

Схема архітектурного рішення відкритого драматичного або естрадного театру приведена на рис. 5.49, а. Геометричні характеристики його такі: довжина по подовжній осі 40 м;

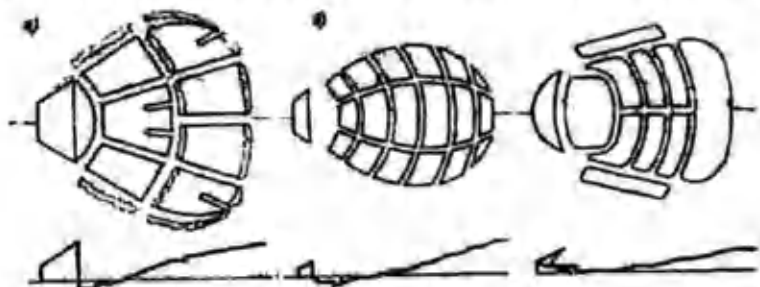


Рисунок 5.49 — Схеми архітектурних розв'язків відкритих театрів різного призначення: а — естрадних театрів (довжина 40 м; найбільша ширина $2 \cdot 26,5 = 53$ м; ухил підлоги $12-15^\circ$); б, в — для концертних виступів (симфонічні оркестри, хорові ансамблі та ін.)

найбільша ширина $2 \cdot 26,5 = 53$ м; ухил місць $12-15^\circ$.

У відкритих спорудах, призначених для виступів симфонічних оркестрів, ансамблів і обладнаних акустичними раковинами і системами звукопідсилення (рис. 42, б, в), допускається віддаленість глядачів від естради до 165 м вздовж осі, $2 \cdot 75 = 150$ м — найбільша ширина.

Важливими елементами відкритих театрів є акустичні раковини і екрани, вони дозволяють створити рівномірне звукове поле і підвищити рівень акустичного тиску в найвіддаленіших від сцени місцях, а також забезпечити можливість виконавцям (оркестрантам, хористам і ін.) на естраді добре чути один одного, що дуже важливо для синхронізації і балансування виконання. Останнє набуває особливого значення для відкритих театрів

з естрадою, розрахованою на виступ великих хорів.

Найбільший інтерес являють раковини конічної і сферичної форм. Стеля раковини розташовується під кутами, які сприяють відбиванню звукової енергії в напрямі, паралельному профілю підлоги амфітеатру. У загальному випадку нахил стелі до горизонту, оцінюваний кутом α , визначається з виразу

$$\alpha = 45 + \theta^{\circ} / 2$$

де θ – кут нахилу підлоги амфітеатру.

Хороші приклади рішень задач акустики відкритих театрів можна знайти при вивченні архітектурних пам'яток минулого. Висхідні до своєї старовини споруди відкритих театрів відрізняються не тільки логікою просторового рішення, але й знанням законів поширення звуків в атмосфері. Умови хорошої акустики – ретельний вибір місця розташування театрів з урахуванням особливостей поширення звуків в атмосфері і раціональне використання відбитої звукової енергії.

Відсутність стін і стель у відкритих театрах стародавньої Греції виключило можливість виникнення реверберації. Проте відсутність поверхонь, що відбивають, супроводжувалася значним зменшенням акустичного тиску в місцях розташування глядачів, віддалених від «оркестри».

Для заповнення недостатньої прямої звукової енергії використовувалися відбиті звукові хвилі від підлоги «оркестри», а також від стін сценічної будівлі (ськене), а для посилення голосу акторів – маски з рупороподібним отвором рота.

Для пожвавлення звуку і додавання йому природності в грецьких театрах застосовувалися металеві судини, що встановлювались в цішах на деякій висоті, перекинуті відкритою частиною вниз. Вони резонували звуки середньої і високої частот.

Грецькі театри розташовувалися на природних схилах горбів адаліні від міського шуму. Схема цих театрів наведена на рис. 5.50. Дані про їх місткість і розміри наведені нижче:

Театри	Найбільша відстань від центра "оркестри", м	Діаметр "оркестри", м	Місткість театру, осіб	Нахил, град
Театр Діонісія (Афіни)	85	27,4	14000-17500	20
Театр в Ефесі	76	24,66	23000-28700	26

Римські театри звичайно влаштовувалися за містом і були єдиною архітектурною спорудою у вигляді розташованих півколом терас, органічно пов'язаних з сценою (рис. 5.51). «Орхестра» мала форму півкола, поступово вона перетворилася на подіум заввишки 1-1,3 м, обмежений подовжньою і бічними стінами.

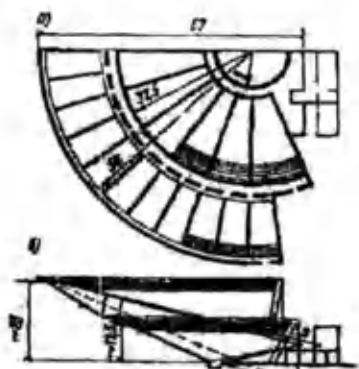


Рисунок 5.50 - Схема відкритого театру давньої Греції:

а - план; б - поздовжній розріз

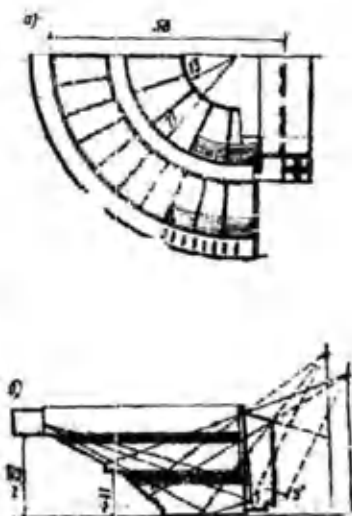


Рисунок 5.51 - Схема відкритого театру давнього Риму:

а - план; б - поздовжній розріз

Прекрасна акустика римських театрів і одеонов створювала-ся завдяки сукупності архітектурних і конструктивних засобів, до основних з них відносяться:

надійна захищеність амфітеатру (кавеа) від зовнішнього шуму і вітру;

напівкругла форма споруди і амфітеатру, що наближає глядачів до сцени;

форма і глибока пластика сцени, зробленої з природного каменя великої густини;

крутий підйом місць, забезпечуючий безперешкодне поширення прямих і відбитих звуків;

пристрій резонуючої галереї по периметру амфітеатру, що підвищує рівень звуку у віддалених місцях амфітеатру.

Контрольні запитання

1. Що таке хвиля? Чим хвиля відрізняється від коливання?
2. Поясніть терміни: довжина хвилі, частота хвилі, амплітуда хвилі, фаза, хвильовий фронт, хвильовий промінь.
3. В чому відмінність поперечних і повздовжніх хвиль. Звукові хвилі які?
4. Що називають "звуковим тиском", "акустичним опором"?
5. В чому різниця між швидкістю поширення хвилі і швидкістю коливань?
6. Що характеризує інтенсивність звуку?
7. Поясніть термін "октава".
8. В чому полягає явище інтерференції хвиль?
9. Що відбувається із траєкторією поширення звуку в атмосфері при зміні швидкості звуку?
10. В чому полягає явище дифракції хвиль?
11. Який зміст мають криві рівної гучності?
12. Поясніть термін "постійна часу слуху".
13. В чому полягає ефект маскування?
14. Поясніть основи статистичної теорії акустичних процесів у закритому приміщенні.
15. Поясніть терміни "середній час і довжина вільного пробігу хвилі".
16. Який зміст має термін "час реверберації"?
17. Поясніть основи хвильової теорії акустичних процесів у закритому приміщенні.
18. Поясніть терміни "акустичне відношення" і "ефективна реверберація".
19. Наведіть, які знаєте оцінки музично-акустичної якості.
20. Від чого залежить розбірливість мовлення в приміщенні?
21. Опишіть пристрої, за допомогою яких регулюють акустику приміщення.
22. Що необхідно враховувати при проектуванні відкритих театрів?

Розділ 6. ЗВУКОІЗОЛЯЦІЯ

6.1 Поширення шуму в приміщеннях

Причиною виникнення шуму в будинках є як внутрішні, так і зовнішні джерела. До внутрішніх джерел належать інженерне і санітарно-технічне обладнання, гучна музика, танці та ін.; до зовнішніх - транспорт, промислові підприємства та ін. У практиці боротьби з шумом використовують такі методи: боротьба з шумом в джерелі, звукопоглинання, звукоізоляція. Крім того, істотним чинником боротьби з шумом може служити архітектурно-планувальне рішення, наприклад розташування тихих приміщень далеко від шумних будівель і т.і.

Шум у будівлях за характером виникнення поділяється на **повітряний** (1), який виникає в повітрі і ударний (2), який виникає на поверхні огорожень.

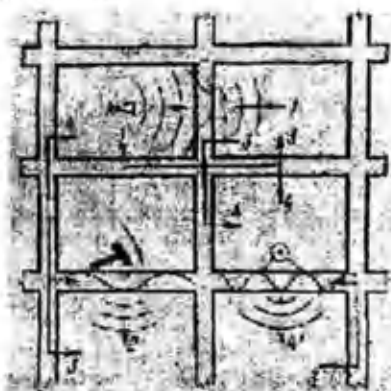


Рисунок 6.1 – Поширення шуму в будівлі

Шляхи передачі шуму в ізольоване приміщення можуть бути **прямими** (1 і 2) і **непрямими** (обхідними) (3 і 4) (див. рис. 6.1). Така передача можлива в результаті того, що коливання, які викликаються повітряним або ударним шумом, поширюються конструкціями всієї будівлі. Вібруючі конструкції випромінюють шум у приміщення, розташовані навіть на значній відстані від джерела, такий шум часто називають **структурним**. Структурним буде також шум при випромінюванні його конструкцією, жорстко

пов'язаною з вібруючими механізмами, наприклад насосними, вентиляційними або ліфтовими установками 4'. У цьому випадку шлях 3 буде непрямим по відношенню до прямого 4'.

При поширенні шуму по будівлі непрямыми шляхами відбувається зменшення його інтенсивності внаслідок поглинання енергії коливаних матеріалами конструкцій, втратою енергії в стиках і розподілу енергії на все більшу площу перерізу.

У сучасних будівлях за рахунок зниження маси огорожувальних конструкцій, збільшення жорсткості сполучень в стиках і зменшення їх числа спостерігається більш інтенсивна передача шуму за непрямыми шляхами. У результаті шум поширюється з малим загасанням на великі відстані від джерела, що призводить до дискомфортичних умов у низці приміщень.

Застосовувані розрахункові методи дають можливість оцінити непряму передачу шуму лише для деяких ідеалізованих схем будівель. Складність вирішення даного питання полягає в тому, що по конструкціях будівлі можуть поширюватися чотири основних типи пружних хвиль: поздовжні, згинні, зсувні і крутильні, які трансформуються при проходженні через стики з різним внеском у випромінювання шуму. Велика кількість параметрів хвильового руху утрудняє аналіз отриманих рішень.

Надалі розглянемо тільки прямі шляхи передачі звукової енергії.

Ізоляція повітряного шуму огорожувальною конструкцією, визначена за умови відсутності обхідних шляхів передачі звуку, є звукоізолюючою здатністю даної конструкції [17].

Відношення енергії E_{np} , що пройшла через конструкцію, до енергії $E_{пад}$, що падає на неї, називається коефіцієнтом звукопередачі $\tau = E_{np} / E_{пад}$. Звукоізоляція конструкцій без врахування непрямої передачі при дифузному падінні звуку дорівнює

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{E_{пад}}{E_{np}}.$$

На практиці, ізоляцію повітряного шуму зовнішніми огороженнями приміщення R визначають (згідно [18], [19], [20]) у кожній смузі частот за формулою

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{4S \cos \theta}{A} \right),$$

де L_1 і L_2 – середні рівні звукового тиску у смугах частот відповідно перед фасадом будівлі і в приміщенні, де сприймається шум; S – площа огороження, крізь яке проникає шум A – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, куди проникає шум; θ – кут падіння звуку, що випромінюється гучномовцем, встановленим ззовні будинку, на площину даного огороження (між віссю гучномовця і перпендикуляром до площини елемента фасаду).

Ізоляцію повітряного шуму внутрішньою перегородкою, яка розділяє приміщення, розраховують у смугах частот за формулою

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}$$

де L_1 і L_2 – середні рівні звукового тиску у смугах частот відповідно в приміщенні з джерелом шуму і в приміщенні, яке захищається від шуму; S – площа перегородки, крізь яку проникає шум; A – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, що захищається від шуму.

Захист від шуму ударного походження, який виникає в результаті динамічних впливів на елементи споруд (пересування предметів або рух людей по підлозі, сходах тощо) і передається з одного приміщення в інше, визначається величиною приведенного рівня ударного шуму L'_n в приміщенні, де сприймається шум, і розраховується в смугах частот за формулою

$$L'_n = L_1 + 10 \lg \frac{A}{A_0},$$

де L_1 – середній рівень звукового тиску у приміщенні, де сприймається шум, при роботі на перекритті стандартної ударної машини; A – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, де сприймається шум; $A_0 = 10 \text{ м}^2$ – величина стандартного звукопоглинання.

Звукоізолююча здатність конструкції R' і приведений рівень ударного шуму L'_n в загальному випадку змінюються зі зміною частоти звуку. Залежність величини R' або L'_n від частоти називається частотною характеристикою. Частотні характеристики R'

і L'_n конструкцій житлових будинків визначають у смугах частот шириною в 1/3 октави і 1 октави (збільшення на 1 октаву відповідає подвоєнню частоти звуку). Для цього при вимірюванні рівнів звукового тиску використовують електричні фільтри з зазначеної шириною пропускання. Зображаючи частотну характеристику графічно, по горизонтальній осі в логарифмічному масштабі відкладають значення середньгеометричних частот смуг шириною в 1/3 октави і 1 октави, а по вертикальній в лінійному масштабі – звукоізолюючу здатність чи приведений рівень ударного шуму в децибелах.

6.2 Нормування звукоізоляції

Нормованими параметрами звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будівель, а також допоміжних будівель і приміщень промислових підприємств згідно [18] є індекс ізоляції повітряного шуму огорожувальної конструкцією I_a і індекс приведенного рівня ударного шуму під перекриттям I_p .

Індекс ізоляції повітряного шуму I_a огорожувальної конструкцією з відомою (розрахованою або виміряною) частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму слід визначати за формулою

$$I_a = 50 + \Delta_a,$$

де Δ_a – поправка, яка визначається шляхом порівняння частотної характеристики ізоляції повітряного шуму огорожувальної конструкцією з нормативною частотною характеристикою ізоляції від повітряного шуму (рис. 6, [18]) за методикою, викладеною в дод. 1 [18].

Індекс приведенного рівня ударного шуму I_p під перекриттям з відомою (розрахованою або виміряною) частотною характеристикою приведенного рівня ударного шуму слід визначати за формулою

$$I_p = 70 - \Delta_p,$$

де Δ_p – поправка, яка визначається шляхом порівняння частотної характеристики приведенного рівня ударного шуму під перекриттям з нормативною частотною характеристикою приведенного рівня

вия ударного шуму (рис. 7 [18]) за методикою, викладеною в дод. 1 [18].

У новішому ДСТУ Б В.2.6-85:2009 у порівнянні з СНиП II-12-77 (який ще діє) змінена форма нормативних кривих, виконана систематизація позначень та змінена форма розрахунку нормованих індексів.

Індекс ізоляції повітряного шуму R'_w огорожувальної конструкції з відомою (виміряною або розрахованою) частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму R' визначається шляхом порівняння цієї частотної характеристики зі стандартною оціночною частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму R_N .

Величини стандартної оціночної частотної характеристики в третиннооктавних смугах частот у нормованому діапазоні від 100 Гц до 3150 Гц (16 третиннооктавних смуг) і величини стандартної оціночної частотної характеристики в октавних смугах частот у нормованому діапазоні від 125 Гц до 2000 Гц (5 октавних смуг) наведені на рисунку 6.2 і в таблиці 6.1.

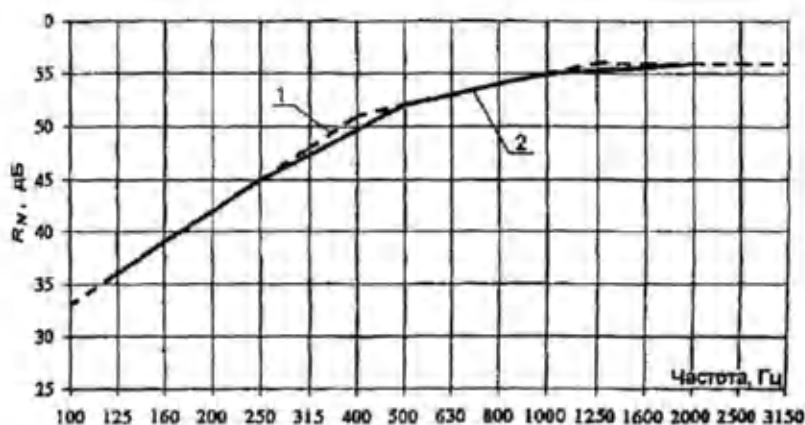


Рисунок 6.2 – Стандартні оціночні частотні характеристики ізоляції повітряного шуму R_N : 1 – для третиннооктавних частотних смуг; 2 – для октавних частотних смуг.

Таблиця 6.1 – Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції повітряного шуму

Середньогеометричні частоти третинно-октавних (октавних) смуг, Гц	Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції повітряного шуму R_N , дБ	
	в третиннооктавних смугах частот	в октавних смугах частот
100	33	
(125)	36	36
160	39	
200	42	
(250)	45	45
315	48	
400	51	
(500)	52	52
630	53	
800	54	
(1000)	55	55
1250	56	
1600	56	
(2000)	56	56
2500	56	
3150	56	
Примітка. Частоти, наведені в дужках, відповідають середньогеометричним частотам октавних смуг		

Для визначення індексу ізоляції повітряного шуму R'_N треба на графік із оціночною характеристикою звукоізоляції R_N нанести частотну характеристику ізоляції повітряного шуму даною конструкцією R' і визначити середній несприятливий відхил частотної характеристики даної конструкції відносно оціночної характеристики.

Несприятливими вважаються відхилення між характеристиками R_N і R' вниз від оціночної характеристики в тій чи іншій смузі частот. Середній несприятливий відхил становить 1/16 суми всіх несприятливих відхилів для розрахунків у третиннооктавних смугах частот і 1/5 суми всіх несприятливих відхилів для розра-

хунків в октавних смугах частот.

Якщо величина середнього несприятливого відхилю максимально наближається до 2 дБ або дорівнює 2 дБ, але не перевищує цієї величини, то за таких умов величина індексу R'_w становить 52 дБ (числова величина ординати стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц).

Якщо величина середнього несприятливого відхилю перевищує 2 дБ, то оціночну характеристику треба змістити вниз на ціле число децибел так, щоб величина середнього несприятливого відхилю від зміщеної оціночної характеристики знову не перевищувала 2 дБ, але максимально наближалася до 2 дБ.

У цьому випадку за величину індексу R'_w приймається числова величина ординати зміщеної вниз стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц.

Якщо величина середнього несприятливого відхилю менше 2 дБ або несприятливі відхилю відсутні, то оціночну характеристику треба змістити вгору на ціле число децибел так, щоб величина середнього несприятливого відхилю від зміщеної оціночної характеристики максимально наближалася до 2 дБ, але не перевищувала цієї величини.

У такому випадку за величину індексу R'_w приймається числова величина ординати зміщеної вгору стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц.

Індекс ізоляції ударного шуму L'_{nw} міжповерхових перекриттів з відомою (виміряною або розрахованою) частотною характеристикою приведенного рівня ударного шуму L'_n визначається шляхом порівняння цієї частотної характеристики зі стандартною оціночною частотною характеристикою ізоляції ударного шуму L_{nn} .

Величини стандартної оціночної частотної характеристики ізоляції ударного шуму в третиннооктавних смугах частот у нормованому діапазоні від 100 Гц до 3150 Гц (16 третиннооктавних смуг) і величини стандартної оціночної характеристики в октавних смугах частот в нормованому діапазоні від 125 Гц до 2000 Гц (5 октавних смуг) наведені на рисунку 6.3 і в таблиці 6.2.

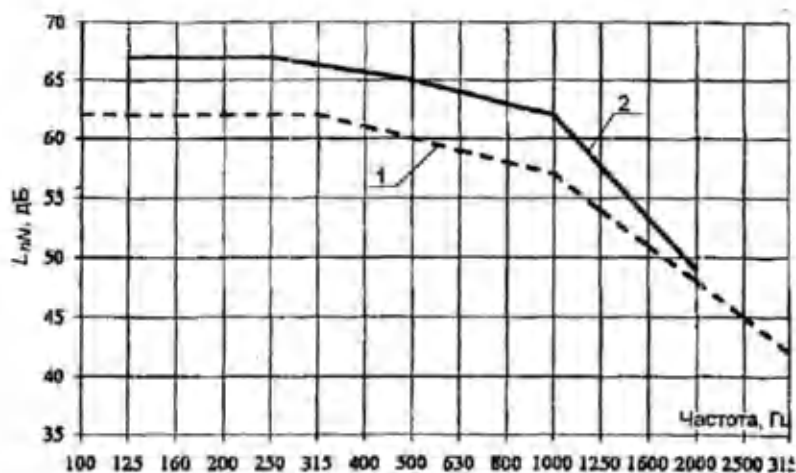


Рисунок 6.3 – Стандартні оціночні частотні характеристики ізоляції ударного шуму $L'_{нн}$: 1 – для третиннооктавних частотних смуг; 2 – для октавних частотних смуг

Для визначення індексу ізоляції ударного шуму $L'_{нн}$ треба на графік із оціночною характеристикою звукоізоляції $L_{нн}$ нанести частотну характеристику приведеного рівня ударного шуму $L'_н$ і визначити середній несприятливий відхил частотної характеристики даної конструкції міжповерхового перекриття відносно оціночної характеристики.

Несприятливими вважаються відхилення між характеристиками $L_{нн}$ і $L'_н$ вгору від оціночної характеристики в тій чи іншій смузі частот. Середній несприятливий відхил становить 1/16 суми всіх несприятливих відхилів для розрахунків у третиннооктавних смугах частот і 1/5 суми всіх несприятливих відхилів для розрахунків в октавних смугах частот.

Якщо величина середнього несприятливого відхилення максимально наближається до 2 дБ або дорівнює 2 дБ, але не перевищує цієї величини, то за таких умов величина індексу $L'_{нн}$ становить 60 дБ (числова величина ординати стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц).

Якщо величина середнього несприятливого відхилення перевищує 2 дБ, то оціночну характеристику треба змістити вгору на ці-

іє число децибел так, щоб величина середнього несприятливого відхилення від зміщеної оціночної характеристики знову не перевищувала 2 дБ, але максимально наближалася до 2 дБ.

Таблиця 6.2 – Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції ударного шуму

Середньгеометричні частоти третинно-октавних (октавних) смуг, Гц	Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції ударного шуму $L_{тн}$, дБ	
	в третиннооктавних смугах частот	в октавних смугах частот
100	62	
(125)	62	67
160	62	
200	62	
(250)	62	67
315	62	
400	61	
(500)	60	65
630	59	
800	58	
(1000)	57	62
1250	54	
1600	51	
(2000)	48	49
2500	45	
3150	42	
Примітка. Частоти, наведені в дужках, відповідають середньгеометричним частотам октавних смуг		

У цьому випадку за величину індексу $L'_{нн}$ приймається числова величина ординати зміщеної вгору стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц.

Якщо величина середнього несприятливого відхилення менше 2 дБ або несприятливі відхилення відсутні, то оціночну характеристику треба змістити вниз на ціле число децибел так, щоб величина середнього несприятливого відхилення від зміщеної оціночної характеристики максимально наближалася до 2 дБ, але не перевищувала цієї величини.

У такому випадку за величину індексу L'_{nw} приймається числова величина ординати зміщеної вниз стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц.

Методика визначення індексу ізоляції ударного шуму, наведена вище, застосовується тоді, коли індекс визначається за частотною характеристикою, наданою в третиннооктавних смугах частот.

При визначенні індексу ізоляції ударного шуму за частотною характеристикою приведенного рівня ударного шуму, надаємо в октавних смугах, процедура його визначення є такою самою з відмінністю, яка полягає тільки в тому, що величина індексу приймається за числовою величиною ординати стандартної оціночної характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц (зміщеної вгору чи вниз або не зміщеної), зменшеною при цьому на 5 дБ.

6.3 Вплив характеристик конструкцій і матеріалів на ізоляцію повітряного шуму

Найважливішим параметром огорожувальних конструкцій, що дозволяє класифікувати їх залежно від характеру проходження звуку та формування звукоізоляційних якостей, є структура огорожі. За цією ознакою їх поділяють на акустично однорідні і акустично неоднорідні.

Для конструкцій житлових будинків основний вид коливань, що передають звукову енергію з одного приміщення в інше, – згинні коливання. Від структури огорожі залежить, коливається вона як єдине ціле чи окремі її шари або елементи скоюють різні за амплітудою і фазою коливання.

До акустично однорідних огорожувальних конструкцій відносять одношарові (у тому числі з невеликими порожнинами) конструкції, а також такі конструкції, що складаються з двох або більше шарів (елементів) твердих матеріалів (бетону, цегляної кладки, розчину, металу, дерева і т.д.), жорстко зв'язаних між собою по всій площі огороження. Такі конструкції коливаються як єдине ціле або відмінностями в коливаннях окремих їх шарів і елементів можна знехтувати.

Порожнини в одношарових конструкціях можна вважати "не-

великими", якщо вони утворюють стінки у вигляді склепіння з круговим або близьким до нього криволінійним обрисом поверхонь, а також стінки з прямолінійним або пологим криволінійним обрисом поверхонь, що задовольняють умові

$$\ell \leq \lambda_s / 4,$$

де ℓ — довжина стінки (у поперечному перерізі); λ_s — довжина згинальної хвилі в стінці.

До акустично неоднорідних відносять конструкції з двох або більше шарів (елементів) твердих матеріалів, розділених повітряним проміжком або звукоізоляційним прошарком, а також одношарові конструкції з великими порожнинами. Окремі шари або елементи таких конструкцій можуть здійснювати згинні коливання, які значно різняться за амплітудою і фазою. Крім того, при загальному згинальному коливанню огорожі, в окремих його прошарках або елементах основна частина звукової енергії може передаватися за допомогою поздовжніх коливань, наприклад в повітряному проміжку або у звукоізоляційному прошарку.

Звукоізоляційним вважається такий прошарок в конструкції, який завдяки своїй деформативності знижує передачу коливань від одного шару твердого матеріалу до іншого в порівнянні з передачею коливань при жорсткому контакті шарів між собою.

При згинальних коливаннях одного з твердих шарів конструкції його поверхня переміщається, викликаючи деформації і напруження в звукоізоляційному прошарку.

Напруга в прошарку і тиск, що чиниться нею на другий твердий шар пропорційні величині

$$S = E_s / h_s$$

де h_s — товщина звукоізоляційного прошарку; E_s — динамічний модуль пружності матеріалу прошарку.

Зазначена величина, яка називається лінійною динамічною жорсткістю — найважливіша характеристика звукоізоляційного прошарку, що визначає ефективність останнього. Чим менше лінійна динамічна жорсткість звукоізоляційного прошарку S , тим більшою мірою знижується передача коливань від одного твердого шару конструкції до іншого. Прошарок з великою лінійною

динамічною жорсткістю практично не знижує передачу коливань. У конструкціях, які застосовуються у житлових будинках, звукоізоляційним шаром є прошарок, у якого $S < 30 \cdot 10^7$ Па/м.

Перш ніж розглядати сучасні теоретичні уявлення про механізм проходження звуку через захисну конструкцію та про формування її звукоізолюючої здібності, пригадаємо деякі основні поняття, пов'язані із звуковими коливаннями повітря в приміщенні і згинаними коливаннями плит.

При збудженні звуку в приміщенні в результаті віддзеркалень від огорожувальних поверхонь звукові хвилі рухаються в будь-яких напрямках. Створюється звукове поле, близьке до дифузного (дифузним вважається одворідне поле, в якому падіння звукових хвиль під будь-яким кутом рівноймовірне). При складанні прямої і відбитої хвиль, що рухаються в зустрічному напрямку, можливе утворення стоячих хвиль. Встановлюються таким чином коливання повітря, що називаються власними коливаннями (модами) приміщення. Моди несуть в собі основну частину звукової енергії, випромінюваної в це приміщення джерелом. На поверхні розглянутого огорожі кожна мода утворює свою форму розподілу звукового тиску, яка характеризується розташуванням вузлових ліній і зон найбільшого тиску. Змінний тиск на поверхні конструкції викликає її коливання. Коливання поверхні огороження, що виходить із ізольоване приміщення, викликає коливання повітря в ньому – відбувається випромінювання звукової енергії в це приміщення.

При ударних впливах на конструкцію процес передачі енергії через неї принципово той же. Проте інтенсивність коливань конструкції визначається в цьому випадку головним чином характеристиками ударної дії, а не звукового поля в приміщенні з джерелом шуму.

Коливання, що здійснюються плитою під впливом зовнішньої змінної сили, наприклад звукового тиску, називаються **вимушеними**. Ці коливання відбуваються з частотою, рівною частоті періодичної зміни збуджуючої сили. Коливання, які плита здійснює, будучи виведеною з стану рівноваги без подальшого впливу збуджуючої сили, називаються **власними**. Вони можуть відбуватися тільки на певних частотах – власних частотах. Власні коливання,

встановлюються на тих частотах, на яких в результаті накладення біжучої хвилі і хвилі, відбитої від межі плити, утворюються стоячі хвилі. Кожній власній частоті відповідає своє розташування вузлових ліній і зон найбільшою амплітуди на поверхні плити, тобто своя форма коливань плити.

Власні коливання плити носять затухаючий характер, що пояснюється витратою енергії на подолання сил тертя в матеріалі (внутрішнього тертя) і на границях плити. У результаті цього механічна енергія коливань плити перетворюється на теплову і розсіюється. Здатність матеріалу перетворювати і розсіювати енергію механічних коливань характеризується безрозмірним коефіцієнтом втрат η . Втрати звукової енергії на внутрішнє тертя, а також втрати на межах плити визначають собою ступінь її демпфування.

При збігу частоти збуджуючої сили з власною частотою плити виникає **резонанс**, тобто значне зростання амплітуди коливань без збільшення збуджуючої сили. При плавній зміні частоти збуджуючої сили амплітуда коливань зростає, досягаючи максимуму в момент збігу з власною частотою плити, а потім зменшується, утворюючи резонансний пік. Ширина і висота резонансного піка залежать від демпфування плити. Чим більше втрати в матеріалі і на границях плити, тим ширше і нижче резонансний пік.

Коли коливання огорожі збуджуються падаючими на неї звуковими хвилями, можливо явище **хвильового збігу**, описане Л.Кремером, який розглянув це явище в зв'язку з передачею звуку через огорожу, представлену у вигляді безмежної плити.

Падаючі звукові хвилі викликають згинальні коливання конструкції, так як звуковий тиск неоднаковий в різних точках поверхні. Конструкція передбачається нескінченної протяжності і збуджується дифузним звуковим полем. Швидкість поширення згинальних хвиль залежить від механічних властивостей середовища і частоти в протилежності швидкості поздовжніх коливань, що не залежить від частоти і є постійною для даного середовища (наприклад, для повітря – 340 м/с). При низьких частотах швидкість поширення згинальних хвиль менше швидкості звуку. У конструкції мають місце слабкі вимушені коливання з незначним випромінюванням звукової енергії. Зі збільшенням частоти f зменшу-

ється довжина звукової хвилі λ оскільки $\lambda = c / f$. Нарешті, при певній частоті f_{gr} (гранична частота) довжина згинальної хвилі λ_{gr} дорівнює проекції довжини хвилі λ (рис 6.4)¹⁰, тобто відбудеться збіг хвиль (хвильовий збіг), при якому інтенсивність



Рисунок 6.4 – Схема збудження згинальних хвиль в конструкції

згинальних коливань різко збільшиться. При зміні частоти звуку хвильовий збіг може бути відновлений на інших кутах падіння звукової хвилі.

Отже, хвильові збіги виникають при рівності геометричних розмірів проекцій довжин звукової хвилі на конструкцію і довжини хвилі згинальних коливань конструкції. При хвильовому збігу розподіл тиску в падаючій хвилі уздовж конструкції точно відповідає розподілу амплітуд власних коливань для тієї ж частоти.

¹⁰ При падінні звуку на поверхню огорожі під кутом найменша відстань між точками на ній поверхні, в які звукові хвилі приходять в даний момент часу в однаковій фазі, рівна $\lambda / \sin \theta$ (де λ – довжина хвилі в повітрі; θ – кут між напрямком розповсюдження хвиль та нормаллю до поверхні огороження). Цю відстань називають слідом падаючої хвилі. У огорожі, що коливається, виникає згинальна хвиля довжиною $\lambda_{gr} = \lambda / \sin \theta$.

ти, що і призводить до інтенсивного зростання коливань. Граничну частоту $f_{\text{г}}$ (мінімальну частоту, на якій можливий хвильовий збіг) для суцільних плит, можна визначити за формулою

$$f_{\text{г}} = c^2 / 1,8c_t h, \quad (6.1)$$

де c – швидкість звуку у повітрі, c_t – швидкість поширення повздовжніх звукових коливань в конструкції, h – товщина конструкції. Гранична частота $f_{\text{г}}$ відповідає руху звукової хвилі по дотичній до поверхні ($\theta = 90^\circ$).

Швидкість c_t в пластині рівна

$$c_t = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (6.2)$$

де E – модуль Юнга, σ – коефіцієнт Пуассона, ρ – об'ємна густина пластини.

Приклад. Визначити граничну частоту для бетонної плити товщиною 100 мм.

Швидкість повздовжніх хвиль для бетону $c_t = 3700$ м/с. Отже згідно формули (6.1)

$$f_{\text{г}} = \frac{340^2}{1,8 \cdot 3700 \cdot 0,1} = 174 \text{ Гц}.$$

При збільшенні товщини плити в два рази $f_{\text{г}} = 87$ Гц.

Розміри конструкцій і їх закріплення менш впливають на звукоізоляцію, ніж товщина.

Хвильовий збіг, при якому звукоізоляція різко зменшується, охоплює область частот від $f_{\text{г}}$ до $2f_{\text{г}}$, тобто приблизно в межах однієї октави.

При $f > f_{\text{г}}$ істотне значення має циліндрична жорсткість конструкції при вигині D і гранична частота хвильового збігу рівна

$$f_{\text{г}} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{D}}, \quad (6.3)$$

де ρ – поверхнева густина конструкції.

Перше теоретичне дослідження звукоізолюючої здатності акустично однорідних огорожень виконано Релеем, який роз-

глянув нормальне падіння звуку на пластину необмеженої протяжності. Прийняті їм умови значно відрізняються від реальних. Надалі теорія розвивалася в напрямку наближення до реальних умов роботи огорожі.

Умови, прийняті Релеєм, привели до вирішення задачі щодо звукоізолюючої здібності акустично однорідного огородження в формі так званого закону маси

$$R = 20 \lg \frac{\pi p f}{\rho c} - 5 = 20 \lg p f - 47,5, \quad (6.4)$$

де p – поверхнева густина конструкції, f – частота звуку, ρ – густина повітря, c – швидкість звуку в повітрі.

Відповідно до закону маси звукоізолююча здатність конструкції залежить тільки від її поверхневої густини, тобто від маси одиниці її поверхні і від частоти звуку. Вплив жорсткості і демпфірування на звукоізолюючу здатність конструкції не враховується. Подвоєння поверхневої густини конструкції призводить до збільшення звукоізолюючої здібності на всіх частотах на 6 дБ.

Частотні характеристики конструкцій різної поверхневої густини представляють собою сімейство паралельних прямих, що мають темп зростання звукоізолюючої здатності 6 дБ на кожному октаву (збільшення звукоізолюючої здібності на 6 дБ при подвоєнні частоти).

Вимірювання звукоізолюючої здатності конструкцій показують, що їх частотні характеристики істотно відрізняються від побудованих за законом маси. У реальних конструкціях замість рівномірного збільшення звукоізолюючої здібності у всьому діапазоні при зростанні частоти звуку спостерігаються ділянки з різним темпом її зростання, а також ділянки, на яких звукоізолююча здатність не збільшується і навіть знижується при підвищенні частоти звуку. Ці відхилення від закону маси можна пояснити при розгляді хвильових процесів в конструкції і в повітрі приміщення з урахуванням явищ частотного та просторового резонансу. Окреслення частотної характеристики в нормованому діапазоні визначається, в першу чергу, значеннями характерних частот: нижчої власної частоти і граничної частоти хвильового збігу. Від них залежить положення в нормованому діапазоні специфічних ділянок частотної характеристики, кожний з яких відповідає особ-

близький механізм проходження звуку і формування звукоізолюючої здатності конструкції.

Характерна частотна залежність звукоізоляції дає можливість для досить простого графо - аналітичного розрахунку, який використовується згідно [18] для розрахунку звукоізоляції огорожувальних конструкцій. Частотна характеристика розбивається на три області. У першій області (на низьких і середніх частотах) звукоізоляція визначається масою, проте похила крива, що характеризує зростання звукоізоляції, замінена на горизонтальну, яка враховує погіршення звукоізоляції внаслідок явища хвильового збігу. У другій області звукоізоляція швидко зростає – 7,5 дБ на октаву. У третій області – знову горизонтальна ділянка (рис. 6.5). Даний метод застосовують для одношарових огорожувальних конструкцій з бетону, залізобетону, цегли, керамічних блоків, гіпсокартону і подібних матеріалів поверхневою густиною від 100 до 1000 кг/м².



Рисунок 6.5 – Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму одношаровою плоскою конструкцією

Розрахунок звукоізоляції виконується в наступній послідовності. Визначають координати точки В (f_R і R_R) частотної характеристики слід за графіками рис. 6.6, f_R – залежно від товщини h захисної конструкції (рис. 6.6, а) і R_R – залежно від поверхневої густини m огорожувальної конструкції (рис. 6.6, б). З точки В ліворуч проводиться горизонтальний відрізок АВ, а від точки В вправо проводиться відрізок ВС з нахилом 7,5 дБ на октаву до точки С з ординатою $R_C = 60$ дБ, з точки С вправо проводиться горизонтальний відрізок CD. Далі отриману характеристику звукоізоляції порівнюють з нормативною кривою та визначають індекс ізоляції повітряного шуму (див. нижче).

Для орієнтовної оцінки індексу ізоляції повітряного шуму (індекс ізоляції повітряного шуму – одночислова величина оцінки

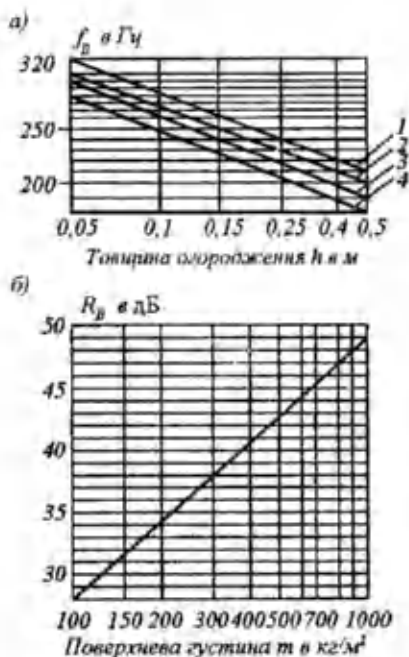


Рисунок 6.6 – Графік для визначення координат точки В:

- 1–об'ємна густина $\rho \geq 1800 \text{ кг/м}^3$;
 2– $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; 3– $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$;
 4– $\rho \leq 1200 \text{ кг/м}^3$

явища повітряні прошарки товщиною понад 12 см заповнюють мінеральною ватою або іншим матеріалом. Вплив товщини повітряного прошарку на звукоізоляцію показано в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вплив товщини повітряного прошарку δ на збільшення звукоізоляції огорожі ΔR

δ , см	3	4	5	6	7	8	9
ΔR , дБ	1	3,2	4,5	5,4	6	6,3	6,8

звукоізоляції огорожувальної конструкції, визначена за її частотною характеристикою (згідно [17]) одношаровими огорожувальними конструкціями з матеріалів, зазначених вище, можна використовувати формули:

$$\text{при } p \leq 200 \text{ кг/м}^2 \quad R = 13 \lg p + 13 \text{ дБ, (6.5)}$$

$$\text{при } p \geq 200 \text{ кг/м}^2 \quad R = 23 \lg p - 10 \text{ дБ. (6.6)}$$

де p – поверхнева густина конструкції.

Повітряні прошарки між конструктивними шарами володіють звукоізолюючою здатністю. Товщину прошарку доцільно приймати від 3-х до 8 - 10 см. При цьому R лежить в межах 1 - 7 дБ і знаходиться за графіками. Збільшення товщини понад 10 см не викликає істотного приросту R і може призвести до утворення стоячих хвиль. Для усунення цього

6.4 Звукоізоляція конструкціями з отворами.

Визначення загального рівня звукового тиску в приміщенні

Вікна та двері із-за невеликої маси і малої герметичності завжди мають гіршу звукоізоляцію, ніж огорожувальні конструкції. Загальна звукоізоляція конструкції $R_{\text{заг}}$ може бути визначена за формулою (6.7). Розрахунок роблять в октавних або третиннооктавних смугах частот, однак для орієнтовної оцінки досить визначити середнє значення звукоізоляції

$$R_{\text{заг}} = R - 10 \lg \frac{\frac{S_1}{S_2} + 10^{(R_1 - R_2)/10}}{1 + S_1 / S_2}, \quad (6.7)$$

де R_1 – звукоізоляція глухої стіни; R_2 – звукоізоляція вікон або дверей, S_1 – площа стіни (без отворів), S_2 – площа отворів.

Приклад. У стіні з гіпсобетону товщиною 8 см, що розділяє дві кімнати, і площею 20 м^2 є одинарні двері площею 2 м^2 . Потрібно визначити загальну середню звукоізоляцію стіною з дверима.

Поверхнева густина стіни складає близько 100 кг/м^2 . Згідно формули (6.5), $R = 13 \lg p + 13 = 13 \lg 100 + 13 = 39 \text{ дБ}$. Для дверей (згідно [18]) $R \approx 20 \text{ дБ}$:

$$R_{\text{заг}} = 39 - 10 \lg \frac{\frac{18}{2} + 10^{(39-20)/10}}{1 + 18/2} \approx 30 \text{ дБ}.$$

Загальна звукоізоляція стіною при наявності дверей зменшилася на 10 дБ.

Звукоізоляція огорожувальними конструкціями знижується при наявності отворів, щілин. Це зниження визначається в основному відношенням розмірів отворів до довжини падаючої звукової хвилі; якщо це відношення близьке до 1, то звукова енергія, що пройшла через отвір пропорційна площі отвору.

Загальну звукоізоляцію конструкції при наявності подібних отворів або відкритих прорізів визначають за формулою

$$R_{\text{заг}} = R - 10 \lg \frac{1 + \frac{S_2}{S_1} 10^{R/10}}{1 + S_2 / S_1}, \quad (6.8)$$

де позначення аналогічні формулі (6.7).

Приклад. Визначити звукоізоляцію зовнішньої стіною з вікном (при закритому і відкритому вікні) при наступних даних $R_1 = 50$ дБ, $S_1 = 10 \text{ м}^2$, $R_2 = 30$ дБ, $S_2 = 2,5 \text{ м}^2$.

Згідно формули (6.7) визначаємо $R_{\text{за}}.$ при закритому вікні

$$R_{\text{за}} = 50 - 10 \lg \frac{\frac{10}{2,5} + 10^{(50-30)/10}}{1 + 10/2,5} = 37 \text{ дБ.}$$

Згідно (6.8) визначаємо $R_{\text{від}}.$ при відкритому вікні

$$R_{\text{від}} = 50 - 10 \lg \frac{1 + (2,5/10)10^{50/10}}{1 + 2,5/10} = 7 \text{ дБ.}$$

З формули (6.8) видно, що чим більше R , тим більше погіршення звукоізоляції буде мати місце при наявності прорізів або відкритих отворів. Тому при $S_2 / S_1 \ll 1$ значення R буде практично рівним

$$R_{\text{за}} = 10 \lg \frac{S_1}{S_2}. \quad (6.9)$$

При наявності декількох джерел шуму, розташованих за різними огорожувальними конструкціями, необхідно визначити загальний рівень звукового тиску в розглянутому приміщенні. Цей рівень рівний

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{(L_i - R_i)/10} - 10 \lg A, \quad (6.10)$$

де S_i – площі огорожувальних конструкцій; L_i – рівні звукового тиску за конструкціями; R_i – звукоізоляція конструкціями; A – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні.

Для практичних цілей буває достатнім визначення не частотної характеристики рівнів звукового тиску, а середніх значень L .

Приклад. Визначити середній рівень звукового тиску в приміщенні з $A = 20 \text{ м}^2$, якщо зовнішня стіна з вікном виходить на шумну магістраль. За внутрішніми стінами знаходяться джерела шуму однакової інтенсивності. Характеристики всіх огорожувальних конструкцій наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Характеристики конструкцій

Назва огорожуючої конструкції	$S_i, \text{м}^2$	$R_i, \text{дБ}$	$L_i, \text{дБ}$	$S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}}$
Зовнішня стіна	10	50	90	$10 \cdot 10^4$
Вікно	2,5	30	90	$250 \cdot 10^4$
Внутрішня стіна	40	40	70	$4,0 \cdot 10^4$
Двері	2	20	70	$20 \cdot 10^4$

Визначасмо $\sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}} = 284 \cdot 10^4$; $L = 10 \lg 284 \cdot 10^4 - 10 \lg 20 = 64,5 - 13 = 51,5 \text{ дБ}$.

Найбільша кількість звукової енергії проникає через вікно. Якби вікно мало таку ж звукоізоляцію, що і зовнішня стіна, тоді $L = 10 \lg 18,5 \cdot 10^4 - 10 \lg 20 = 53 - 13 = 40 \text{ дБ}$, тобто, середній рівень звукового тиску зменшився б на 11,5 дБ.

З формули (6.10) видно, що зменшення шуму в приміщенні може бути отримано за рахунок збільшення звукоізоляції конструкціями починаючи з більш звукопровідних; зменшення площ огорожі, що відокремлюють більш гучні приміщення; збільшення звукопоглинання в ізольованому приміщенні.

6.5 Звукоізоляція огорож від ударного шуму

Ударний шум виникає при безпосередньому механічному впливі на перекриття (удари, ходьба, пересування меблів, вібрація устаткування і т.і.) і передається в основному через матеріал конструкції внаслідок коливань окремих її частинок (особливо в матеріалах, що мають велику густину).

Звукоізоляція перекриття від ударного шуму характеризується величиною рівня звукового тиску L , що створюється в ізольовану приміщенні при ударах по перекриттю молотків стандартної ударної машини, яка виконує 10 ударів за секунду, з п'ятьма молотками масою по 0,5 кг, що вільно падають із висоти 4 см. Отримані рівні звукового тиску призводять до откавних смуг частот, загальну еквівалентну площу звукопоглинання в приміщенні A призводять до стандартного значення A_0 , що рівне 10 м^2 , а потім

порівнюють з нормативними (рис. 6.3). Такі рівні називаються приведеними L_n :

$$L_n = L - 10 \lg \frac{A_0}{A}. \quad (6.11)$$

У першому наближенні явище удару апроксимується дією раптово прикладеної до перекриття сили, що діє протягом певного проміжку часу.

Як правило приймається, що між рівнем вібрації конструкції $L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0}$ і рівнем звукового тиску L існує проста кореляційна залежність $L \sim L_v$, де v – коливальна швидкість конструкції; $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с – порогове значення коливальної швидкості. Задача визначення рівня ударного шуму зводиться до знаходження коливальної швидкості перекриття при роботі стандартної ударної машини. Забезпечити нормативні вимоги ізоляції ударного шуму за допомогою одних несучих плит практично неможливо. Так подвоєння товщини плити перекриття знижує рівень L на 9 дБ, а таке ж збільшення густини та модуля пружності підвищує ізоляцію ударного шуму відповідно на 4,5 і 1,5 дБ. Тому застосовуються різні конструкції підлоги (на пружній основі, по латах і пружних прокладках, рулонні підлоги). Застосування рулонних шаруватих підлог дозволяє значно підвищити ізоляцію ударного шуму.

Якщо індекс приведенного рівня ударного шуму для несучих плит перекриттів складає близько 80-90 дБ, то перекриття з шаруватими підлогами вже мають $L_p \approx 67-70$ дБ. Багато килимових і ворсових покриттів мають такі значення ізоляції ударного шуму, що значно перевищують нормативні вимоги. Поліпшення звукоізоляції відбувається ще і в результаті втрат енергії на місцеве зминання пружного шару.

У якості однієї з основних звукоізоляційних характеристик рулонних підлог є тривалість стандартного удару τ (тривалість контакту молотка стандартної ударної машини з підлогою). Частота, з якої починає виявлятися вплив місцевого зминання, дорівнює

$$f_0 = \frac{0,45}{\tau} \quad (6.12)$$

Величина зниження приведенного рівня ударного шуму для практичних цілей може бути визначена за формулою

$$\Delta L = 40 \lg \frac{f}{f_0} \quad (6.13)$$

Індекс приведенного рівня ударного шуму під перекриттям визначається формулою

$$I_y = I_{y0} - \Delta I_y \quad (6.14)$$

де I_{y0} – індекс приведенного рівня ударного шуму для несучої плити перекриття; приймається згідно таблиці 13 [18]; ΔI_y – величина, що характеризує зменшення приведенного рівня ударного шуму при наявності рулонної підлоги; приймається згідно таблиці 14 [18].

Приклад. Визначити індекс приведенного рівня ударного шуму під міжповерховим перекриттям, яке складається з несучої залізобетонної суцільної плити товщиною 160 мм та рулонної підлоги з дубльованого теплозвукоізоляційного ліноліуму на в'язально-прошивній підкладці товщиною 3,7 мм.

Згідно табл. 13 [18] знаходимо значення $I_{y0} = 82$ дБ, оскільки поверхнева густина рівна $2400 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,16 \text{ м} = 384 \text{ кг/м}^2$, а згідно табл. 14 [18] значення $\Delta I_y = 16$ дБ.

Згідно формули (6.14) $I_y = 82 - 16 = 66$ дБ. Якщо перекриття планується для житлових будівель, то воно відповідає нормативним вимогам, оскільки $66 < 67$ (див. таблицю 7 [18]).

Розглянемо підлоги на пружній основі. До цього типу перекриттів відносяться конструкції із суцільним пружним шаром між підлогою і несучою плитою та конструкції з підлогою на лагах і пружних прокладках.

Ударні впливи по підлозі викликають періодичні зміни напружень в пружному шарі, в ньому виникають деформації, на які витрачається частина енергії, що розсіюється у вигляді тепла. Пружний шар працює так само, як і при ізоляції повітряного шуму роздільними перегородками з проміжним пружним шаром. При наявності в конструкції перекриття проміжків можлива пе-

редача звуку не тільки через елементи конструкції, але і через ці проміжки.

Зниження рівня ударного шуму залежить насамперед від частоти власних коливань підлоги на пружній основі f_0 . Чим нижче f_0 , тим більше величина зниження рівня ударного шуму ΔL за рахунок підлоги на пружній основі (див. формулу (6.13)). Кожне подвоєння частоти при $f > f_0$ призводить до зростання поліпшення ізоляції ударного шуму за рахунок підлоги на пружній основі на 12 дБ. Починаючи з середніх частот можливе виникнення хвильових процесів у пружному середовищі, що уповільнює зростання звукоізоляції з 12 до 6 дБ на октаву.

Резонансну частоту коливань підлоги на пружній основі шукають згідно формули

$$f_0 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{E_d}{p_2 h}} \quad (6.15)$$

де E_d — динамічний модуль пружності пружної прокладки (знаходиться за довідниковими таблицями, наприклад, табл. 11 [18]); p_2 — поверхнева маса підлоги на пружній основі; h — товщина пружної прокладки.

Визначають величину зниження приведенного рівня ударного шуму на низьких частотах згідно формули (6.13) при $f \leq 0,7 f_0 \sqrt{p_2 / p_c}$ та $2 < \lambda < 7$, де $\lambda = p_1 / p_2$, p_1 — поверхнева густина несучої частини, p_c — поверхнева густина пружної прокладки. Якщо $\lambda \leq 2$ або $\lambda \geq 7$ підраховують величину

$$\Delta L_2 = 10 \lg \left[\left(\frac{\lambda + 1}{\lambda} \right)^2 + \alpha^2 \left(\alpha^2 - 2 \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) \right], \quad \alpha = f / f_0. \quad (6.16)$$

На середніх та високих частотах при $f \geq 0,7 f_0 \sqrt{p_2 / p_c}$ величину зниження приведенного рівня ударного шуму визначають згідно

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg \frac{p_2}{p_c} - 3. \quad (6.17)$$

При підлогах по латах і окремих пружних прокладках можлива передача звуку через повітряні проміжки. Для досить важких

несучих плит (300 кг/м^2) ця передача несуттєва. При меншій масі конструкції з підлогами по лагам виявляється доцільним заповнювати повітряні проміжки звукопоглинаючими (легкими) матеріалами, що не створюють жорсткого контакту між підлогою і несучою плитою. Лаги повинні бути досить легкими, їх площа дотику з несучою плитою найменша. Для міжповерхових перекриттів з пружним шаром з піску використання викладеного практичного методу розрахунку ізоляції ударного шуму призводить до помилки, тому що велике значення мають втрати енергії коливань на тертя, обумовлене взаємним рухом піщинок. Тому на середніх і високих частотах поліпшення ізоляції ударного шуму за рахунок підлоги по засипці буде залежати від товщини шару піску.

На низьких частотах ΔL_1 визначається формулою (6.13), а на середніх та високих – формулою

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg h,$$

де h – товщина шару засипки піском.

Для несучих суцільних або багатопустотних плит перекриттів поверхневою густиною близько 300 кг/м^2 застосування засипок з піску товщиною 60 мм може забезпечити вимоги ізоляції як ударного, так і повітряного шумів.

Простіший практичний метод визначення індексу приведенного рівня ударного шуму I_p під міжповерховим перекриттям, в тому числі і з підлогами по лагах, полягає в наступному. Визначається частота власних коливань підлоги, що лежить на пружній основі, за формулою (6.15). За таблицею 13 [18] визначають індекс приведенного рівня ударного шуму несучої плити перекриття I_{p0} .

За таблицею 10 [18] в залежності від величини індексу приведенного рівня ударного шуму несучої плити перекриття I_{p0} і частоти власних коливань f_0 визначають індекс приведенного рівня ударного шуму I_p .

Приклад. Визначити індекс приведенного рівня ударного шуму під перекриттям, що складається з несучої залізобетонної пли-

ти товщиною 140 мм та дерев'яної підлоги по лагах, що викладені на пружні прокладки з м'яких деревоволоконних плит товщиною 25 мм.

Визначаємо величини, що входять у формулу (6.15). Згідно табл. 11 [18] знаходимо $E_d = 12 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$ (1,2 МПа), $\epsilon = 0,15$, оскільки навантаження на пружні прокладки складають до 1000 кгс/м^2 (10 кПа).

Поверхневу густину підлоги по лагах приймаємо різною 30 кг/м^2 .

Знаходимо

$$f_0 = 0,5 \sqrt{\frac{12 \cdot 10^4}{0,025 \cdot 30}} = 200 \text{ Гц.}$$

Значення $I_{y0} = 82 \text{ дБ}$. Згідно табл. 12 [18] знаходимо $I_y = 62 \text{ дБ}$, що є меншим від необхідних 67 дБ для міжповерхових перекриттів жилих будівель. Можемо вважати, що перекриття задовольняє нормативним вимогам ізоляції ударного шуму.

У аналізованих конструкціях перекриттів поліпшення ізоляції ударного шуму досягається за рахунок пружних матеріалів. Звукоізоляційні матеріали повинні зберігати свої властивості протягом усього терміну експлуатація перекриттів (до капітального ремонту). Однак уже в перші місяці і роки ізоляція ударного шуму значно погіршується (до 2-6 дБ), що пояснюється в основному втратою матеріалами своїх пружних властивостей. Найбільш доцільні для застосування в конструкціях перекриттів прокладки з супертонкого волокна (діаметр волокон 1-3 мкм і об'ємна маса не менше $100\text{-}150 \text{ кг/м}^3$). Дані матеріали дозволяють значно покращити експлуатаційні характеристики міжповерхових перекриттів та дещо зменшити їх висоту. Однак проблема зменшення маси перекриттів повинна вирішуватися шляхом створення нових конструкцій, наприклад багатошарових.

Якщо розділити (за висотою) пружну прокладку звичайного тришарового перекриття рівномірно розподіленим шаром матеріалу з досить великим інерційним опором, то конструкцію, що отримується, можна назвати п'ятишаровою. Основними елементами перекриттів є три інерційних (підлога з її основою, рівномірно розподілений шар матеріалу і несуча панель) і два пружних

шару. Якщо досягнути неузгодженості частот власних коливань інерційних шарів (бажано нижче нормованого у будівництві діапазону частот) то слід очікувати додаткового (щодо тришарової конструкції) приросту звукоізоляції.

При однаковій масі п'ятишарові перекриття мають кращу звукоізоляцію, ніж тришарові. Поліпшення ізоляції ударного шуму в області низьких частот становить близько 12 дБ на октаву, а в області середніх і високих частот – 6 дБ на октаву. В якості рівномірно розподіленого шару можна застосовувати будь-які будівельні матеріали з поверхневою густиною не менш 30 кг/м^2 . При цьому необхідно прагнути до того, щоб твердість інерційних елементів підлоги (плити підлоги і рівномірно розподіленого шару) становила не більше 1/20-1/30 жорсткості несучої плити перекриття при вигині, а поверхнева густина була б по можливості більшою.

Контрольні запитання

1. Як поділяють шуми у приміщенні за характером їх виникнення?
2. Які є шляхи передачі шуму в ізольоване приміщення?
3. Як знайти звукоізоляцію конструкції?
4. Як знаходять індекс ізоляції повітряного шуму і індекс приведенного рівня ударного шуму?
5. Як характеристики і матеріал конструкцій впливає на ізоляцію повітряного шуму?
6. В чому полягає закон мас?
7. Як отвори в конструкції впливають на її звукоізоляцію?
8. Наведіть архітектурно-планувальні засоби захисту від шуму.

Література

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП Госстроя России, 2000. 57 с.
2. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1983. 136 с.
3. Строительная климатология: Справ. Пособие к СНиП / НИИ строит. физики. М.: Стройиздат, 1990. 86 с. Справ. пособие к СНиП.
4. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника / Министрой России. М.: ГП ЦПП, 1996. 44 с.
5. Рекомендации по методике строительно-климатических паспортизаций городов типа жилищного строительства / ЦНИИЭП жилища. М., 1981. 37 с.
6. Пособие по строительной климатологии (к СНиП 2.01.01.-82)/ НИИ строительной физики Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1987. 396 с.
7. Руководство по определению теплопоступлений в помещения промышленных зданий от инсоляции / ЦНИИ промзданий Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1982. 172 с.
8. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки / ЦНИИП градостроительства Гражданстрой при Госстрое СССР. М.: Стройиздат, 1986. 63 с.
9. СНиП 2.07.01-89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. 56 с.
10. Лицкевич В.К. Жилище и климат. М.: Стройиздат, 1984. 288 с.
11. Руководство по строительной климатологии: Пособие по проектированию. М.: Стройиздат, 1974. 115 с.
12. Коваленко П.П., Орлова Л.Н. Городская климатология. М. 6. Стройиздат, 1993. 144 с.
13. Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат. — М.: «Архитектура-С», 2007. 344с.
14. Лицкевич В.К., Макриненко Л.И., Мигалина И.В. Архитектурная физика. — М.: «Архитектура-С», 2005. 448с.

15. ДБН В.2.6-31:2006 Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель // МінБуд України К.: Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2006. 66с.
16. Коваленко Ю.Н., Шевченко В.П., Михайленко И.Д. Краткий справочник архитектора (гражданские здания и сооружения). – К.: «Будвельник», 1975. 702с.
17. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). – М.: «Высшая школа», 1974. 319с.
18. Шильд Е., Кассельман Х.-Ф., Дамен Г., Поленц Р. Строительная физика. Перевод с немецкого. – М.: «Стройиздат», 1982. 294с.
19. ДСТУ Б В.2.6-85:2009 Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи оцінювання // Мінрегіонбуд України, 2010, 30с.
20. СНиП II-12-77 Защита от шума.
21. ДБН В.1.2-10-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 46с.
22. ДСТУ Б В.2.6-86:2009 Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи вимірювання // Мінрегіонбуд України, 2010, 46с.
23. Осипов Л.Г., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. и др. Звукоизоляция и звукопоглощение – М.: ООО «Издательство АСТ» 2004. 450с.
24. В.Блази Справочник проектировщика. Строительная физика. Перевод с немецкого. М.: «Техносфера», 2004. 479с.
25. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: «Стройиздат», 1979. 248с.