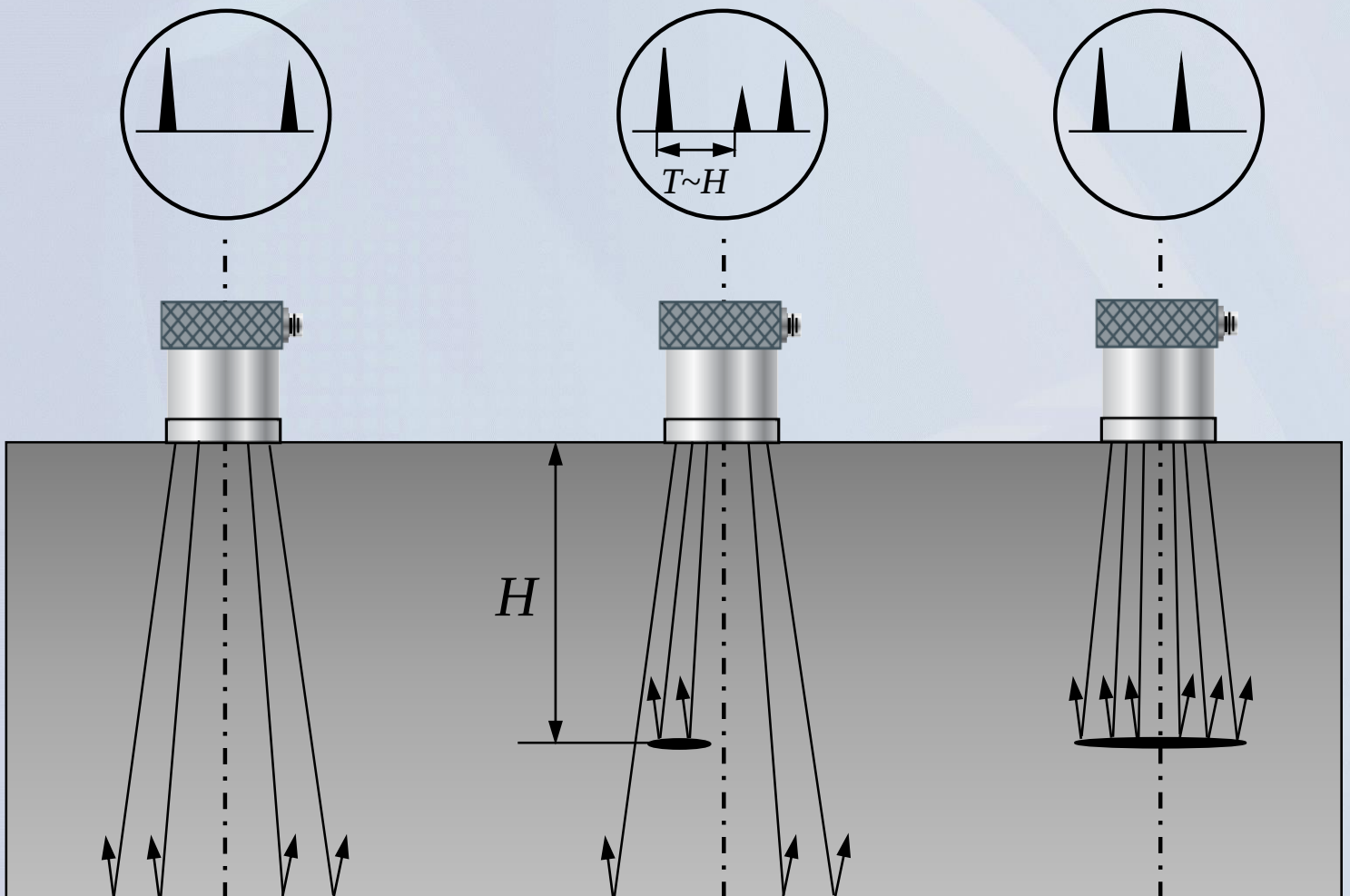


Р. М. Галаган

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Р. М. Галаган

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензенти: **Є.В. Івохін**, доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень Київського національного університету ім. Тараса Шевченка
О.В. Монченко, кандидат тех. наук, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Національного авіаційного університету

Відповідальний редактор: **А.Г. Протасов**, д.п.н., професор, зав. кафедрою приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського

Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 11.03.2019 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Галаган Роман Михайлович, канд. техн. наук, доцент

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,12 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

Викладено фізичні основи ультразвукового контролю, описано механічні коливання та хвилі в пружних середовищах, розглянуто форми хвильових процесів та чинники, що обумовлюють згасання акустичних хвиль під час їх поширення в різних середовищах. Особливу увагу приділено розрахункам акустичних полів п'єзоперетворювачів та конструкціям різних типів ультразвукових датчиків. Пояснено принципи складання та розрахунку акустичних трактів. Наведено методи ультразвукового контролю матеріалів та описані їх характеристики.

Для студентів закладів вищої освіти, що навчаються за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Може бути корисною для аспірантів, викладачів та фахівців, що займаються розробкою засобів ультразвукового неруйнівного контролю.

© Р. М. Галаган, 2019
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, 2019

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ПЕРЕДМОВА.....	5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	7
1. КОЛИВАННЯ.....	8
1.1. Механічні коливання	8
1.2. Маятники.....	12
1.3. Добротність коливальних систем.....	14
1.4. Приклади розв'язку задач.....	16
1.5. Завдання для самостійного розв'язку	18
Запитання для самоконтролю	21
2. ХВИЛІ В ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	22
2.1. Основні параметри пружної хвилі	23
2.2. Характеристики акустичного поля	25
2.3. Властивості акустичних хвиль	28
2.4. Форми хвильових фронтів.....	32
2.5. Типи акустичних хвиль	35
2.5.1. Об'ємні хвилі	36
2.5.2. Хвилі, що поширюються вздовж межі поділу середовищ	39
2.5.3. Нормальні хвилі.....	41
2.6. Ефект Доплера	42
2.7. Приклади розв'язку задач.....	44
2.8. Завдання для самостійного розв'язку	48
Запитання для самоконтролю	54
3. ПРОХОДЖЕННЯ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ПЛОСКІ МЕЖІ СЕРЕДОВИЩ ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ТА ПОХИЛОМУ ПАДІННІ.....	56
3.1. Проходження хвиль через плоскі межі середовищ при нормальному падінні	56
3.2. Проходження хвиль через тонкі шари при нормальному падінні	58
3.3. Проходження хвиль через плоскі межі середовищ при похилому падінні	61
3.4. Трансформація хвиль. Критичні кути.....	63
3.5. Приклади розв'язку задач.....	66
3.6. Завдання для самостійного розв'язку	72
Запитання для самоконтролю	76
4. ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ.....	78
4.1. Коефіцієнти згасання по тиску та інтенсивності	78
4.2. Залежність коефіцієнту згасання від частоти.....	80
4.3. Приклади розв'язку задач.....	88
4.4. Завдання для самостійного розв'язку	89
Запитання для самоконтролю	91
5. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	93
5.1. Характеристики п'єзоматеріалів	93
5.2. Плоскі монолітні п'єзоперетворювачі	96
5.2.1. Акустичне поле плоского перетворювача круглої форми.....	99

5.2.2. Акустичне поле плоского перетворювача прямокутної форми	107
5.3. Перетворювачі фокусувального типу	110
5.4. Розподілені перетворювачі типу фазованих антенних решіток та комутованих матриць	118
5.5. Класифікація ультразвукових перетворювачів	128
5.6. Конструкції ультразвукових перетворювачів	129
5.7. Приклади розв'язку задач.....	137
5.8. Завдання для самостійного розв'язку	141
Запитання для самоконтролю	147
6. РОЗРАХУНОК АКУСТИЧНИХ ТРАКТІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	149
6.1. Акустичні тракти прямих перетворювачів	149
6.1.1. Моделі трактів методів віддзеркалення (суміщені п'єзоперетворювачі)....	150
6.1.2. Моделі трактів методів проходження (роздільні п'єзоперетворювачі)....	158
6.1.3. Моделі трактів з лінією затримки	160
6.1.4. Моделі трактів при контролі багатошарових структур	162
6.2. Акустичні тракти похилих суміщених перетворювачів	163
6.3. Електроакустичний тракт	171
6.4. Приклади розв'язку задач.....	173
6.5. Завдання для самостійного розв'язку	179
Запитання для самоконтролю	184
7. АКУСТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ	186
7.1. Методи ультразвукової товщинометрії	187
7.2. Методи ультразвукової дефектоскопії.....	202
7.3. Дифракційно-часовий метод	218
7.4. Методи контролю з використанням ефекту Допплера	221
7.5. Методи ультразвукової витратометрії.....	223
7.6. Акустико-емісійний метод контролю	230
7.7. Приклади розв'язку задач.....	235
7.8. Завдання для самостійного розв'язку	235
Запитання для самоконтролю	240
ЛІТЕРАТУРА	242
ДОДАТОК А. Акустичні характеристики деяких матеріалів та речовин	249
ДОДАТОК Б. Швидкості поширення ультразвуку в різних конструкційних матеріалах.....	252
ДОДАТОК В. Графіки залежностей згасання хвиль від частоти в деяких матеріалах.....	254
ДОДАТОК Г. Коефіцієнти згасання ультразвуку частотою 2,5 МГц для деяких металів	258
ДОДАТОК Д. Акустичні властивості біологічних тканин та води.....	259
ДОДАТОК Е. Технічні характеристики п'єзоматеріалів.....	260
ДОДАТОК Ж. Графіки та таблиці залежностей швидкості ультразвуку від температури в деяких середовищах	261

ПЕРЕДМОВА

Ультразвукові методи неруйнівного контролю широко застосовуються у різних галузях промисловості та медицини: в авіа- та машинобудуванні, приладобудуванні, на залізничному та інших видах транспорту, в енергетиці, легкій, хімічній, нафтогазовій промисловості, медицині, мистецтві тощо. За допомогою ультразвуку виявляють дефекти та пошкодження в різних матеріалах, визначають фізико-механічні характеристики, вимірюють геометричні параметри об'єктів, діагностують різноманітні захворювання внутрішніх органів людини та ін. Вивчення фізичних основ теорії випромінювання, поширення, приймання ультразвуку важливе для формування наукового світогляду сучасного фахівця у галузі неруйнівного контролю.

Хоча, загалом, теорія коливань, акустики та ультразвукового контролю досить добре та повно описана в закордонній літературі, а також є усталеною і практично не змінюється впродовж десятиліть, проте в Україні на сьогоднішній день спеціалізовані україномовні підручники за цією темою практично відсутні. Окрім того, більшість літературних джерел містять тільки теоретичний матеріал і мало уваги приділяють практичній складовій, пов'язаній із розв'язуванням задач. У підручнику значну увагу приділено саме розв'язуванню прикладних задач, тому його певною мірою можна вважати збірником задач. Підручник створено на базі лекційного курсу «Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю», який читається на кафедрі Приладів і систем неруйнівного контролю (ПСНК) КПІ ім. Ігоря Сікорського. Висвітлюються теми, починаючи від основних понять теорії коливань та хвильових процесів і закінчуючи описом безпосередньо різноманітних методів акустичного (ультразвукового) контролю та вимірювань. Значну увагу приділено розрахункам акустичних полів первинних перетворювачів, які є головною частиною приладів ультразвукового контролю, та розрахункам акустичних трактів, що дають змогу врахувати особливості поширення хвиль в об'єктах контролю та надалі визначити вимоги до електронних вузлів приладів.

У додатках наводяться важливі характеристики та властивості середовищ, графіки і таблиці, які допоможуть під час розв'язування деяких задач, а також можуть бути використані надалі у науковій діяльності під час роботи над курсовим або дипломним проектом за темами, що пов'язані із ультразвуковим неруйнівним контролем.

Уміння самостійно розв'язувати задачі, пов'язані з теорією та практикою ультразвукового контролю, дасть змогу студенту глибше засвоїти та більш чітко зрозуміти теоретичний матеріал, що читається на лекціях. Тому в підручнику до кожного розділу додані приклади розв'язку задач та завдання для самостійного розв'язку. Матеріал викладено так, що всі формули, які дозволяють вирішити будь-яку задачу, можна знайти у теоретичній частині кожного розділу. Розв'язування задачі має супроводжуватись лаконічним поясненням, що відображає фізичний зміст застосованих формул, а також послідовність виконаних операцій.

Підручник є результатом багаторічного викладання дисциплін, що пов'язані із ультразвуковим неруйнівним контролем, на кафедрі ПСНК КПІ ім. Ігоря Сікорського. Автор висловлює особливу вдячність Цапенко Володимирі Кузьмичу, відомому українському спеціалісту в галузі ультразвукового неруйнівного контролю, викладачу кафедри ПСНК, який стояв у витоків формування дисципліни «Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю» і який значною мірою посприяв тому, що автор обрав саме цей напрям для своєї наукової діяльності. Книга «Основи ультразвукового неруйнівного контролю» (2010 р.), авторами якої є Цапенко В.К та Куц Ю.В, стала основоположною під час написання цього підручника.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АЕ – акустична емісія

АРП – автоматичне регулювання підсилення

ДН – діаграма направленості

КМ – комутована матриця

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

УЗК – ультразвукові коливання

УМНК – ультразвукові методи неруйнівного контролю

ФАР – фазована антенна решітка

ЦТС – цирконат-титанат свинцю

ЧРЧ – часове регулювання чутливості

$C_{ал}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в алюмінію

$C_{в}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі у воді

$C_{лат}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в латуні

$C_{орг}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в оргсклі

$C_{ст}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в сталі

$C_{цтс}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в ЦТС-19

$C_{пов}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в повітрі

$C_{ок}$ – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в об'єкті контролю

C_l – швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в деякому матеріалі

C_t – швидкість поперечної хвилі в деякому матеріалі

C_R – швидкість поверхневої хвилі в деякому матеріалі

$\lambda_{ок}$ – довжина ультразвукової хвилі в об'єкті контролю

1. КОЛИВАННЯ

1.1. Механічні коливання

Коливання – це процес зміни стану системи відносно точки рівноваги, що у тій чи іншій мірі повторюється в часі. За своєю фізичною природою коливання діляться на: електромагнітні та механічні.

Механічні коливання – це механічні рухи тіла або системи тіл. У механіці системою тіл (або просто системою) називають групу тіл, рух яких вивчають. Сили, що діють між тілами системи, називаються внутрішніми. Зовнішніми силами називають сили, які діють на тіла системи з боку тіл, що не входять у неї.

Коливання майже завжди пов'язані з перетворенням енергії однієї форми прояву в іншу форму. Наприклад, в механічних і акустичних коливаннях – це перетворення кінетичної енергії у потенціальну і навпаки.

Усі коливальні рухи, незалежно від їхньої природи, мають спільну ознаку – це положення стійкої рівноваги, до якого прагне тіло в процесі коливань. **Положенням стійкої рівноваги** називається такий стан системи, в якому вона може залишатись як завгодно довго, не зазнаючи зовнішніх впливів.

Коливання, які здійснює система (тіло) після того, як вона якимось чином виведена зі стану стійкої рівноваги і потім надана самій собі, називаються **вільними**. Такі коливання виникають під дією внутрішніх сил, що прагнуть повернути систему в положення рівноваги, а їх частота залежить від властивостей системи та оточуючого середовища. Вільні коливання є загасаючими; їх амплітуда безперервно зменшується (рис. 1.1) внаслідок втрат енергії через опір середовища, в якому відбувається коливальний рух, та інших втрат (наприклад, тертя).

Якщо вільні механічні коливання тіла відбуваються в середовищі без опору, то вони називаються **власними** коливаннями, а їх частота – частотою власних коливань. За наявності опору період коливань збільшується, а якщо опір досить великий (велика в'язкість середовища), рух перестає бути періодичним, – це явище використовується для демпфування (гасіння) небажаних коливань. Частота власних

механічних коливань тіла визначається його геометричними розмірами і пружними властивостями.

Для виникнення вільних коливань у системі необхідне виконання двох умов. По-перше, при виведенні тіла з положення рівноваги у системі повинна виникати сила, що прагне повернути тіло в положення рівноваги. По-друге, тертя у системі має бути досить малим. Інакше коливання швидко загаснуть або навіть не виникнуть. Незагасаючі коливання можливі лише за відсутності тертя.

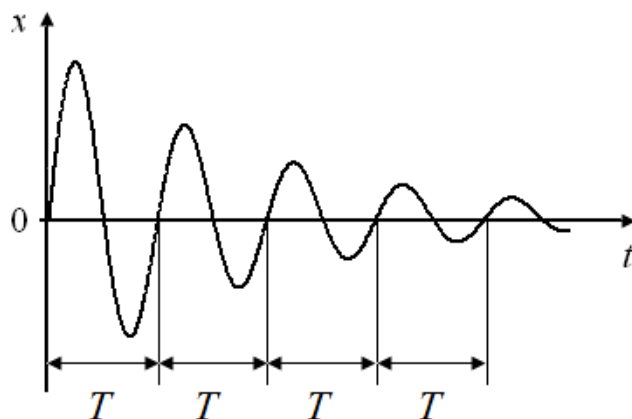


Рис. 1.1. Загасаючі гармонійні коливання: T – період коливань

Якщо система здійснює коливання під впливом зовнішніх сил, що змінюються періодично, то такі коливання називаються **вимушеними**. Періодична сила, що викликає механічні коливання, називається силою збурення. Частота вимушених механічних коливань визначається виключно частотою сили збурення і не залежить від розмірів і властивостей тіла, що коливається.

Повна механічна енергія тіла, що коливається за рахунок дії пружних (або квазіпружних¹) сил, дорівнює сумі кінетичної E_k та потенціальної $E_{\text{п}}$ енергій:

$$E = E_k + E_{\text{п}} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{k \cdot x^2}{2},$$

де m – маса тіла, що коливається, k – коефіцієнт жорсткості, x – поточне відхилення тіла, v – швидкість при поточному положенні тіла.

¹ Пружні сили – це сили, що виникають при пружних деформаціях (наприклад, розтягу-стиснення) тіл і прагнуть повернути тіло у вихідний стан. Сила пружності описується законом Гука $F_{\text{пр}} = -kx$. Якщо сила не є за своєю природою пружною, але підкоряється закону $F = -kx$, то вона називається квазіпружною силою.

Кінетична і потенціальна енергії періодично змінюються, але повна механічна енергія замкненої системи, в якій відсутні сили опору, залишається згідно закону збереження енергії незмінною. Вона дорівнює або потенціальній енергії у момент максимального відхилення від положення рівноваги, або ж кінетичній енергії у момент, коли тіло проходить положення рівноваги:

$$E = \frac{m \cdot v_m^2}{2} = \frac{k \cdot A^2}{2}, \quad (1.1)$$

де A – максимальне зміщення (амплітуда), v_m – максимальна швидкість (у момент проходження положення рівноваги).

Враховуючи, що $v_m = \omega \cdot A = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot A$, легко побачити, що попереднє рівняння дійсно виконується. Рівність (1.1) справедлива для випадку, коли втратами енергії можна знехтувати.

Максимальне зміщення тіла, що коливається, від положення рівноваги називається **амплітудою** коливань. Іншими словами, амплітуда визначає розмах коливань.

Коливальні процеси можуть бути **періодичними** і **неперіодичними**. Періодичними називаються такі коливання, для яких кожне значення певної величини повторюється через однакові проміжки часу:

$$x(t + T) = x(t).$$

Найменший проміжок часу T , після закінчення якого повторюється кожне значення величини, що змінюється, називається **періодом коливань** (див. рис. 1.1).

Якщо відбулось n повних коливань за час t , то період коливань можна визначити за формулою:

$$T = \frac{t}{n}.$$

Кількість повних коливань, що відбуваються за одиницю часу, називається **частотою коливань**, яка пов'язана з періодом наступною залежністю:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Гармонійні коливання – це така періодична в часі зміна величини, яка може бути описана гармонійним законом (синусоїдальним або косинусоїдальним²):

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (1.2)$$

де A – амплітуда гармонійного коливання (додатна величина), $(\omega t + \varphi_0)$ – фаза гармонійного коливання, φ_0 – початкова фаза (в момент часу $t=0$), ω – циклічна (або кругова) частота:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (1.3)$$

Гармонійні коливання графічно зображуються методом обертового вектора амплітуди або методом векторних діаграм (рис. 1.2). Із довільної точки O , вибраної на осі X , під кутом φ_0 , рівним початковій фазі коливання, відкладається вектор $\vec{A}$, модуль якого дорівнює амплітуді A коливання, що розглядається. Якщо цей вектор буде обертатися навколо точки O з кутовою швидкістю ω , то проекція вектора на вісь X буде змінюватись за законом (1.2).

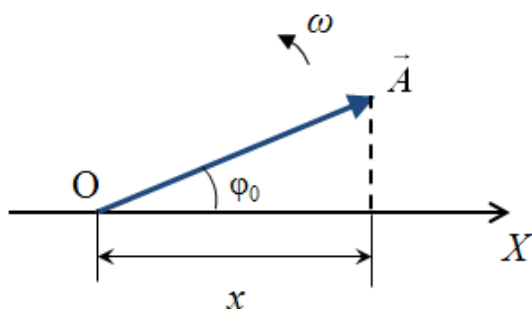


Рис. 1.2. Графічне зображення гармонійних коливань методом векторної діаграми

Згідно формули Ейлера для комплексних чисел:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i \cdot \sin\varphi,$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Тому рівняння гармонійного коливання можна записати у комплексній експоненційній формі:

$$\tilde{x} = Ae^{i(\omega t + \varphi_0)}.$$

² Оскільки функції синус і косинус можуть бути отримані одна із одної зсувом аргументу на $\pi/2$, то можна обмежитись тільки однією із них.

Фізичний зміст має тільки дійсна частина комплексної функції $\tilde{x}$, що і являє собою гармонійне коливання вигляду $\text{Re}(\tilde{x}) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$.

Швидкість тіла, що коливається, визначається як похідна від зміщення:

$$v = x' = A\omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) = v_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

де $v_m = A\omega$ – максимальне значення швидкості.

Прискорення тіла, що коливається, визначається як перша похідна від швидкості або друга похідна від зміщення:

$$a = v' = x'' = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) = -a_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (1.5)$$

де $a_m = A\omega^2$ – максимальне значення прискорення.

Знак «мінус» у формулі (1.5) вказує на те, що прискорення при гармонійному коливанні направлене в сторону, протилежну зміщенню. Згідно співвідношень (1.4) та (1.5) швидкість і прискорення зміщені одне відносно одного на кут $\pi/2$ (тобто, там, де швидкість найбільша, прискорення дорівнює нулю і навпаки).

Сила, що діє на тіло, яке коливається, пропорційна його зміщенню та направлена в протилежну сторону (до положення рівноваги):

$$F_{\text{max}} = ma_m = -mA\omega^2.$$

1.2. Маятники

Маятник – це система, що підвішена у полі тяжіння і здійснює механічні коливання. Коливання відбуваються під дією сили тяжіння, сили пружності та сили тертя. Маятником можна назвати лінійку, підвішену на цвях, люстру, коромисло важільних ваг тощо.

Фізичний маятник – це тверде тіло, яке здійснює коливання під дією сили тяжіння навколо нерухомої горизонтальної осі, що проходить через точку підвісу, розташовану вище його центру тяжіння.

Математичний маятник – матеріальна точка, підвішена на «нерозтяжній» «невагомій» нитці із закріпленням іншим кінцем, яка може під дією сили тяжіння здійснювати коливання по дузі кола в одній вертикальній площині (рис. 1.3а).

Період коливань цього маятника для невеликих ($\approx 5^\circ$) відхилень від положень рівноваги не залежить від амплітуди, а залежить тільки від довжини маятника l (відстані від точки підвісу до центра ваги матеріальної точки) та прискорення вільного падіння g :

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.6)$$

Математичний маятник є ідеалізованою математичною схемою, яка застосовується для спрощення математичного розрахунку характеру коливань реально існуючого фізичного маятника. Основна відмінність фізичного маятника від математичного полягає в тому, що його масу неможливо вважати точковою. Для будь-якого фізичного маятника можна підібрати такий математичний маятник, який має однакову з ним частоту коливань. Довжина математичного маятника, що має однакову частоту коливань з заданим фізичним маятником, називається приведеною довжиною цього фізичного маятника.

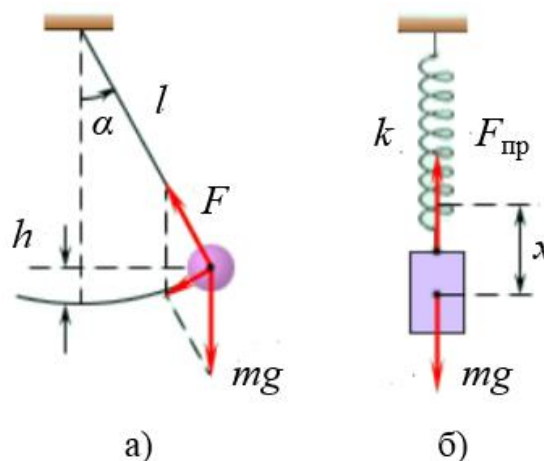


Рис. 1.3. Маятники: а) математичний; б) пружинний: k – коефіцієнт жорсткості пружини, x – зміщення вантажу, $F_{\text{пр}}$ – сила пружності, m – маса вантажу, g – прискорення вільного падіння, l – довжина нитки, h – висота підйому, α – кут відхилення, F – сила натягу нитки

Пружинний маятник являє собою тіло, підвішене на пружині (причому вважається, що масою пружини можна знехтувати) (рис. 1.3б). Період коливань пружинного маятника залежить від маси m тіла, що коливається, та жорсткості пружини k :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1.7)$$

Власні коливання маятників можуть бути описані гармонійним законом (1.2), який носить загальний характер. Він відповідає, наприклад, ситуації, коли із маятником здійснили дві початкові дії: відхилили на певну відстань від положення рівноваги та надали йому деяку початкову швидкість. Із формули (1.2) можна отримати два окремих випадки, коли одна з дій не виконалась. Перший випадок полягає в наступному: нехай маятник відхилили, але початкову швидкість не надали (тобто, відпустили без початкової швидкості). Тоді відхилення x у момент часу $t=0$ відповідатиме амплітуді A , а отже матимемо рівність $\sin(\varphi_0)=1$, з якої випливає, що початкова фаза $\varphi_0=\pi/2$. Це означає, що рівняння, яке описує такі коливання, матиме вигляд $x=A\cdot\sin(\omega t+\pi/2)=A\cdot\cos(\omega t)$. В другому випадку маятник не відхиляється від положення рівноваги, але ударом йому надається початкова швидкість. Тоді відхилення x у момент часу $t=0$ буде відсутнім (тобто, дорівнюватиме 0), а отже матимемо рівність $\sin(\varphi_0)=0$, з якої випливає, що початкова фаза $\varphi_0=0$. Тобто, рівняння, яке описує коливання, що виникають у другому випадку, матиме вигляд $x=A\cdot\sin(\omega t)$.

1.3. Добротність коливальних систем

Зменшення амплітуди вільних коливань з плином часу описується законом:

$$A_x = A_0 \cdot e^{-t\delta_t} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де δ_t – часовий коефіцієнт згасання, t – час, A_0 – початкове значення амплітуди, ω_0 – власна циклічна частота системи, φ_0 – початкова фаза.

Важливим параметром будь-якої коливальної системи є **добротність**, яка характеризує, у скільки разів запаси енергії в системі більші, ніж втрати енергії за один період коливань:

$$Q = \frac{2\pi E_0}{E_{\pi}},$$

де E_0 – енергія, накопичена в системі, E_{π} – енергія, що втрачається за один період.

Добротність характеризує якість коливальної системи, оскільки чим більше добротність, тим менші втрати енергії в системі за одне коливання. Добротність – кількісна характеристика резонансних властивостей коливальної системи, яка визначає, у скільки разів амплітуда вимушених гармонійних коливань при резонансі перевищує амплітуду при частоті, що набагато менша за резонансну, при однаковій амплітуді збурюючої сили. Величина добротності характеризує також і вибірковість коливальної системи: чим більше добротність, тим вужче смуга частот зовнішньої сили, яка може викликати інтенсивні коливання системи.

На практиці добротність визначають як співвідношення власної частоти системи f_0 до ширини смуги частот Δf , при яких енергія коливань становить не менше половини енергії при резонансі або амплітуда яких становить $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ від амплітуди при резонансі (рис. 1.4):

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}.$$

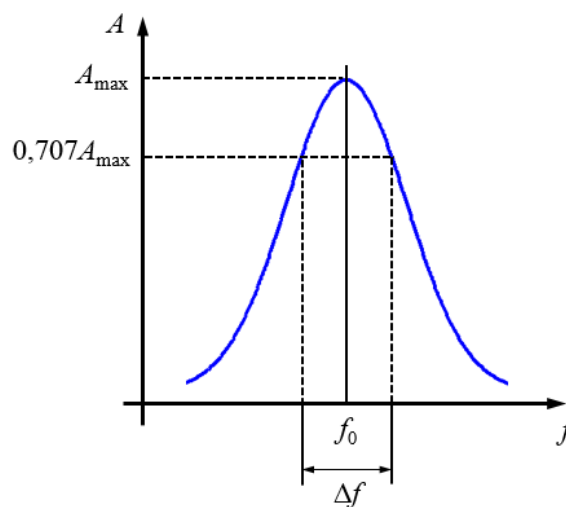


Рис. 1.4. Частотна характеристика коливальної системи із згасанням

Добротність обернено пропорційна швидкості згасання власних коливань у системі. Тобто, чим вище добротність коливальної системи, тим менше втрати енергії за кожен період і тим повільніше згасають коливання.

Добротність пов'язана з часовим коефіцієнтом згасання δ_t у коливальній системі та логарифмічним декрементом згасання Δ наступним співвідношенням:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\delta_t} = \frac{\pi}{\Delta},$$

де ω_0 – циклічна резонансна частота системи.

Логарифмічний декремент згасання є натуральним логарифмом співвідношення амплітуд коливань за один період гармонійного коливання.

1.4. Приклади розв'язку задач

Приклад 1.1. Період коливань одного математичного маятника T_1 , а іншого T_2 . Яким буде період математичного маятника, довжина якого буде рівною сумі довжин даних маятників?

Розв'язок:

За умовою $l=l_1+l_2$. Довжини маятників l_1 і l_2 знаходимо з використанням формули (1.6):

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}} \Rightarrow l_1 = \frac{gT_1^2}{4\pi^2},$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}} \Rightarrow l_2 = \frac{gT_2^2}{4\pi^2}.$$

$$\text{Тоді } T = 2\pi\sqrt{\frac{l_1+l_2}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{\frac{gT_1^2}{4\pi^2} + \frac{gT_2^2}{4\pi^2}}{g}} = \frac{2\pi}{2\pi} \cdot \sqrt{T_1^2 + T_2^2} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}.$$

$$\text{Відповідь: } T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}.$$

Приклад 1.2. Коливання вантажу масою 1 кг на пружині описується рівнянням $x = 0,1\sin\left(t + \frac{\pi}{2}\right)$ (м). Визначити: 1) амплітуду коливань; 2) циклічну частоту; 3) початкову фазу; 4) частоту; 5) період; 6) повну енергію; 7) максимальну швидкість руху вантажу; 8) коефіцієнт жорсткості пружини.

Розв'язок:

Для вирішення завдання скористаємося формулою (1.2), аналіз якої дає змогу визначити, що:

1. Амплітуда коливань $A=0,1$ м.
2. Циклічна частота $\omega=1$ рад/с.
3. Початкова фаза $\varphi_0=\pi/2$.

Частоту та період знаходимо за формулою (1.3):

4. Частота $f=1/6.28\approx 0,16$ Гц.
5. Період $T=2\pi$ с.

Повну енергію та максимальну швидкість визначаємо за формулою (1.1), враховуючи, що $v_m=\omega A$:

6. Повна енергія коливань $E=0,005$ Дж.
7. Максимальна швидкість коливань $v_m=0,1$ м/с.

Коефіцієнт жорсткості пружини розраховуємо за формулою (1.7), враховуючи (1.3):

8. $k=m\cdot\omega^2=1$ Н/м.

Приклад 1.3. Матеріальна точка здійснює гармонійні коливання вздовж осі X навколо положення рівноваги ($x=0$) з циклічною частотою $\omega=4$ рад/с. Визначити, в який момент часу після проходження положення рівноваги точка буде мати координату 25 см і швидкість 1 м/с.

Розв'язок:

За умовою задачі рівняння гармонійного коливання матиме вигляд:

$$x=A\cdot\sin(\omega t).$$

Швидкість коливань розраховується за формулою (1.4):

$$v=A\cdot\omega\cdot\cos(\omega t).$$

Розділивши перше рівняння на друге, одержимо:

$$\frac{x}{v} = \frac{\operatorname{tg}\omega t}{\omega} \Rightarrow \operatorname{tg}\omega t = \frac{x\omega}{v}.$$

Звідси

$$\omega t = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,25\cdot 4}{1}\right) = \frac{\pi}{4}.$$

Знаходимо час:

$$t = \frac{\pi}{4\omega} \approx 0,2 \text{ с.}$$

Відповідь: $t \approx 0,2 \text{ с.}$

1.5. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 1.1. Під дією сили $F=5 \text{ Н}$ пружина маятника розтягується на $\Delta x=0,02 \text{ м}$. До пружини прикріпили вантаж масою $m=1,5 \text{ кг}$. Визначити період коливань цього маятника.

Відповідь: $T=0,487 \text{ с.}$

Задача 1.2. Математичний маятник довжиною $l=120 \text{ см}$ здійснює $N=50$ коливань за $t=110 \text{ секунд}$. Визначити прискорення вільного падіння у місці знаходження маятника.

Відповідь: $g=9,78 \text{ м/с}^2$.

Задача 1.3. Знайти масу вантажу, який на пружині жорсткістю 100 Н/м за 3 хвилини здійснює 120 коливань.

Відповідь: $m=5,7 \text{ кг.}$

Задача 1.4. Амплітуда коливань математичного маятника $A=10 \text{ см}$. Його максимальна швидкість $v_m=0,5 \text{ м/с}$. Прискорення вільного падіння у місці коливання маятника $g=10 \text{ м/с}^2$. Визначити довжину маятника l .

Відповідь: $l \approx 0,4 \text{ м.}$

Задача 1.5. Один з маятників за деякий час здійснив $n_1=10$ коливань. Інший за той же час здійснив $n_2=6$ коливань. Різниця довжин маятників $\Delta l=16 \text{ см}$. Знайти довжини маятників l_1 та l_2 .

Відповідь: $l_1=9 \text{ см, } l_2=25 \text{ см.}$

Задача 1.6. Математичний маятник коливається з амплітудою A . Через час t після початку руху з положення рівноваги його відхилення становило $0,5A$. Визначити довжину маятника.

Відповідь: $l = \frac{36gt^2}{\pi^2}$.

Задача 1.7. При температурі $\theta_1=20^\circ\text{C}$ період коливань математичного маятника $T_1=2$ с. Як зміниться період коливань, якщо температура зросте до 30°C ? Коефіцієнт розширення матеріалу нитки маятника $\alpha=1,85 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Відповідь: $\frac{T_2}{T_1} = 1,000092$.

Задача 1.8. Дві пружини з коефіцієнтами жорсткості k_1 та k_2 з'єднують спочатку послідовно (рис. 1.5а), а потім – паралельно (рис. 1.5б). Знайти період власних коливань в даних системах.

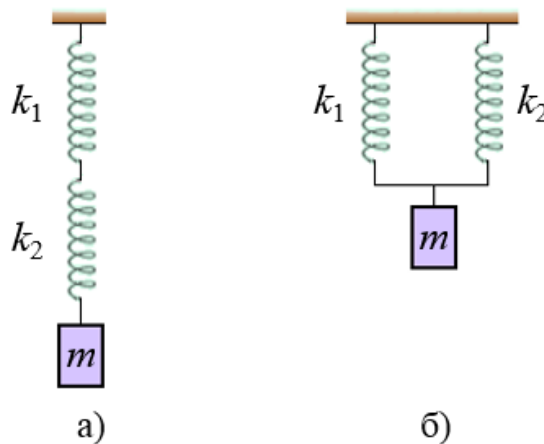


Рис. 1.5. З'єднання пружин (до задачі 1.8)

Відповідь: для послідовного з'єднання $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{\frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}}$,

для паралельного з'єднання $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}$.

Задача 1.9. Знайти потенціальну енергію $E_{\text{п}}$ математичного маятника масою $m=200$ г в положенні максимального зміщення, що відповідає куту відхилення нитки від вертикалі $\alpha=5^\circ$, якщо частота коливань маятника $f=0,5$ Гц. Прискорення вільного падіння у місці коливання маятника $g=9,8$ м/с². Вважати потенціальну енергію маятника в положенні рівноваги рівною нулю.

Відповідь: $E_{\text{п}}=0,0074$ Дж.

Задача 1.10. Скласти рівняння гармонійного коливання, якщо амплітуда коливання дорівнює 4 см, період – 0,01 с, початкова фаза – 0 рад.

Відповідь: $x = 4 \cdot \sin(200 \cdot \pi \cdot t)$.

Задача 1.11. Розрахувати амплітуду гармонійних коливань, якщо при зміщенні $x=1$ см фаза становить $\pi/6$ рад. Коливання здійснюються за синусоїдальним законом.

Відповідь: $A=2$ см.

Задача 1.12. Матеріальна точка здійснює гармонійні коливання амплітудою $A=0,5$ см з частотою $f=1$ Гц. Визначити швидкість точки у момент часу, коли зміщення становитиме 0,25 см.

Відповідь: $v=0,027$ м/с.

Задача 1.13. Невеликий вантаж коливається за законом $x = 2 \sin[\pi(t + 0,5)]$ см. Визначити амплітуду, період, початкову фазу коливання, а також максимальну швидкість та прискорення вантажу. Через який час після початку відліку руху вантаж проходить через положення рівноваги?

Відповідь: $A=2$ см, $T=2$ с, $\varphi_0=0,5\pi$, $v_{\text{max}}=2 \pi$ см/с, $a_{\text{max}}=2 \pi^2$ см/с², $t=0,5$ с.

Задача 1.14. За яку частину періоду тіло, що здійснює гармонійні синусоїдальні коливання, проходить весь шлях від середнього положення до крайнього? Першу половину шляху? Другу його половину?

Відповідь: $t_1 = \frac{T}{4}$, $t_2 = \frac{T}{12}$, $t_3 = \frac{T}{6}$.

Задача 1.15. Кулька масою $m=20$ г коливається за косинусоїдальним законом з періодом $T=2$ с. В початковий момент часу кулька мала енергію $E=0,01$ Дж та знаходилась від положення рівноваги на відстані $x_1=25$ см. Запишіть рівняння гармонійного коливання кульки та закон зміни сили, що повертає її в положення рівноваги.

Відповідь: $x = 0,32 \cos \pi(t + 0,21)$ м, $F = -0,063 \cos \pi(t + 0,21)$ Н.

Запитання для самоконтролю

1. Які коливання називають вільними? Наведіть приклади.
2. Які коливання називають вимушеними? Наведіть приклади.
3. Поясніть, як визначається повна механічна енергія точки, що коливається за рахунок дії пружних сил.
4. Поясніть, що таке період коливання. Як пов'язаний період коливання із частотою?
5. Який вид має рівняння гармонійного коливального руху?
6. Як визначити швидкість та прискорення тіла, що коливається?
7. Поясніть процес перетворення енергії при гармонійному коливальному русі на прикладі пружинного або математичного маятника.
8. Що означає, що коливання відбуваються в однакових фазах, протифазі, із зсувом фаз?
9. У скільки разів необхідно збільшити коефіцієнт жорсткості пружини, щоб період коливань вантажу, підвішеного на ній, зменшився в 4 рази?
10. Поясніть відмінність між математичним та пружинним маятниками.
11. Що таке добротність коливальної системи?

2. ХВИЛІ В ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Будь-яка коливальна система може віддавати енергію у зовнішнє середовище. Це можливо завдяки тому, що внаслідок пружності середовища окремі його невеликі ділянки самі є мініатюрними коливальними системами.

Якщо в результаті зсуву частинок середовища в якому-небудь місці середовища порушено рівноважне значення його щільності, то сили, що діють з боку оточуючих частинок, змусять зміщені частинки рухатися назад, тобто сили пружності будуть прагнути відновити порушену рівновагу, однак за інерцією частинки середовища пройдуть це положення рівноваги і змістяться в протилежну сторону. При такому русі частинки, що межують з частинками, які коливаються, також будуть відчувати дію зсувних сил, відхиляючись від стійкого положення рівноваги. Отже, кожне збурення, один раз виникнувши у певній ділянці середовища, буде поступово поширюватися, захоплюючи частинки, що віддалені від місця початкового збурення.

Перебуваючи в будь-якому середовищі, коливальна система взаємодіє з прилеглими до неї частинками. Здійснюючи свої коливання, вона створює навколо себе періодичний ряд збурень, тобто діє на прилеглі частинки як деяка періодична зовнішня сила. Ця сила змушує частинки середовища здійснювати коливання з частотою сили збурення, причому коливальний процес завдяки взаємодії частинок буде поширюватися в середовищі з деякою характерною для властивостей даного середовища швидкістю.

Коливання, що поширюються в просторі із плином часу, називаються *хвилею*. Під час поширення будь-якої хвилі відбувається перенесення енергії³ та певного стану коливального середовища (наприклад, розрідження-стиснення), але не перенесення речовини.

Пружна хвиля – це механічні збурення (деформації), що поширюються в середовищі, яке має властивість пружності. При цьому кожна частинка середовища,

³ Це і є принциповою відмінністю хвиль від коливань: при коливаннях не відбувається перенесення енергії, це, так би мовити, «місцеві» перетворення енергії.

що бере участь у хвильовому русі, коливається біля положення своєї рівноваги, передаючи свою енергію сусіднім частинкам.

Пружне середовище – це таке середовище, будь-який виділений об'єм якого має властивість пружності. **Пружністю** називається властивість тіл або виділених об'ємів середовища відновлювати свою форму після припинення дії сил, що викликають деформацію.

На рис. 2.1 наведена класифікація пружних хвиль⁴ в залежності від діапазону частот. В неруйнівному контролі найчастіше використовуються ультразвукові хвилі, що являють собою процес поширення в середовищі пружних коливань (коливань пружного середовища) у діапазоні частот від 20 кГц до 1 ГГц. В деяких методах неруйнівного контролю (наприклад, метод вільних коливань, шумодіагностика тощо) використовується звуковий діапазон частот від 20 Гц до 20 кГц (цей діапазон відповідає спектру чутності людського вуха). Інфразвуковий та гіперзвуковий діапазони частот не знайшли практичного застосування в неруйнівному контролі.



Рис. 2.1. Класифікація пружних хвиль

2.1. Основні параметри пружної хвилі

Пружні (акустичні) хвилі можуть поширюватись у твердому, рідкому та газоподібному середовищах.

Основними параметрами, що характеризують пружну хвилю є: частота f , період T , амплітуда A , швидкість поширення C , довжина хвилі λ та фаза φ .

Довжина хвилі λ – це відстань між найближчими двома точками, що коливаються в однакових фазах.

⁴ У підручнику поняття «пружна хвиля», «акустична хвиля» та «механічна хвиля» використовуються як синоніми.

Довжина хвилі λ пов'язана з частотою f та швидкістю поширення звуку C співвідношенням:

$$\lambda = \frac{C}{f}. \quad (2.1)$$

Фаза хвилі φ – це параметр, що показує, яка частина періоду пройшла з моменту початку останнього циклу коливань.

Поширення плоских гармонійних пружних хвиль у найпростішому випадку описується формулою:

$$\xi(x, t) = A \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{C}\right)\right], \quad (2.2)$$

де $\xi(x, t)$ – зсув частинок середовища з координатою x у момент часу t відносно положення рівноваги; A – амплітуда зсуву; ω – циклічна частота; C – швидкість поширення пружних коливань.

Вираз (2.2) визначає плоску гармонійну хвилю, що поширюється у додатному напрямку осі X . Як відомо, хвиля – це просторово-часовий процес. Для дослідження цього процесу і полегшення розуміння фізичної сутності його можна розглядати або в певній точці простору ($x_0 = \text{const}$), або в певний момент часу ($t_0 = \text{const}$).

У першому випадку при $x_0 = \text{const}$ вираз (2.2) прийме такий вигляд:

$$\xi(t) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_0). \quad (2.3)$$

Вираз (2.3) описує гармонійне коливання частинки середовища, що розташована в точці x_0 . Величина $\varphi_0 = \omega x_0 / C$ визначає початкову фазу коливань. Для характеристики коливального процесу додатково вводиться поняття **періоду коливань** $T = 1/f$ – інтервалу часу між двома послідовними станами частинки із однаковою фазою коливань.

У другому випадку при $t_0 = \text{const}$ вираз (2.2) записується в наступному вигляді:

$$\xi(x) = A \cdot \sin\left[\omega\left(t_0 - \frac{x}{C}\right)\right]. \quad (2.4)$$

Вираз (2.4) визначає процес, який є періодичним щодо координати X (напрямку поширення хвилі). Для характеристики цього процесу використовується поняття довжини хвилі $\lambda = C \cdot T$ – відстані, яку хвиля проходить за час T .

2.2. Характеристики акустичного поля

Акустичне поле – це простір, у межах якого поширюється акустична (пружна) хвиля. Фізичними величинами, що характеризують акустичне поле, є: акустичний тиск P , коливальна швидкість частинок середовища v , густина середовища ρ та температура T .

Відношення акустичного тиску до відповідної йому коливальної швидкості визначає **питомий акустичний імпеданс**⁵ (**питомий хвильовий опір**):

$$z_{\Pi} = \frac{P}{v}.$$

У загальному випадку це комплексна величина, що залежить від фазового зсуву між тиском та коливальною швидкістю, який в свою чергу залежить від просторових координат, характеру хвильового поля та умов поширення хвилі.

Для плоскої хвилі, що біжить, тиск та коливальна швидкість синфазні, а отже, питомий акустичний імпеданс не залежить ні від часу, ні від координати та є дійсною величиною. У такому випадку використовують поняття **акустичний імпеданс (хвильовий опір)**, який залежить тільки від властивостей середовища:

$$z = \rho C, \quad (2.5)$$

де ρ – середня густина середовища, в якій поширюється акустична хвиля, C – швидкість поширення хвилі.

Зауважимо, що в середовищах з великими втратами акустичної енергії величина z навіть для плоскої хвилі набуває комплексного характеру, однак у більшості випадків її можна вважати дійсною.

Для ідеальної (без втрат енергії) плоскої хвилі питомий акустичний імпеданс рівний акустичному імпедансу $z_{\Pi}=z$, а отже:

$$\frac{P}{v} = \rho C. \quad (2.6)$$

⁵ Від лат. impedio – перешкоджати.

Ураховуючи, що амплітуда коливальної швидкості $v = \omega A$, то із рівнянь (2.5) та (2.6) можна отримати залежність, яка пов'язує тиск P з амплітудою зсуву A частинок середовища (для плоскої хвилі, що біжить):

$$P = \rho C v = \rho C \omega A = 2\pi f \rho C A = z \omega A.$$

Хвильовий рух супроводжується перенесенням енергії від джерела коливань у різні точки середовища. Під час поширення хвилі частинки середовища здійснюють коливальні рухи біля положень рівноваги, не переміщуючись при цьому поступально. У такому випадку виникає явище перенесення енергії без одночасного перенесення маси. Ця енергія складається з кінетичної енергії частинок, що коливаються, і внутрішньої потенціальної енергії деформованих ділянок середовища. Тому природно, що для акустичної хвилі важливою характеристикою є енергія E , яка переноситься нею. Енергія гармонійних коливань визначається за формулою:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2.$$

де m – маса частинки, що коливається, A – амплітуда, ω – циклічна частота.

Акустична енергія E , що припадає на одиницю об'єму речовини V , в якому поширюється акустична хвиля, називається **густиною енергії** W^6 та вимірюється в Дж/м³:

$$W = \frac{E}{V}.$$

Густина енергії плоскої гармонійної хвилі, що біжить, визначається як:

$$W(x, t) = W_k(x, t) + W_n(x, t) = \rho A^2 \omega^2 \cdot \sin^2(\omega t - kx).$$

Очевидно, що для гармонійної хвилі середнє за період (у часі або просторі) значення густини енергії розраховується як:

$$W = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho C^2} = 2\pi^2 f^2 \rho A^2. \quad (2.7)$$

Енергія, що переноситься хвилею в одиницю часу через деяку поверхню, називається **потокем енергії** через цю поверхню. Кількість енергії, що переноситься

⁶ Також ця величина може мати назву «об'ємна густина енергії».

хвилею за одиницю часу через одиничну площадку, розташовану перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, називається *густиною потоку енергії*. Середнє в часі значення густини потоку енергії називається *інтенсивністю* або *силою хвилі* I , яка пов'язана з середнім значенням густини акустичної енергії W залежністю:

$$I = W \cdot C. \quad (2.8)$$

Із рівнянь (2.6), (2.7) і (2.8) можна вивести залежність, яка пов'язує інтенсивність хвилі з амплітудою акустичного тиску або коливальної швидкості:

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{z} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho C} = \frac{1}{2} z v^2 = \frac{1}{2} \rho v^2 C = \frac{P v}{2}. \quad (2.9)$$

Інтенсивність, зазвичай, вимірюється у Вт/м², але для її визначення застосовується також логарифмічна величина – рівень сили хвилі в децибелах (дБ). Децибели є десятковим логарифмом відношення певної інтенсивності до деякого граничного її значення, за яке приймається величина 10⁻¹⁶ Вт/см² (ця величина приблизно відповідає порогу чутності людського вуха). Так, наприклад, рівню інтенсивності 150 дБ відповідає сила хвилі, що може бути визначена з рівняння 150 = 10 · lg($I/10^{-16}$), тобто $I = 0,1$ Вт/см². Інтенсивність 10⁻⁹ Вт/см² відповідає голосній розмові, а при інтенсивності 10⁻³ Вт/см² людина відчуває біль.

У випромінювачах ультразвукових приладів використовуються інтенсивності порядку сотих або десятих часток Вт/см², але до приймачів вони приходять ослабленими в тисячі або навіть мільйони разів.

У деяких застосуваннях в акустиці важливе значення має величина P_L , яка називається *тиском випромінювання* (тиск Ланжевена). Якщо плоска звукова хвиля інтенсивністю I падає на перешкоду, що повністю відбиває звукові коливання, то хвиля чинить на перешкоду тиск, рівний:

$$P_L = \frac{2I}{C}.$$

Якщо перешкода повністю поглинає звук, то тиск випромінювання буде в половину меншим:

$$P_L = \frac{I}{C}.$$

2.3. Властивості акустичних хвиль

Основними властивостями акустичних хвиль є: 1) поглинання; 2) розсіювання; 3) віддзеркалення; 4) заломлення; 5) інтерференція; 6) дифракція; 7) дисперсія; 8) поляризація.

Віддзеркалення – фізичний процес взаємодії хвиль з поверхнею, внаслідок якого змінюється напрямок хвильового фронту на межі двох середовищ з різними властивостями, причому хвильовий фронт повертається в середовище, з якого він прийшов. Одночасно з віддзеркаленням хвиль на межі поділу середовищ, як правило, відбувається заломлення хвиль, якщо хвиля падає під кутом до поверхні (за винятком випадків повного внутрішнього віддзеркалення).

Заломлення також пов'язане зі зміною напрямку хвильового фронту, але при заломленні розглядається хвиля, що пройшла в друге середовище. Заломлення спостерігається, коли фазові швидкості акустичних хвиль у контактуючих середовищах відрізняються.

Якщо під дією збурень, які виникають під час проходження лінійних⁷ хвиль, властивості середовища не змінюються, то у такому випадку хвилі підкоряються **принципу суперпозиції**⁸ (додавання), який полягає в наступному: під час поширення у середовищі декількох хвиль, кожна з них поширюється так, начебто інші хвилі відсутні, а результуюче зміщення частинки середовища дорівнює геометричній сумі зміщень частинок.

В результаті суперпозиції хвиль виникає явище **інтерференції**, яке полягає у взаємному збільшенні або зменшенні результуючої амплітуди двох або декількох хвиль при їх накладенні одна на одну. Інтерферувати можуть всі хвилі, проте стійка (стаціонарна) інтерференційна картина буде спостерігатися тільки для **когерентних хвиль**, які мають однакові частоти, постійну різницю фаз і коливання яких відбуваються в одній площині. Інтерференція супроводжується чергуванням максимумів і мінімумів інтенсивності в просторі (тобто, внаслідок інтерференції

⁷ Лінійні хвилі – хвилі з невеликою амплітудою, властивості яких описуються стандартним хвильовим рівнянням для ідеальної субстанції.

⁸ Від латинського *super* – *над* та *positio* – *положення*.

відбувається перерозподіл енергії в просторі). Енергія не розподіляється рівномірно по всіх частинках середовища, а концентрується у точках, де є максимуми, за рахунок того, що в точки з мінімумами зовсім не надходить.

Під час поширення двох однакових плоских хвиль у протилежних напрямках, що має місце, наприклад, при нормальному віддзеркаленні хвилі від межі поділу двох середовищ (наприклад, твердого і газоподібного), у кожній точці середовища коливання, які обумовлені падаючою та відбитою хвилями, додаються. У такому випадку утворюється результуюче коливання з тією ж довжиною хвилі, але таке, що не переміщується в просторі. Таке коливання називається *нерухомою хвилею* і описується наступним рівнянням:

$$\xi(x,t) = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) = 2A \cdot \cos\left(\omega \frac{x}{C}\right) \cdot \cos(\omega t),$$

На відстанях у половину довжини нерухомої хвилі розташовуються точки, що називаються *вузлами*, у яких відсутні коливання. Посередині між вузлами розташовуються *пучності* – точки, у яких коливання максимальні. Хвиля, що біжить, переносить енергію коливального руху в напрямку поширення хвилі. Нерухома хвиля енергію не переносить, оскільки падаюча і віддзеркалена хвилі однакової амплітуди несуть однакову енергію в протилежних напрямках. У такому випадку повна енергія результуючої нерухомої хвилі, укладеної між вузлами, залишається постійною. Лише в межах відстаней рівних $\lambda/2$ відбувається перетворення кінетичної енергії в потенціальну.

Строго кажучи, нерухома хвиля може існувати тільки за відсутності втрат у середовищі поширення і повного віддзеркалення падаючої хвилі. У реальному середовищі існує режим змішаних хвиль: крім нерухомої хвилі присутня і хвиля, що біжить, яка переносить енергію до місць поглинання і випромінювання.

Як зазначалось вище, нерухома хвиля є результатом інтерференції падаючої та віддзеркаленої хвиль. Характер віддзеркалення та амплітуда віддзеркаленої хвилі залежить від межі поділу двох середовищ, від якої відбувається віддзеркалення. Визначальну роль в цьому відіграють імпеданси середовищ, що межують⁹. Якщо

⁹ Детальніше дивись у розділі 3.1.

імпеданс середовища, в яке падає хвиля, менший імпедансу середовища, з якого падає хвиля (тобто, $z_1 > z_2$), то така межа поділу називається «м'якою». Якщо ж $z_2 = 0$, то межа називається «абсолютно м'якою». У випадку, коли $z_1 < z_2$, межа називається «жорсткою», якщо ж $z_2 = \infty$ – «абсолютно жорсткою».

Утворення нерухомих хвиль є резонансним явищем¹⁰, яке відбувається на резонансних або власних коливаннях тіла. Якщо обмежити пружне безмежне тіло двома плоскопаралельними поверхнями, розташованими на відстані l , та почати збуджувати ультразвукову хвилю, що поширюється від лівої межі, то така хвиля після послідовного віддзеркалення від правої межі, а потім від лівої, може за певних умов співпадати по фазі із збуджуючою. У результаті виникає механічний резонанс, очевидною умовою якого може бути наступне: сумарний фазовий набіг, що включає фазові зміни при віддзеркаленні на двох межах поділу (лівої і правої) і фазовий зсув на довжині пробігу l (прямий і зворотний шлях), повинні бути кратні 2π . Якщо протилежні межі однотипні (або акустично м'які, або жорсткі), то залишається єдина умова – фазовий зсув на довжині l повинен бути кратним 2π . У такому випадку резонанс виникає, якщо довжина l кратна довжині півхвилі:

$$l = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{C}{2f} . \quad (2.10)$$

де n – номер гармоніки, на якій коливається стрижень.

Якщо протилежні плоскопаралельні поверхні пружного тіла акустично м'які (наприклад, стрижень або пластина в повітрі), то при резонансі на віддзеркалюючих поверхнях знаходяться вузли акустичного тиску та пучності коливальної швидкості. Звідси впливає умова закріплення стрижня для збудження його на певній гармоніці (рис. 2.2), тобто в точках, де розташовані вузли коливальної швидкості на даній гармоніці.

¹⁰ **Резонанс** (від лат. слова resonans – той, що дає відгомін, відзвук) – явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, що настає при співпадинні частоти зовнішнього впливу з власною частотою коливальної системи, яка визначається її властивостями. Тобто, амплітуда коливань різко зростає за рахунок «підживлення» коливального процесу ззовні.

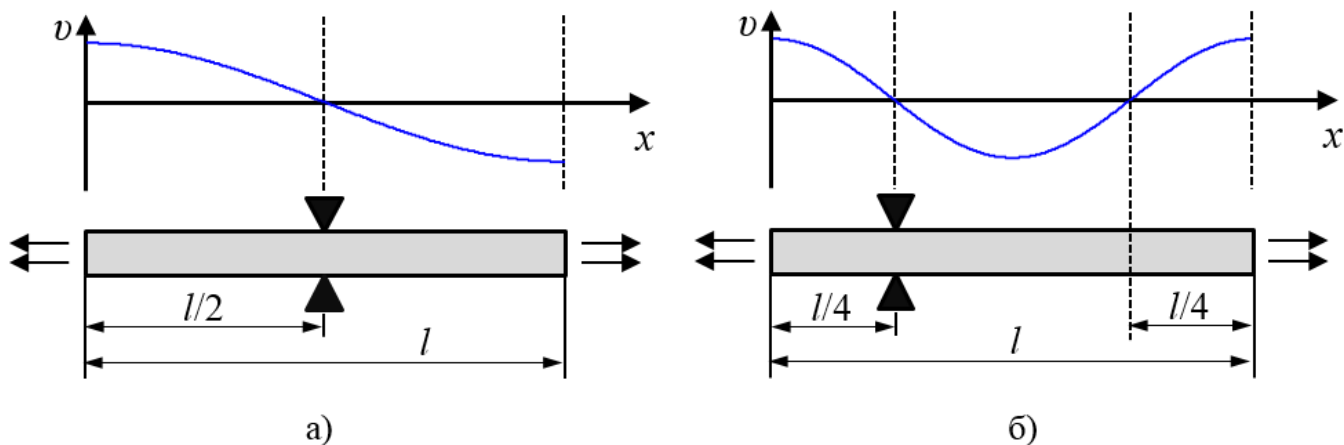


Рис. 2.2. Розташування точок закріплення стрижневих резонаторів: а) для забезпечення резонансу на першій гармоніці; б) для забезпечення резонансу на другій гармоніці

Дифракція (лат. diffractus – буквально розламаний, переламаний) акустичних хвиль – явище, яке проявляє себе, як відхилення від законів геометричної акустики під час поширення хвиль (тобто, відхилення від законів прямолінійного поширення). У вузькому сенсі дифракція – це огинання хвилями перешкод і їх проникнення в область геометричної тіні.

Найбільш виразно дифракція проявляється у випадку, коли довжина хвилі співмірна або більша за розмір перешкоди. Дифракція спостерігається і тоді, коли на шляху хвилі виявляється перешкода, розміри якої набагато більші її довжини. У цьому випадку хвиля відбивається від перешкоди, проте за рахунок дифракції на краях перешкоди хвиля ніби «заходить» за неї (проникає в область геометричної тіні).

Дифракція являє собою універсальне хвильове явище і характеризується одними і тими ж законами при спостереженні хвильових полів різної природи. Дифракція нерозривно пов'язана з явищем інтерференції. Між інтерференцією і дифракцією немає суттєвої відмінності – обидва явища пов'язані з перерозподілом хвильової енергії у просторі в результаті суперпозиції хвиль. До того ж, саме явище дифракції часто трактують як випадок інтерференції обмежених в просторі хвиль (інтерференція вторинних хвиль).

Явище дифракції пояснюється за допомогою принципу Гюйгенса-Френеля. Християн Гюйгенс в 1678 р. увів наступний постулат: **кожна точка, до якої**

доходить хвиля, стає центром вторинних хвиль, а обвідна цих хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу (рис. 2.3).

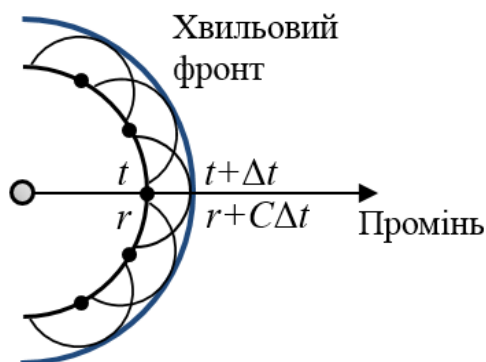


Рис. 2.3. Графічна інтерпретація принципу Гюйгенса

Принцип Гюйгенса, будучи чисто геометричним способом побудови хвильових поверхонь, вирішує лише задачу про напрямок поширення хвильового фронту, але не зачіпає по суті питання про амплітуду, а отже, і про інтенсивність хвиль, що поширюються у різних напрямках. Френель вклав у принцип Гюйгенса фізичний зміст, доповнивши його ідеєю інтерференції вторинних хвиль. За Френелем правило побудови обвідної повинно бути замінено розрахунком взаємної інтерференції вторинних хвиль. Згідно принципу Гюйгенса-Френеля: *кожен елемент хвильового фронту можна розглядати як центр вторинного збурення, який породжує вторинні сферичні хвилі, а акустичне поле в кожній точці простору буде визначатися інтерференцією цих хвиль*. При цьому всі вторинні джерела, що розміщені на поверхні фронту, когерентні між собою.

За допомогою принципу Гюйгенса також пояснюються закони віддзеркалення та заломлення хвиль.

2.4. Форми хвильових фронтів

Хвильова поверхня – це геометричне місце точок середовища, що коливаються в одній фазі.

Окремим випадком хвильової поверхні є *фронт хвилі* – сукупність точок середовища, що коливаються в одній фазі, до яких в даний момент часу дійшов

гармонійний хвильовий процес. Якщо в середовищі поширюється короткочасне збурення (імпульс), то фронтом хвилі називається межа між збуреною та незбуреною областями середовища.

Лінія, напрямок якої в кожній точці збігається з напрямком потоку енергії випромінювання хвильового пучка, називається **променем**. В однорідному середовищі промінь перпендикулярний фронту хвилі. Вздовж променів відбувається перенесення енергії.

В залежності від геометричної форми фронту розрізняють такі типи хвиль: **плоска, сферична і циліндрична** (рис. 2.4).

Плоскі хвилі збуджуються пластиною, якщо її поперечні розміри набагато більші за довжину хвилі. Хвильові поверхні (як і фронт) плоскої хвилі мають вигляд паралельних площин, а промені являють собою паралельні прямі. У випадку плоскої хвилі тиск в будь-якій площині хвилі є постійним (тобто, тиск не залежить від пройденої хвилею відстані¹¹). Під час поширення плоскої хвилі розміри хвильових поверхонь в міру віддалення від пластини не змінюються (або майже не змінюються). Тому енергія хвилі не розсіюється в просторі, а амплітуда коливань зменшується тільки за рахунок дії сил тертя.

Для неплоских хвиль в силу закону збереження енергії спостерігатиметься деякий закон зміни тиску та інтенсивності з відстанню в силу розходження променів.

Джерелом сферичної хвилі є точковий випромінювач або шароподібне тіло, що коливається, розміри якого дуже малі. Хвильові поверхні сферичної хвилі мають вигляд концентричних сфер (див. рис. 2.4а). Акустичний тиск в певній точці сферичної хвилі залежить від пройденого шляху за наступним законом:

$$\frac{P_{\text{сф2}}}{P_{\text{сф1}}} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.11)$$

¹¹ Це твердження справедливе лише за умови, що хвиля поширюється в середовищі без втрат енергії і означає, що форма хвильової поверхні плоскої хвилі не обумовлює зменшення тиску із відстанню. Для середовища із втратами енергії тиск зменшуватиметься з відстанню навіть і для плоскої хвилі, проте це зменшення обумовлюватиметься поглинанням і розсіянням хвилі в середовищі.

Тому що інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди акустичного тиску, залежність інтенсивності від відстані для сферичної хвилі виражатиметься наступним законом:

$$\frac{I_{\text{сф2}}}{I_{\text{сф1}}} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (2.12)$$

Загалом точковий характер джерела випромінювання є певним допущенням. Реальні джерела мають деяку просторову протяжність, тому поблизу них хвилі не є сферичними. Закони (2.11) та (2.12) справедливі для відстаней, що значно більші за розміри джерела.

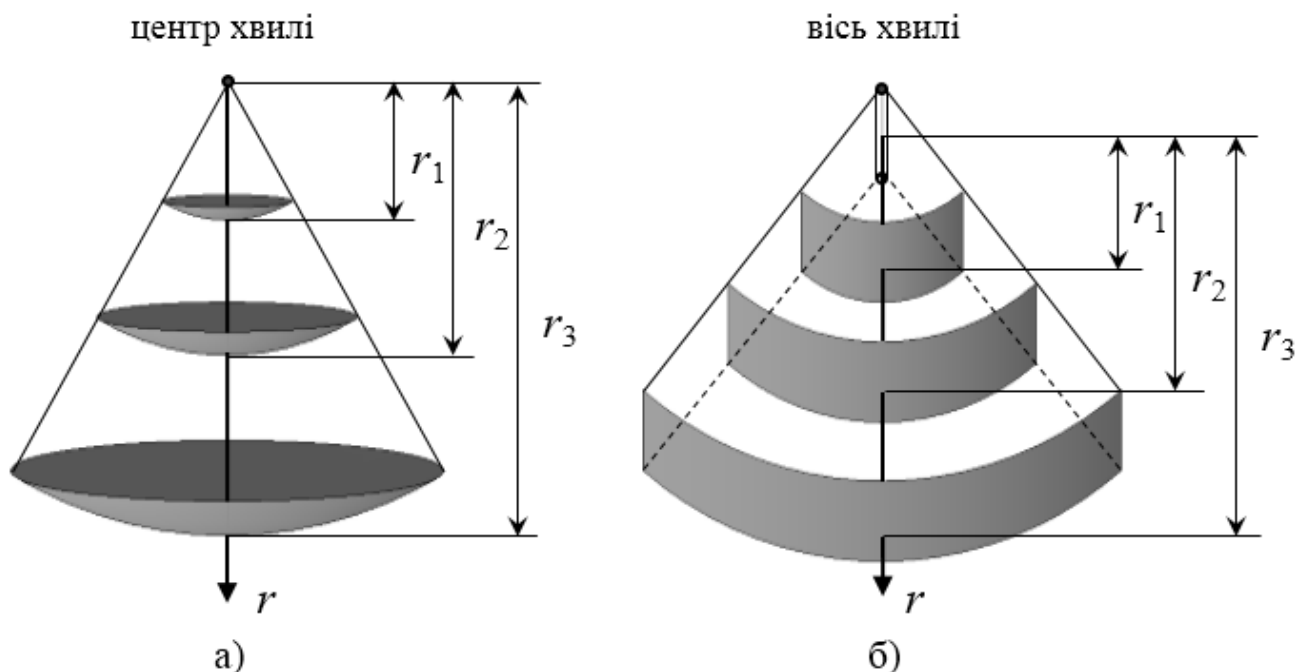


Рис. 2.4. Поширення хвиль: а) сферичної (від точкового джерела);
б) циліндричної (від джерела у вигляді лінії)

Джерелом циліндричної хвилі є циліндричне тіло (стрижень, циліндр тощо), довжина якого значно більше його поперечних розмірів. Хвильові поверхні мають вигляд концентричних циліндрів (див. рис. 2.4б). Залежності тиску та інтенсивності від відстані наступні:

- звуковий тиск:

$$\frac{P_{\text{ц2}}}{P_{\text{ц1}}} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}. \quad (2.13)$$

- інтенсивність:

$$\frac{I_{ц2}}{I_{ц1}} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.14)$$

У формулах (2.11)-(2.14) не враховано згасання хвилі, що обумовлене втратами енергії внаслідок поглинання і розсіювання.

Для плоскої хвилі фазовий зсув між тиском і коливальною швидкістю відсутній (тобто, вони синфазні), тоді як для сферичної і циліндричної хвилі фазовий зсув існує і залежить від відстані r :

- для сферичної хвилі:

$$\Delta\varphi_c = \varphi_p - \varphi_v = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{2\pi r};$$

- для циліндричної хвилі:

$$\Delta\varphi_{ц} = \varphi_p - \varphi_v = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{4\pi r}.$$

2.5. Типи акустичних хвиль

Акустичні хвилі поширюються з різною швидкістю у різних середовищах. **Швидкість акустичної хвилі** (швидкість звуку, ультразвуку) – це швидкість поширення певного стану в матеріальному середовищі (наприклад, стиснення або розрідження).

Можливість виникнення або поширення того чи іншого типу акустичних хвиль визначається у першу чергу фізико-механічними властивостями та геометричними характеристиками (розмірами і формою) середовища. З урахуванням цього акустичні хвилі можна розділити на три групи:

- хвилі в безмежних та напівбезмежних середовищах, геометричні розміри яких значно перевищують довжину акустичної хвилі;
- хвилі на межах поділу напівбезмежних середовищ;
- хвилі в обмежених середовищах, у яких принаймні один з геометричних розмірів співмірний з довжиною хвилі.

Хвилі, що поширюються в безмежних та напівбезмежних середовищах, називаються об'ємними. Хвилі, що виникають на межах поділу напівбезмежних середовищ, називаються поверхневими. Хвилі в обмежених середовищах називаються нормальними.

Швидкість поширення об'ємних і поверхневих хвиль визначається тільки пружними властивостями середовища і не залежить від частоти і загасання в матеріалі. У той час як швидкість поширення нормальних хвиль залежить від частоти.

2.5.1. Об'ємні хвилі

В об'ємі однорідного ізотропного¹² нескінченно протяжного середовища можуть поширюватися акустичні хвилі тільки двох типів: поздовжні і поперечні (зсувні). Загальна назва цих хвиль – об'ємні хвилі.

Поздовжня хвиля – хвиля, при проходженні якої частинки середовища коливаються паралельно напрямку її поширення (рис. 2.5а).

Поздовжні хвилі можуть поширюватись як в твердих середовищах, так рідинах і газах, тому що при їх проходженні виникає деформація стиснення і розтягування. Сили пружності, пов'язані з цією деформацією, що викликають коливання окремих ділянок середовища, виникають в усіх середовищах. Така властивість середовищ називається властивістю пружності об'єму.

Поперечна (зсувна) хвиля – хвиля, при проходженні якої частинки середовища коливаються перпендикулярно напрямку її поширення (рис. 2.5б).

В поперечній хвилі виникає пружна деформація (деформація зсуву). Окремі шари речовини зсуваються один відносно одного. Об'єм тіла при цьому не змінюється. При деформації зсуву в твердому тілі виникають сили пружності, що намагаються повернути тіло у вихідний стан, тому що атоми в твердому тілі

¹² Ізотропія (від грец. *isos* – рівний, однаковий і *tropos* – напрямок) – незалежність фізичних властивостей середовища від напрямку в ньому. Середовища, в яких властивості залежать від напрямку, називають анізотропними (від грец. *anisos* – нерівний). В ізотропному середовищі всі напрямки поширення хвилі рівноправні. В анізотропних середовищах швидкість хвилі може бути залежною від напрямку поширення.

знаходяться в кристалічній ґратці і жорстко «сидять» в ній. Саме ці сили і викликають коливання частинок середовища, прагнучи повернути атом назад в ґратку. Зсув шарів один відносно одного в газах і рідинах не призводить до появи сил пружності, тому що атоми і молекули рухаються хаотично і жорстко не зв'язані.

Таким чином, поперечні хвилі можуть поширюватись тільки в твердих середовищах, і не можуть поширюватись в газах та рідинах. Це пов'язано з тим, що гази та рідини на відміну від твердих середовищ не мають властивості пружності форми.

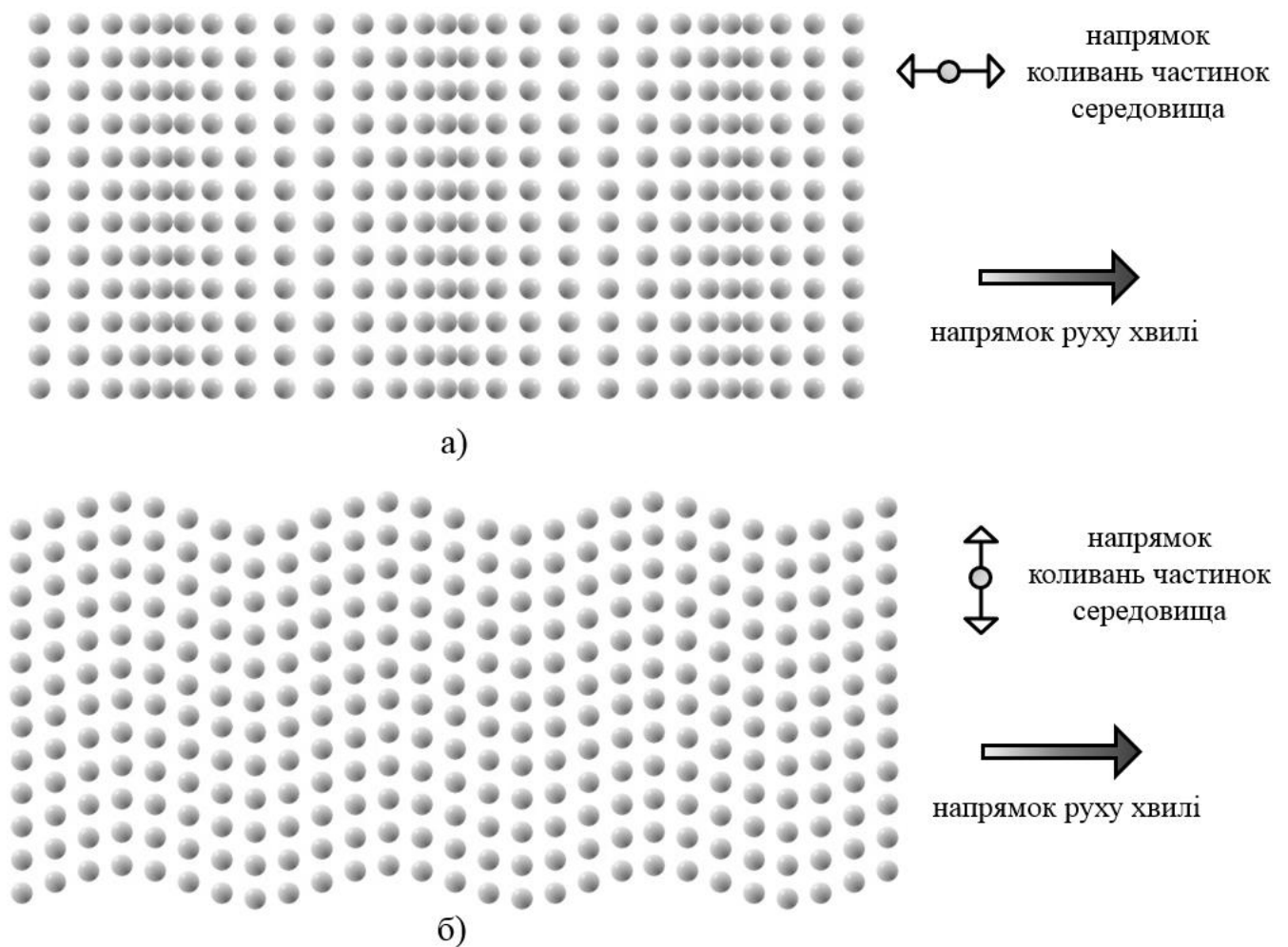


Рис. 2.5. Рух частинок середовища при поширенні акустичного хвилі:

а) поздовжньої; б) поперечної

В газах швидкість поздовжніх хвиль визначається за формулою:

$$C_l = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}},$$

де γ – показник адіабати ($\gamma = c_p/c_v$ – співвідношення питомих теплоємностей газу при постійних тиску та об'ємі), R – молярна газова постійна, T – термодинамічна температура (в Кельвінах), M – молярна маса, P – тиск, ρ – густина.

Швидкості поздовжніх і поперечних хвиль в твердих тілах залежать від трьох параметрів: модуля пружності E (модуль Юнга), густини ρ та коефіцієнту Пуассона ν . Формули для їх розрахунку наступні:

- поздовжня хвиля:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (2.15)$$

- поперечна хвиля:

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} \cong \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

де G – модуль зсуву.

Співвідношення швидкостей поперечних і поздовжніх хвиль в одному й тому ж середовищі залежить тільки від коефіцієнта Пуассона ν :

$$\frac{C_t}{C_l} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}}.$$

Чисельне значення коефіцієнта Пуассона для більшості металів знаходиться в межах від 0,21 до 0,43, тому співвідношення швидкостей поперечної і поздовжньої хвиль змінюється в межах від 0,37 до 0,60. Зокрема, для сталі ($\nu \approx 0,28$) можна прийняти:

$$C_t \approx 0,55 C_l.$$

Фактично, швидкість поперечних хвиль в сталі приблизно у два рази менше швидкості поздовжніх хвиль.

Поперечні хвилі володіють однією властивістю, якою не володіють поздовжні хвилі, – властивістю поляризації. **Поляризованою хвилею** називається така поперечна хвиля, в якій коливання всіх частинок відбуваються в одній площині.

Швидкість ультразвукової хвилі може змінюватися в залежності від структури речовини та від наявності домішок. На швидкість ультразвуку впливають внутрішні і зовнішні напруження у матеріалі. Також швидкість ультразвуку може залежати від

фазового стану речовини: пароподібний (газовий) стан, рідкий або твердий. Так, наприклад, швидкість ультразвуку у прісній воді дорівнює 1482 м/с, у водяній парі – 405 м/с, а у льоді – 3980 м/с. У солоному розчині, коли густина рідини помітно підвищується, збільшується і швидкість ультразвуку. Так, у морській воді швидкість ультразвуку більше, ніж у прісній, і дорівнює 1533 м/с, а у насиченому розчині кухонної солі (NaCl) вона складає 1650 м/с.

Величина пружних параметрів середовища може змінюватися зі зміною температури, а отже швидкість хвилі залежить також і від температури матеріалу, в якому вона поширюється: чим вище температура, тим більша швидкість хвилі.

Швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль майже у всіх твердих тілах перебуває в межах 2000-6000 м/с, причому в більшості конструкційних металів вона становить 5000-6000 м/с, а в пластмасах: 2000-3000 м/с. У більшості рідин швидкість ультразвуку знаходиться в межах 800-2000 м/с. Значення швидкостей ультразвуку в деяких твердих матеріалах, рідинах та газах можна знайти у **Додатках А і Б**.

Об'ємні хвилі поширюються прямолінійно і є однорідними, тобто не згасають у напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення хвилі.

Варто зауважити, що об'ємні хвилі також можуть поширюватись і у обмежених середовищах, проте матимуть іншу швидкість. Наприклад, швидкість поширення поздовжніх хвиль в тонкому стрижні, поперечні розміри якого багато менші за довжину хвилі, може бути розрахована за наступною формулою:

$$C_{\text{стрж}} \cong \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

2.5.2. Хвилі, що поширюються вздовж межі поділу середовищ

Поверхнева хвиля (хвиля Релея) – це хвиля в пружному середовищі, що формується вздовж вільної (або слабко навантаженої) межі твердого тіла і швидко загасає з глибиною (рис. 2.6). Швидкість хвилі Релея розраховується за наступною формулою:

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} C_t.$$

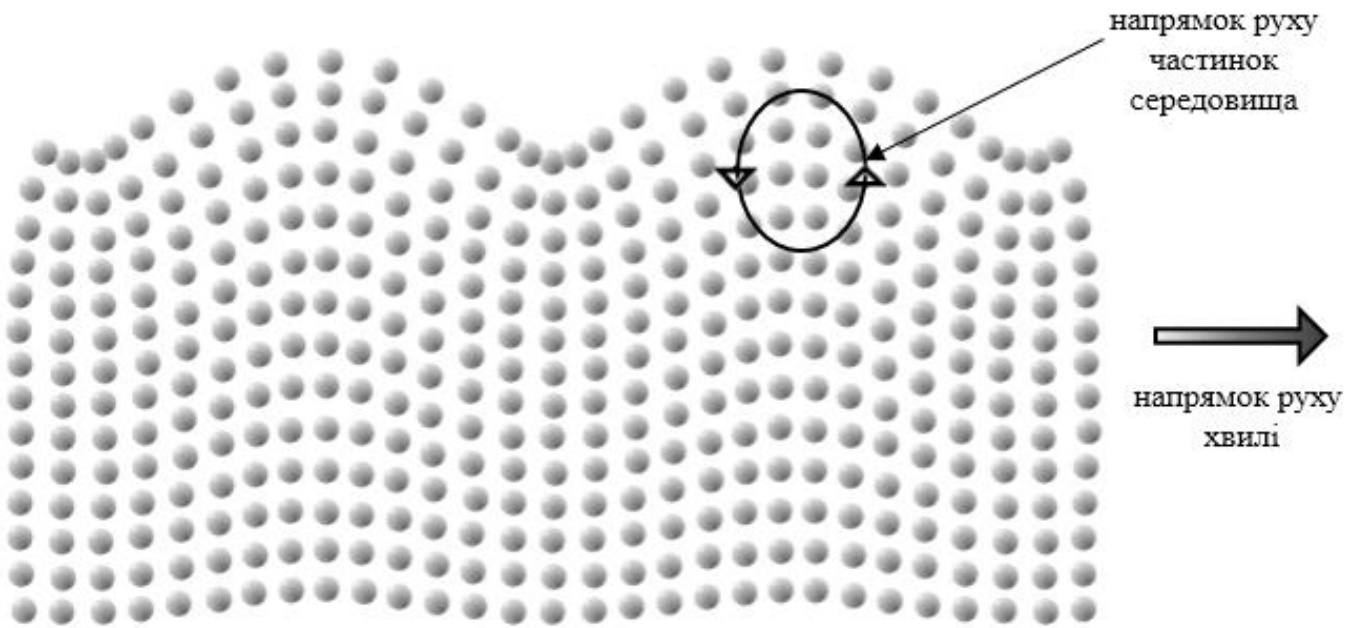


Рис. 2.6. Рух частинок середовища при поширенні хвилі Релея

Поверхнева хвиля Релея є лінійною комбінацією поздовжніх і поперечних хвиль. Траєкторія коливань частинок середовища при проходженні поверхневої хвилі має вигляд еліпсів із великою віссю, яка перпендикулярна до поверхні. Видовженість еліпсів збільшується зі збільшенням глибини проникнення хвилі від поверхні. Амплітуда хвилі Релея максимальна на поверхні і швидко зменшується з глибиною (наприклад, на глибині, що приблизно дорівнює довжині хвилі, амплітуда падає у 10 разів).

Для матеріалів з коефіцієнтом Пуассона $\nu \approx 0,3$ (в основному сталі) швидкість хвилі Релея $C_R \approx 0,93 C_t$.

Хвиля, що подібна релєївській (квазірелєївська), може поширюватися не тільки вздовж плоскої, але і вздовж викривленої поверхні. На увігнутих ділянках швидкість хвилі зменшується, а на опуклих – збільшується. На увігнутих ділянках поверхні така хвиля також зазнає додаткового згасання (тим більшого, чим менше радіус кривизни) внаслідок випромінювання енергії вглиб виробу.

Головна хвиля (або повзуча, або поверхнево-поздовжня) – це ще один тип хвилі, що поширюється вздовж поверхні твердого тіла. Швидкість цієї хвилі

практично дорівнює швидкості поздовжньої хвилі $C_G \approx C_l$. В кожній точці поверхні, вздовж якої поширюється головна хвиля, збуджуються поперечні хвилі під кутом до поверхні твердого тіла $\theta = \arcsin(C_t / C_l)$, які називаються бічними. В результаті процесу збудження таких бічних хвиль головна хвиля досить швидко згасає з відстанню.

В практиці НК збудження як хвилі Релея, так і головної хвилі, ґрунтується на явищі трансформації хвиль, про що детальніше описано в розділі 3.4. За допомогою поверхневої хвилі Релея найкраще виявляються дефекти, що розташовані на поверхні, і гірше – підповерхневі; тоді як головна хвиля практично не реагує на поверхневі дефекти, але дає змогу досить ефективно виявляти дефекти в підповерхневому шарі, починаючи з глибини 1-2 мм.

Поверхнева хвиля Релея та головна хвиля поширюються тільки вздовж ненавантаженої поверхні, тобто поверхні твердого тіла, яка межує з повітрям. Якщо ж поверхня твердого тіла навантажена рідиною або твердим середовищем, то виникають інші типи хвиль, наприклад, хвилі Стоунлі та хвилі Лява.

Хвилі, що поширюються вздовж межі поділу середовищ є неоднорідними, тобто амплітуда коливань зменшується в напрямку, перпендикулярному напрямку їх поширення.

2.5.3. Нормальні хвилі

Якщо тверде тіло має дві вільні поверхні, відстань між якими співмірна з довжиною хвилі (наприклад, тонкі пластини або стрижні малого діаметру), то в ньому можуть виникати **нормальні хвилі**. Це хвилі, що біжать (переносять енергію) вздовж пластини, тонкого шару або стрижня, і стоять (не переносять енергії) в перпендикулярному напрямку (поперечному перетині). Нормальна хвиля, що поширюється в пластині, називається **хвилею Лемба**, а та, що поширюється в стрижнях, – **хвилею Похгаммера**. Нормальні хвилі є результатом інтерференції хвиль, що біжать в різних напрямках.

Особливістю нормальних хвиль є те, що швидкість їх поширення залежить від частоти¹³. Така залежність називається *дисперсією швидкості*.

2.6. Ефект Допплера

Ефект Допплера – явище зміни частоти хвилі, яку реєструє приймач, обумовлене переміщенням джерела і/або приймача. Розглянемо, яким чином проявляється ефект Допплера для трьох випадків: 1) коли рухається джерело коливань, а приймач нерухомий; 2) коли джерело коливань нерухоме, а рухається приймач коливань; 3) коли рухаються і джерело, і приймач коливань.

Очевидно, що при нерухомому приймачі і джерелі коливань S_0 за час, що дорівнює періоду коливань T_0 , коливання поширяться на відстань $\lambda_0 = C \cdot T_0$ (де C – швидкість поширення коливань в певному середовищі). Якщо джерело S_0 починає рухатись зі швидкістю $v_{дж}$ в напрямку приймача (при цьому приймач нерухомий), то за той же час T_0 джерело пройде в цьому напрямку шлях $v_{дж} \cdot T_0$, а коливання поширяться за цей же час на відстань: $\lambda = \lambda_0 - v_{дж} \cdot T_0 = (C - v_{дж}) T_0$ (рис. 2.7). Якщо ж джерело буде рухатись в протилежному напрямку до напрямку поширення хвилі, то коливання поширяться на відстань $\lambda = \lambda_0 + v_{дж} \cdot T_0 = (C + v_{дж}) T_0$.

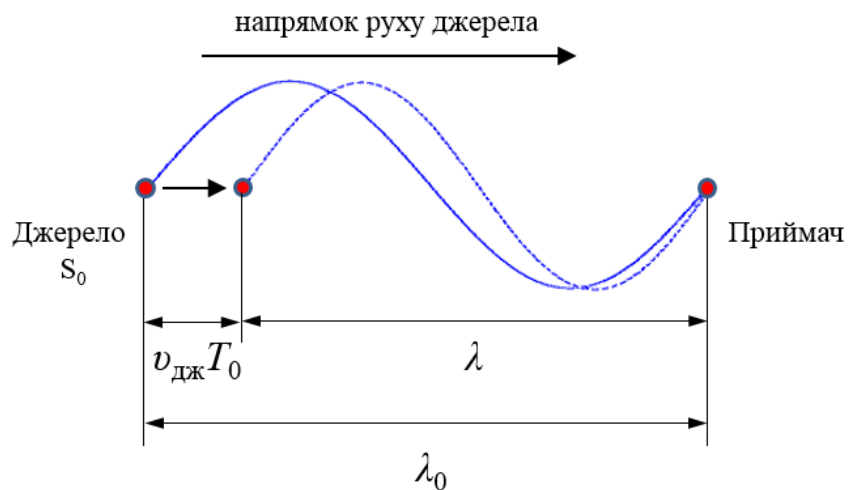


Рис. 2.7. Пояснення ефекту Допплера при русі джерела випромінювання

¹³ Тоді як швидкість об'ємних і поверхневих хвиль не залежить від частоти і є постійною величиною для певного матеріалу.

Таким чином результуюча частота, яка буде сприйматись нерухомим приймачем при рухомому джерелі, визначатиметься як:

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C \cdot f_0}{C \pm v_{\text{дж}}} = \frac{f_0}{1 \pm \frac{v_{\text{дж}}}{C}}. \quad (2.16)$$

Знаку «плюс» у виразі (2.16) відповідає віддалення джерела, а знаку «мінус» – наближення.

Тепер розглянемо випадок, коли приймач коливань рухається при нерухомому джерелі (рис. 2.8). Якщо приймач починає рухатись зі швидкістю $v_{\text{пр}}$ в напрямку до джерела (тобто, проти напрямку поширення хвилі від джерела), то загальна швидкість становитиме $C + v_{\text{пр}}$. Приймачем реєструється довжина хвилі λ , часовий період якої $T = 1/f$. Даному періоду відповідає відстань, яку проходить приймач в напрямку джерела $v_{\text{пр}} \cdot T = \lambda_0 - \lambda$.

Таким чином, якщо рухатиметься приймач коливань при нерухомому джерелі, то формула для розрахунку частоти Допплера буде представлена в наступному вигляді:

$$f = f_0 \left(1 \mp \frac{v_{\text{пр}}}{C} \right). \quad (2.17)$$

Знаку «мінус» у виразі (2.17) відповідає віддалення приймача, а знаку «плюс» – наближення.

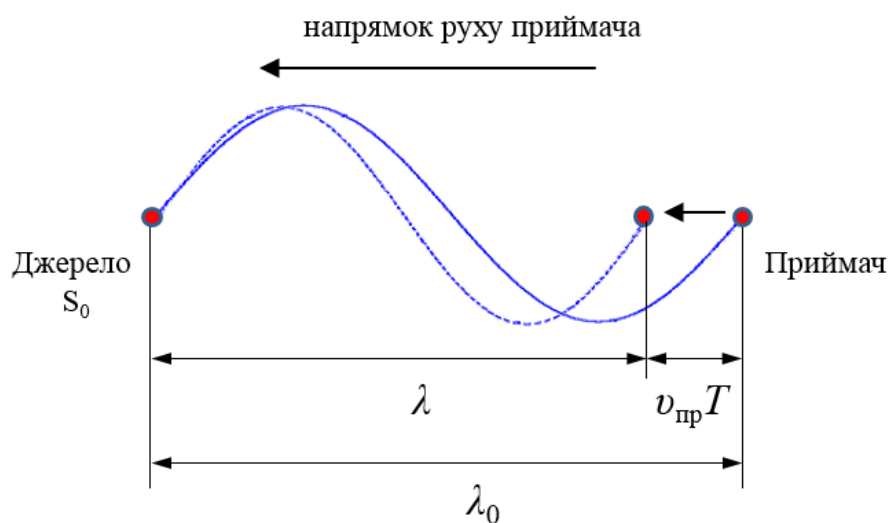


Рис. 2.8. Пояснення ефекту Допплера при русі приймача коливань

Фізичною причиною того, що формули для розрахунку частоти Допплера відрізняються для рухомого джерела і приймача, є наступне: при рухомому джерелі формула виводиться відносно зміни довжини хвилі, яка «відривається» від джерела зі швидкістю $C \pm v_{\text{дж}}$ (відповідно її довжина збільшується – знак «+», або зменшується – знак «-»); при рухомому приймачі формула виводиться з урахуванням того, що хвиля довжиною $\lambda_0 = C/f_0$ буде надходити в приймач зі швидкістю $C \mp v_{\text{пр}}$ (знак «-» – рух приймача від джерела, знак «+» – приймач рухається назустріч джерелу).

Формула Допплера для випадку, коли рухається як джерело коливань, так і приймач має наступний вигляд:

$$f = \frac{C \pm v_{\text{пр}}}{C \mp v_{\text{дж}}} f_0 \quad (2.18)$$

В формулі (2.18) комбінація знаків «+» і «-» в чисельнику та знаменнику залежить від напрямків руху як джерела, так і приймача.

2.7. Приклади розв'язку задач

Приклад 2.1. Швидкість поширення гармонійної звукової хвилі у воді складає 1450 м/с. На якій відстані знаходяться найближчі точки, що коливаються в протилежних фазах, якщо частота коливань 725 Гц.

Розв'язок:

Запишемо рівняння, що визначають гармонійне коливання двох точок на різній відстані:

$$a_1 = A \cdot \sin(\omega\tau - kx_1),$$

$$a_2 = A \cdot \sin(\omega\tau - kx_2),$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

Різниця фаз у такому випадку запишеться як:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = k \cdot \Delta x = k(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1). \quad (2.19)$$

Коливання в однакових фазах відбувається, коли різниця фаз становить $\Delta\varphi=2\pi$, в протифазі – коли $\Delta\varphi=\pi$ (рис. 2.9).

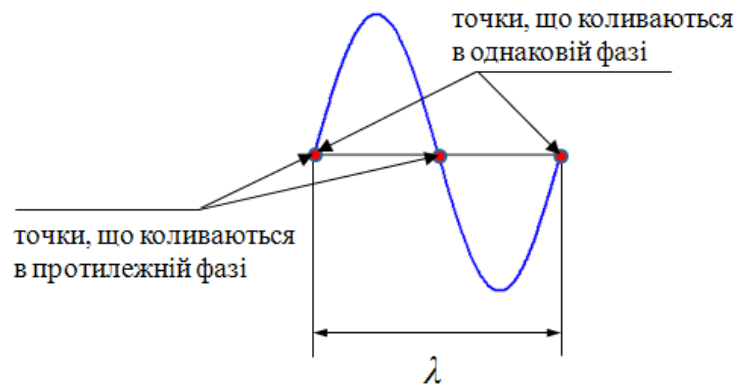


Рис. 2.9. Графік одного періоду гармонійного коливання

Із формули (2.19) випливає, що $\Delta\varphi=2\pi$ при $\Delta x=\lambda$, а $\Delta\varphi=\pi$ при $\Delta x=\lambda/2$. Отже, найближчі точки, що коливаються в протилежних фазах розташовані на відстані $\Delta x=\lambda/2$.

Таким чином:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f} = 1 \text{ м.}$$

Відповідь: $\Delta x=1$ м.

Приклад 2.2. Плоска гармонійна ультразвукова хвиля частотою $f=2,5$ МГц поширюється у воді. Амплітуда зміщення частинок з положення рівноваги дорівнює $A=10^{-11}$ м. Швидкість поширення хвилі у воді $C=1500$ м/с, густина води $\rho=1000$ кг/м³. Визначити амплітуду коливальної швидкості v_m , акустичний тиск P та інтенсивність хвилі I .

Розв'язок:

Зміщення частинок при проходженні гармонійної хвилі описується законом:

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Коливальна швидкість визначається як похідна від зміщення $v = x'$. Тоді амплітуда коливальної швидкості:

$$v_m = A\omega = 2\pi fA = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Застосовуючи формулу (2.6) знаходимо акустичний тиск:

$$P = \rho C v_M = 235 \text{ Па}.$$

Інтенсивність знаходимо з використанням формули (2.9):

$$I = \frac{P^2}{2\rho C} = 18,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2.$$

Відповідь: $v_M = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$; $P = 235 \text{ Па}$; $I = 18,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$.

Приклад 2.3. Інтенсивність звуку становить 1 Вт/м^2 . Визначити густину енергії звукової хвилі, якщо звук поширюється зі швидкістю 340 м/с .

Розв'язок:

Для розрахунку густини звукової енергії скористаємось формулою (2.8):

$$I = W \cdot C \Rightarrow W = \frac{I}{C} = \frac{1 \text{ Вт/м}^2}{340 \text{ м/с}} = 2,94 \text{ мДж/м}^3$$

Відповідь: $W = 2,94 \text{ мДж/м}^3$.

Приклад 2.4. Стрижень коливається на першій гармоніці на частоті $2,5 \text{ МГц}$. Визначити довжину стрижня, якщо швидкість поширення коливань в ньому становить 3500 м/с .

Розв'язок:

Довжину стрижня знаходимо за формулою (2.10) при $n=1$:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{C}{2f} = 1 \cdot \frac{3500}{2 \cdot 2500000} = 0,7 \text{ мм}.$$

Відповідь: $l = 0,7 \text{ мм}$.

Приклад 2.5. Визначити акустичний тиск P_A на відстані A від центра пульсуючої сфери, якщо на відстані B акустичний тиск дорівнює P_B . Згасанням звуку знехтувати.

Розв'язок:

Акустичний тиск, створюваний пульсуючою сферою обернено пропорційний відстані (див. формулу (2.11)). Тоді запишемо залежність тиску від відстані у вигляді:

$$P_A = K \frac{1}{A},$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт пропорційності знайдемо наступним чином:

$$P_B = K \frac{1}{B} \Rightarrow K = P_B \cdot B.$$

Тоді

$$P_A = P_B \cdot \frac{B}{A}.$$

Відповідь: $P_A = P_B \cdot \frac{B}{A}.$

Приклад 2.6. Модуль Юнга та густина середовища одночасно збільшилися на 10% при незмінному коефіцієнті Пуассона. Як зміниться швидкість поздовжньої хвилі?

Розв’язок:

Для розрахунку швидкості скористаємось формулою (2.15):

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}.$$

Тоді при збільшенні модуля Юнга і густини середовища нове значення швидкості розраховуватиметься як:

$$C'_l = \sqrt{\frac{E + 0,1E}{\rho + 0,1\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{1,1E}{1,1\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}.$$

Відповідь: Швидкість не зміниться.

Приклад 2.7. Рухомий об’єкт випромінює коливання частотою $f_0=400$ Гц. Нерухомий приймач сприймає звуковий сигнал як коливання з частотою $f=395$ Гц. З якою швидкістю рухається об’єкт? Наближується чи віддаляється він від приймача? Врахувати, що швидкість акустичних хвиль в повітрі становить $C_{\text{пов}}=340$ м/с.

Розв’язок:

Згідно умови задачі $f < f_0$, тому, відповідно, джерело коливань віддаляється від приймача.

Швидкість розрахуємо за формулою (2.16):

$$v_{\text{дж}} = C_{\text{пов}} \cdot \left(\frac{f_0}{f} - 1 \right) \approx 4,3 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $v \approx 4,3 \text{ м/с.}$

2.8. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 2.1. Коливання мембрани збуджуються за допомогою змінного електричного струму частотою 1000 коливань за секунду. Визначити довжину звукової хвилі, якщо швидкість поширення хвилі в повітрі складає 340 м/с.

Відповідь: $\lambda = 0,34 \text{ м.}$

Задача 2.2. Чому дорівнює довжина хвилі, що поширюється зі швидкістю 6000 м/с, якщо за 3 секунди встигають відбутися $4 \cdot 10^6$ коливань?

Відповідь: $\lambda = 4,5 \text{ мм.}$

Задача 2.3. Дві точки розташовані на відстанях $x_1 = 6 \text{ м}$ та $x_2 = 12 \text{ м}$ від джерела коливань. Визначити різницю фаз коливань у цих точках, якщо період коливань $T = 0,04 \text{ с}$, а швидкість поширення хвилі $C = 300 \text{ м/с}$.

Відповідь: $\Delta\varphi = \pi.$

Задача 2.4. У скільки разів зміниться довжина звукової хвилі при її переході з повітря у воду. Швидкість поширення звуку: в повітрі $C_{\text{п}} = 340 \text{ м/с}$, у воді $C_{\text{в}} = 1450 \text{ м/с}$.

Відповідь: зміниться у 4,26 рази.

Задача 2.5. Хвиля частотою 450 Гц поширюється в середовищі зі швидкістю 360 м/с. Чому дорівнює різниця фаз двох точок, які знаходяться одна від одної на відстані 20 см?

Відповідь: $\Delta\varphi=\pi/2$.

Задача 2.6. Швидкість поширення хвилі в середовищі становить 5000 м/с. Знайти частоту звукових коливань, якщо відстань між найближчими точками хвилі, що відрізняються по фазі на 90° , дорівнює 1,54 мм.

Відповідь: $f=812$ кГц.

Задача 2.7. В зразок, швидкість поширення ультразвукових хвиль в якому становить 3400 м/с, вводились коливання частотою 5 МГц. При цьому по товщині зразку вміщувалась ціла кількість довжин хвиль. Дослід повторили, коли температура зразка була на 20°K вища, ніж в попередньому випадку. За таких умов кількість довжин хвиль, що вміщувались по товщині зразку, зменшилась на дві. Знайти товщину зразка, якщо при підвищенні температури на 1°K швидкість ультразвуку в ньому збільшується на 0,5 м/с (залежність швидкості ультразвуку від температури вважати лінійною).

Відповідь: $l=0,464$ м.

Задача 2.8. Визначити довжину λ хвилі, що біжить, якщо в нерухомій хвилі відстань Δx між першою і четвертою пучностями дорівнює 15 мм.

Відповідь: $\lambda=10$ мм.

Задача 2.9. Визначити можливі точки закріплення пружного стрижня довжиною 60 мм, щоб він коливався на другій гармоніці з мінімальним згасанням амплітуди. Розрахувати частоту цієї гармоніки, якщо швидкість звуку в матеріалі стрижня дорівнює 5000 м/с.

Відповідь: $f=83$ кГц.

Задача 2.10. Визначити можливі точки закріплення магнітострикційного стрижня, що коливається на 5-й гармоніці. Стрижень має довжину L .

Відповідь: закріплювати необхідно в наступних точках $L/10, 3L/10, 5L/10, 7L/10, 9L/10$ починаючи від будь-якого краю.

Задача 2.11. Площинна хвиля інтенсивністю $I=100$ мВт/см² поширюється в середовищі зі швидкістю $C=1500$ м/с і падає перпендикулярно на абсолютно м'яку межу. Який тиск створює хвиля на межу поділу? Вивести розмірності.

Відповідь: $P_L=1,3$ Па.

Задача 2.12. У воді поширюється плоска гармонійна хвиля інтенсивністю $I=10$ Вт/см² (потужне ультразвукове поле). Частота хвилі $f=1$ МГц. Швидкість поширення хвилі у воді $C=1500$ м/с, густина води $\rho=1000$ кг/м³. Знайти амплітуду коливальної швидкості, максимальне зміщення частинок середовища відносно положення рівноваги при проходженні ультразвукової хвилі та їх прискорення.

Відповідь: $x_{\max}=58$ нм, $v_{\max}=0,36$ м/с, $a_{\max}=2,3 \cdot 10^6$ м/с².

Задача 2.13. Пульсуюча сфера створює на відстані $r_1=40$ мм від свого центру акустичну хвилю інтенсивністю $I_1=50$ мВт/см². Якою буде інтенсивність I_2 звуку на відстані $r_2=120$ мм від центру? Згасанням знехтувати.

Відповідь: $I_2=5,6$ мВт/см².

Задача 2.14. Циліндрична поверхня радіусом R , довжина якої значно перевищує довжину випромінюваної хвилі, створює на відстані $r_1=20$ мм від осі циліндра (при цьому $r_1 > R$) інтенсивність звуку $I_1=40$ мВт/см². Якою буде інтенсивність I_2 звуку на відстані $r_2=100$ мм від осі циліндра? Згасанням знехтувати.

Відповідь: $I_2=8$ мВт/см².

Задача 2.15. Акустичний тиск, що створюється пульсуючою сферою радіуса R , дорівнює $P_1=50$ кПа на відстані $r_1=40$ мм від центра сфери (при цьому $r_1 > R$). Яким

буде акустичний тиск P_2 на відстані $r_2=120$ мм від центра сфери. Згасанням звуку знехтувати.

Відповідь: $P_2=16,7$ кПа.

Задача 2.16. Джерело ультразвукових коливань у вигляді пульсуючої сфери розміщено у воді. Потужність джерела $N=0,2$ Вт. Визначити акустичний тиск P та інтенсивність I на відстані $r=40$ см від центра пульсуючої сфери. Характеристики води: $C_b=1500$ м/с, $\rho=1000$ кг/м³.

Відповідь: $P=546,4$ Па, $I=0,0995$ Вт/м².

Задача 2.17. Потужність точкового ізотропного джерела звукових хвиль становить 10 Вт. Знайти густину акустичної енергії в сухому повітрі на відстані 10 м від джерела хвилі, якщо температура повітря $T=-23,15^\circ\text{C}$, показник адіабати $\gamma=1,4$, молярна газова постійна $R=8,31$ Дж/(моль·К), середня відносна молярна маса $M=28,98$ г/моль.

Відповідь: $W=25,1$ мкДж/м³.

Задача 2.18. Знайти потужність точкового ізотропного джерела звуку, якщо на відстані 5 м від нього інтенсивність звуку в повітрі дорівнює 10 мВт/м². Якою буде густина енергії на цій відстані, якщо швидкість звуку дорівнює 340 м/с?

Відповідь: $N=3,14$ Вт, $W=29,4$ мкДж/м³.

Задача 2.19. На відстані 100 м від точкового ізотропного джерела звуку амплітуда звукового тиску становить 0,5 Па. Визначити потужність джерела, якщо акустичний імпеданс повітря дорівнює 430 Па·с/м. Поглинання звуку в повітрі не враховувати.

Відповідь: $N=36,51$ Вт.

Задача 2.20. Пульсуюча сфера радіусом $r=10$ мм і масою $m=16,4$ г випромінює акустичні хвилі в середовище, що її оточує. Густина середовища вдвічі більша

густини матеріалу сфери. Модуль Юнга середовища $E=270$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$. Визначити час, за який поздовжня хвиля пошириться в матеріалі середовища на відстань $R=5$ м від центру сфери. Знайти потужність джерела коливань, якщо інтенсивність хвилі на цій відстані становить $I=1,5$ мВт/м².

Відповідь: $t=732,4$ мкс, $N=0,47$ Вт.

Задача 2.21. Визначити фазовий зсув між акустичним тиском та коливальною швидкістю на відстані $r=50$ мм від точкового джерела випромінювання, якщо хвиля частотою $f=2,5$ МГц поширюється у воді зі швидкістю $C=1500$ м/с.

Відповідь: $\Delta\varphi=0,11^\circ$.

Задача 2.22. Визначити фазовий зсув між акустичним тиском та коливальною швидкістю в циліндричній хвилі на відстані $r=20$ мм, якщо хвиля частотою $f=1$ МГц поширюється у гліцерині зі швидкістю $C=1920$ м/с.

Відповідь: $\Delta\varphi=0,44^\circ$.

Задача 2.23. Знайти швидкості поздовжньої та поперечної хвиль для матеріалу, що має наступні характеристики: модуль пружності $E=124$ ГПа, густина $\rho=8900$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,35$.

Відповідь: $C_l=4729$ м/с, $C_t=2272$ м/с.

Задача 2.24. Швидкість поздовжньої хвилі для деякого твердого матеріалу становить $C_l=5600$ м/с, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,25$. Визначити швидкість поверхневої хвилі Релея.

Відповідь: $C_R=2974,5$ м/с.

Задача 2.25. Модуль зсуву збільшився на 20%, а густина середовища на 5%. Як зміниться швидкість поперечної хвилі?

Відповідь: зросте на 6,9%.

Задача 2.26. Дано два матеріали з наступними характеристиками: $C_1=9300$ м/с, $\rho_1=4000$ кг/м³, $C_2=5800$ м/с, $\rho_2=7800$ кг/м³. Визначити співвідношення модулів Юнга обох матеріалів, враховуючи, що вони мають однаковий коефіцієнт Пуассона. Схематично нарисувати графіки закону Гука для обох матеріалів.

Відповідь: 1,32.

Задача 2.27. Розрахувати модуль пружності, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона для алюмінію, де швидкість поздовжньої хвилі $C_l=6260$ м/с, поперечної – $C_t=3060$ м/с, густина $\rho=2700$ кг/м³.

Відповідь: $\nu=0,34$, $E=67,7$ ГПа, $G=25,3$ ГПа.

Задача 2.28. Методика визначення коефіцієнту Пуассона полягає в наступному: спочатку в ОК вводяться поздовжні хвилі і вимірюється часова затримка між випроміненим та прийнятим донним імпульсами; потім в ОК вводяться поперечні хвилі і також вимірюється часова затримка по тій же базі прозвучування, що і для поздовжньої хвилі. Таким чином, в результаті вимірювання отримано наступні дані: час проходження поздовжньої хвилі $\tau_1=2$ мс, поперечної хвилі – $\tau_2=4,5$ мс. Розрахувати коефіцієнт Пуассона ν .

Відповідь: $\nu=0,38$.

Задача 2.29. Нерухоме джерело випромінює коливання з періодом $T_0=2$ мкс, які сприймаються нерухомим приймачем. Яка довжина випромінюваної хвилі буде реєструватись нерухомим приймачем, якщо джерело почне віддалятися зі швидкістю $v=100$ м/с від нього? Швидкість поширення ультразвуку в середовищі $C=1500$ м/с.

Відповідь: $\lambda=3,2$ мм.

Задача 2.30. Рухоме джерело коливань випромінює акустичні коливання частотою f_0 . При наближенні джерела до нерухомого приймача останній сприймає коливання частотою $f_1=1100$ Гц, при віддаленні джерела – частотою $f_2=900$ Гц.

Швидкість поширення коливань в середовищі $C=340$ м/с. Знайти швидкість руху джерела коливань $v_{дж}$ та частоту випромінюваних коливань f_0 .

Відповідь: $v_{дж}=34$ м/с, $f_0=990$ Гц.

Задача 2.31. Джерело акустичних коливань та приймач звуку рухаються назустріч один одному зі швидкостями $v_{дж}=30$ м/с та $v_{пр}=20$ м/с відповідно. Джерело випромінює коливання частотою $f_0=600$ Гц. Швидкість поширення акустичних коливань в середовищі, в якому рухаються джерело та приймач, становить $C=340$ м/с. Знайти частоту, яка буде сприйматись приймачем при зближенні з джерелом. Як зміниться частота, що реєструється приймачем, якщо джерело і приймач будуть рухатись із тими ж швидкостями тільки в протилежних напрямках?

Відповідь: при зближенні $f=697$ Гц, при віддаленні $f=519$ Гц.

Задача 2.32. Звукова хвиля частотою 10 кГц випромінюється в напрямку до об'єкту, який наближається до нерухомого джерела зі швидкістю 100 км/год. Швидкість поширення коливань в повітрі становить $C=340$ м/с. Чому дорівнює частота віддзеркаленої хвилі?

Відповідь: $f=11\,779$ Гц.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, що таке хвиля?
2. Опишіть основні параметри хвилі.
3. Поясніть принцип суперпозиції.
4. Що таке різниця ходу хвиль?
5. В чому полягає явище інтерференції?
6. Що таке дифракція хвилі?
7. Поясніть принцип Гюйгенса-Френеля.
8. Поясніть причини та умови утворення нерухомої хвилі.
9. Поясніть, в чому відмінність між хвилею, що біжить, та нерухомою хвилею.

10. Поясніть, в яких точках необхідно закріплювати стрижневі резонатори, щоб вони коливались на заданих гармоніках.
11. Поясніть в чому полягає відмінність між питомим акустичним імпедансом та акустичним імпедансом. За яких умов вони можуть бути рівними?
12. Поясніть, як пов'язані між собою інтенсивність звуку та акустичний тиск.
13. Дайте визначення поняттю «акустична енергія» хвилі.
14. Поясніть, що таке фронт хвилі.
15. Поясніть, в чому відмінність між поздовжньою та поперечною хвилями.
16. Які типи хвиль мають дисперсію швидкості?
17. Відомо, що поперечні акустичні хвилі, які проходять крізь земний шар, повністю відбиваються від сфери поблизу центру Землі. Який висновок про внутрішню будову Землі можна зробити із цього факту?
18. У чому полягають відмінності між коливальною, фазовою та груповою швидкостями?
19. За якими формальними ознаками сферична або циліндрична хвиля відрізняється від плоскої?
20. За яких умов сферичну хвилю можна розглядати як плоску?
21. Що таке ефект Допплера?

3. ПРОХОДЖЕННЯ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ПЛОСКІ МЕЖІ СЕРЕДОВИЩ ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ТА ПОХИЛОМУ ПАДІННІ

3.1. Проходження хвиль через плоскі межі середовищ при нормальному падінні

У випадку нормального падіння плоскої акустичної хвилі на межу поділу двох середовищ хвиля частково відіб'ється, а частково пройде (рис. 3.1). Амплітуда кожної хвилі (що відбилась і що пройшла) визначатиметься коефіцієнтами віддзеркалення та проходження (прозорості).



Рис. 3.1. Проходження плоскої хвилі через межу поділу

Коефіцієнт віддзеркалення R визначається як співвідношення амплітуди віддзеркаленої хвилі $A_{\text{відб}}$ до амплітуди падаючої хвилі $A_{\text{пад}}$:

$$R = \frac{A_{\text{відб}}}{A_{\text{пад}}}.$$

Коефіцієнт проходження (прозорості) T визначається як співвідношення амплітуди хвилі, що пройшла, $A_{\text{пр}}$ до амплітуди падаючої хвилі $A_{\text{пад}}$:

$$T = \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{пад}}}.$$

Ці коефіцієнти при нормальному падінні хвилі можуть бути розраховані через імпеданси середовищ для:

- коливальної швидкості:

$$R_v = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}; \quad (3.1)$$

$$T_v = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}; \quad (3.2)$$

- акустичного тиску:

$$R_p = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}; \quad (3.3)$$

$$T_p = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}; \quad (3.4)$$

- інтенсивності:

$$R_I = R_p^2 = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_1 + z_2)^2}; \quad (3.5)$$

$$T_I = 1 - R_I = 1 - \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_1 + z_2)^2} = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2} = T_p \cdot T_v. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) отримана з урахуванням закону збереження енергії, згідно якого сума всіх коефіцієнтів віддзеркалення та проходження по інтенсивності на межі дорівнює одиниці.

Аналіз формул (3.2), (3.4) і (3.6) дає змогу зробити висновок, що коефіцієнт проходження за інтенсивністю через межу поділу дорівнює добутку коефіцієнтів проходження за тиском (або за коливальною швидкістю) в прямому і зворотному напрямках:

$$T_I = T_p^{\downarrow} \cdot T_p^{\uparrow} = T_v^{\downarrow} \cdot T_v^{\uparrow}.$$

3.2. Проходження хвиль через тонкі шари при нормальному падінні

Тонким шаром називають плоскопаралельний шар проміжного середовища, товщина якого співмірна з довжиною хвилі. Цей випадок є важливим з практичної точки зору, оскільки часто виникає, коли необхідно організувати введення і виведення ультразвукової хвилі в об'єкт і з об'єкту контролю при ультразвуковій дефектоскопії та товщинометрії.

Під час проходження площинної хвилі через тонкий шар при нормальному падінні в шарі одночасно існують дві хвилі: в прямому і зворотному напрямках (рис. 3.2). Ці хвилі після віддзеркалення частково проникають як через праву межу в прямому напрямку (P_{21} , P_{22} , ...), складаючись з першою хвилею, що пройшла P_2 , так і в зворотному напрямку. Очевидно, що інтенсивність хвилі в другому середовищі буде максимальною, якщо всі вторинні хвилі (P_{21} , P_{22} , ...), що пройшли через другу межу, будуть синфазні з первинною P_2 . Це відбудеться, якщо хвиля після подвійного проходження шару і двократного віддзеркалення буде мати фазовий зсув, кратний 2π .

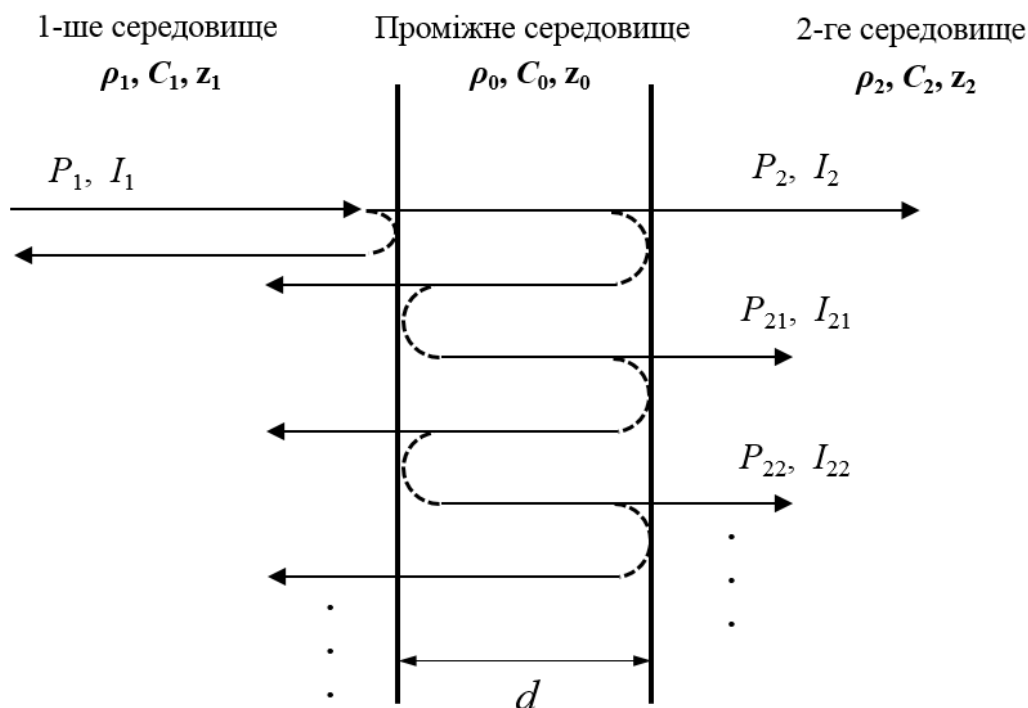


Рис. 3.2. Принцип формування ультразвукової хвилі, що пройшла через тонкий шар

Коефіцієнт проходження по інтенсивності через тонкий шар розраховується за формулою:

$$T_{\text{ш}} = \frac{4z_1z_2}{\left[(z_1 + z_2)^2 \cos^2 \theta_{\text{ш}} + \left(z_0 + \frac{z_1z_2}{z_0} \right)^2 \sin^2 \theta_{\text{ш}} \right]}, \quad (3.7)$$

де z_1 – імпеданс середовища, з якого падає хвиля, z_2 – імпеданс середовища, в яке проходить хвиля, z_0 – імпеданс проміжного шару, $\theta_{\text{ш}}$ – параметр, який розраховується як:

$$\theta_{\text{ш}} = \frac{2\pi d}{\lambda_{\text{ш}}}, \quad (3.8)$$

де d – товщина проміжного шару, $\lambda_{\text{ш}}$ – довжина хвилі в проміжному шарі.

Розглянемо два випадки, що мають практичне значення, при яких вираз (3.7) спрощується. Перший випадок виникає, коли $\sin \theta_{\text{ш}} = 0$. Тоді $\cos^2 \theta_{\text{ш}} = 1$ і вираз (3.7) приводиться до вигляду $T_I = 4z_1z_2/(z_1+z_2)^2$, що відповідає формулі (3.6). Тобто, це означає, що коефіцієнт проходження за інтенсивністю через такий шар не залежить від його матеріалу. Функція синус перетворюється в нуль, коли $\theta_{\text{ш}} = n\pi$. Враховуючи формулу (3.8) знайдемо, якою повинна бути товщина цього шару:

$$d = \frac{\lambda_{\text{ш}}}{2} n.$$

де n – ціле число, що більше за нуль.

В практиці ультразвукового НК такий півхвильовий шар називається **узгоджуючим**. Для застосування півхвильового шару (при $n=1$) повинні бути виконані наступні умови: $z_1 > z_0 < z_2$ або $z_1 < z_0 > z_2$.

Узгоджуючий шар використовують для покращення акустичного контакту між твердими середовищами. Найчастіше як узгоджуючий шар між випромінювачем УЗК та твердим ОК використовуються рідини, імпеданс яких завжди менший, ніж у твердих матеріалів¹⁴.

¹⁴ Насправді рідини підходять для використання як узгоджувачі шари між твердими матеріалами тільки в силу умови, що їх імпеданс одночасно менший імпедансів двох твердих середовищ, що межують. Враховуючи, що рідини не тримають форми, а розтікаються по поверхні, то забезпечити на практиці при проведенні контролю рівність товщини шару рідини половині довжини хвилі по всій площі дотику випромінювача УЗК і твердого ОК неможливо (тобто, неможливо забезпечити

Другий випадок, при якому вираз (3.7) спрощується, виникає, коли $\cos\theta_{\text{ш}}=0$. Тоді $\sin^2\theta_{\text{ш}}=1$ і вираз (3.7) приводиться до вигляду:

$$T_{\text{ш}} = \frac{4z_1z_2}{\left(z_0 + \frac{z_1z_2}{z_0}\right)^2}. \quad (3.9)$$

Функція косинус перетворюється в нуль, коли $\theta_{\text{ш}}=(2n-1)\pi/2$ ($n\geq 1$). Враховуючи формулу (3.8) знайдемо, якою повинна бути товщина цього шару:

$$d = \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4}(2n-1). \quad (3.10)$$

Такий шар називається чвертьхвильовим, імпеданс якого повинен мати проміжне значення між z_1 і z_2 . Якщо ж імпеданс чвертьхвильового шару вибрати з умови:

$$z_0 = \sqrt{z_1z_2}. \quad (3.11)$$

то нескладно переконатись (див. формулу (3.9)), що коефіцієнт проходження по інтенсивності буде дорівнювати $T_I=1$ (тобто, 100%), а отже такий шар є трансформатором імпедансу і забезпечує повне «просвітлення» межі. Тому його ще називають **просвітлюючим** шаром, за допомогою якого можна оптимізувати акустичний контакт між середовищами, імпеданси яких сильно відрізняються, і забезпечити максимум передачі енергії (в ідеалі – 100%, але в реальності за рахунок впливу багатьох чинників такого результату досягти неможливо), яка в будь-якому випадку буде більшою, ніж за умови безпосереднього контакту двох середовищ.

Наприклад, просвітлюючі шари обов'язково застосовуються під час проектування перетворювачів для медичної діагностики, якщо в якості випромінювача використовується п'єзокераміка ЦТС. Це пов'язано з тим, що хвильовий опір п'єзокераміки ЦТС більше ніж в 15 разів перевищує хвильовий опір води і м'яких біологічних тканин. Таким чином, при безпосередньому контакті цих середовищ лише мала частина енергії перейде від перетворювача в біологічні тканини. Використання ж тонкого просвітлюючого шару дає змогу частково

потрібні геометричні характеристики узгоджуючого шару). Але у будь-якому випадку використання рідин покращує акустичний контакт (а відповідно, і передачу енергії) між випромінювачем УЗК і ОК, заповнюючи повітряні прошарки між ними.

компенсувати зазначену відмінність хвильових опорів п'єзокераміки та біологічної тканини і підвищити ефективність перетворення електричної енергії в акустичну. Варто зауважити, що коли як випромінювач використовується плівка полівінілідена фторида (PVDF), хвильовий опір якої лише в 1,5 рази більший за хвильовий опір біологічних тканин, то потреби у використанні проміжного просвітлюючого шару немає.

3.3. Проходження хвиль через плоскі межі середовищ при похилому падінні

При похилому падінні плоскої хвилі на межу поділу двох середовищ напрямки віддзеркалених і заломлених поздовжніх та поперечних хвиль визначатиметься законом Снеліуса (рис. 3.3). Для всіх хвиль співвідношення синуса кута (між напрямком хвилі та нормаллю до поверхні поділу) до швидкості хвилі буде постійною величиною:

$$\frac{\sin \beta_l}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma_l}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma_t}{C_{t1}} = \frac{\sin \alpha_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \alpha_t}{C_{t2}}, \quad (3.12)$$

де C_{l1} , C_{t1} , C_{l2} , C_{t2} – відповідно швидкості поздовжньої та поперечної хвилі в першому середовищі, поздовжньої та поперечної хвилі в другому середовищі, β_l – кут падіння поздовжньої хвилі, γ_l, γ_t – кути віддзеркалення відповідно поздовжньої та поперечної хвилі, α_l, α_t – кути заломлення відповідно поздовжньої та поперечної хвилі.

Віддзеркалені і заломлені промені лежать в одній площині з падаючим променем і нормаллю до поверхні поділу середовищ, проведеною в точці падіння.

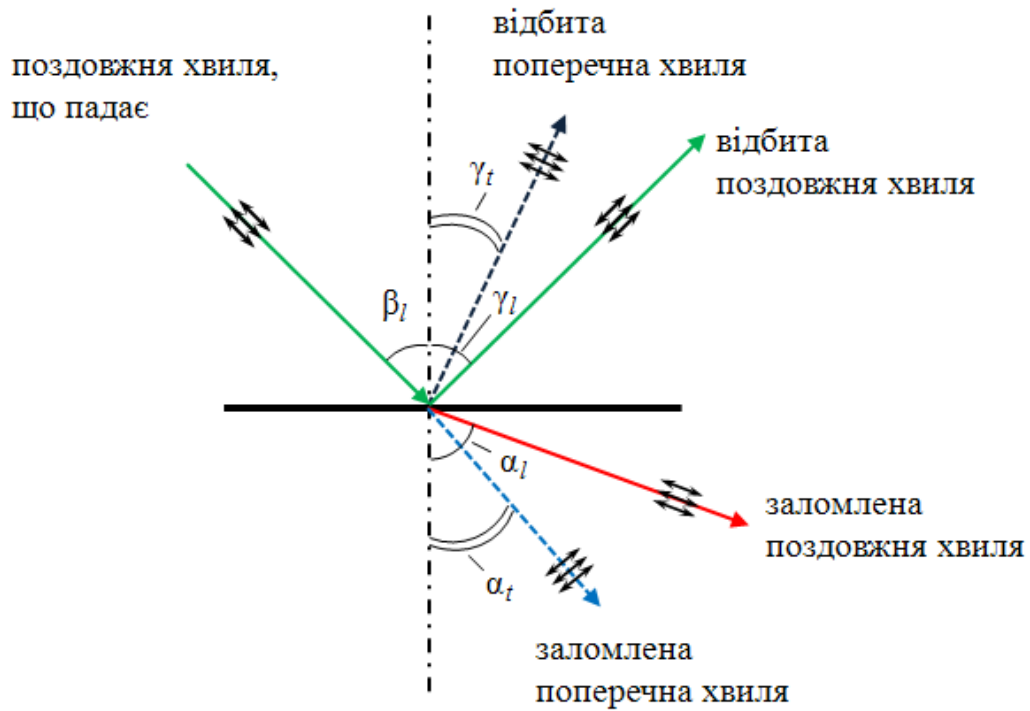


Рис. 3.3. Похиле падіння хвилі на плоску межу поділу середовищ

Для фронту плоскої хвилі, яка падає під кутом до межі поділу двох рідин, справедливі наступні вирази для коефіцієнтів проходження та віддзеркалення:

- для акустичного тиску:

$$R_p = \frac{z_2 \cos \beta - z_1 \cos \alpha}{z_1 \cos \alpha + z_2 \cos \beta}; \quad (3.13)$$

$$T_p = \frac{2z_2 \cos \beta}{z_1 \cos \alpha + z_2 \cos \beta}; \quad (3.14)$$

- для інтенсивності:

$$R_I = R_p^2 = \frac{(z_2 \cos \beta - z_1 \cos \alpha)^2}{(z_1 \cos \alpha + z_2 \cos \beta)^2}; \quad (3.15)$$

$$T_I = \frac{4z_2 z_1 \cos \beta \cos \alpha}{(z_1 \cos \alpha + z_2 \cos \beta)^2}. \quad (3.16)$$

Важливо пам'ятати, що залежності (3.13)-(3.16) можна використовувати для розрахунку коефіцієнтів проходження та віддзеркалення тільки на межі рідина-рідина. Віддзеркалення і заломлення плоских хвиль на межі твердих тіл відбувається за складнішими, ніж в рідині, законами. Це пов'язано з існуванням

у твердому тілі крім поздовжньої ще й інших типів хвиль, що з'являються в результаті трансформації (тобто, частина енергії поздовжніх хвиль може перетворюватись у поперечні або поверхневі коливання).

На рис. 3.4 представлені залежності коефіцієнтів проходження від кутів падіння поздовжньої хвилі на межу оргскло-сталь через шар рідини.

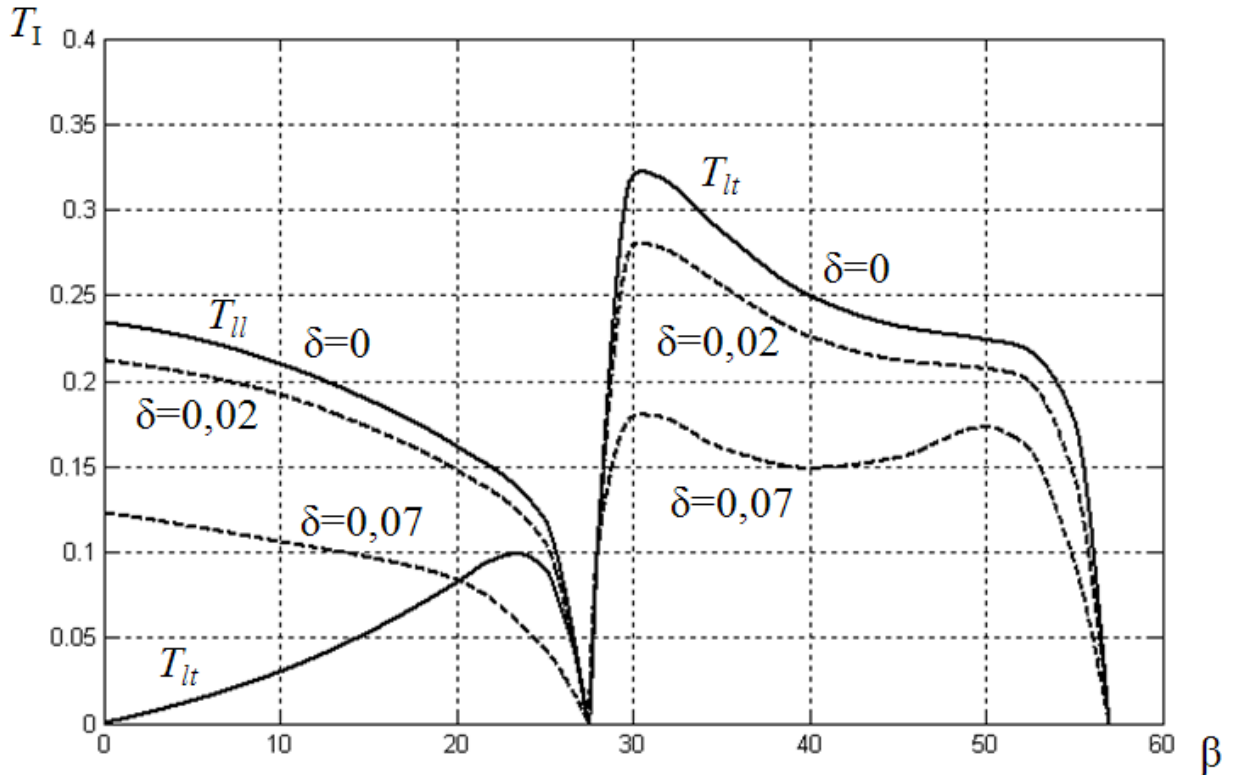


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнтів проходження по інтенсивності поздовжньої (T_{II}) та поперечної (T_{lt}) хвиль від кута падіння поздовжньої хвилі на межу поділу оргскло – тонкий шар рідини – сталь (δ – товщина шару рідини в довжинах хвилі)

3.4. Трансформація хвиль. Критичні кути

Якщо хвиля падає нормально до межі поділу двох середовищ, то віддзеркалена хвиля і хвиля, що пройшла, будуть того ж типу, що і падаюча (наприклад, якщо падає поздовжня хвиля, то відіб'ється і пройде через межу тільки поздовжня хвиля).

При похилому падінні площинної ультразвукової хвилі на межу поділу двох напівбезмежних твердих середовищ також виникають віддзеркалені хвилі та заломлені хвилі, що пройшли через межу, проте при цьому можуть виникати нові

типи хвиль, що не мають місця в падаючій хвилі. Процес утворення нових типів хвиль на межі поділу називається **трансформацією хвиль**. Трансформація хвиль може спостерігатися тільки в твердих тілах.

Як видно з рис. 3.3 при падінні поздовжньої хвилі під кутом до межі поділу двох твердих середовищ, в другому середовищі виникатимуть два типи хвиль: поздовжня і поперечна, яка утворюється в результаті трансформації. Ці хвилі існуватимуть одночасно, проте поширюватимуться під різними кутами, що обумовлено різними значеннями їх швидкостей, і матимуть різну інтенсивність. При невеликих відхиленнях кута падіння від вертикалі інтенсивність поперечної хвилі значно менше за інтенсивність поздовжньої, але зі збільшенням кута падіння інтенсивність поперечної хвилі зростатиме. Очевидно, що при подальшому збільшенні кута падіння кути заломлення як поперечної, так і поздовжньої хвиль зростатимуть, однак доти, поки не стануть рівними 90° (тобто, поки кожна з хвиль так би мовити не «притиснеться» до поверхні або зіллється з поверхнею, перетворившись на неоднорідну хвилю). Причому для поздовжньої заломленої хвилі цей момент настане раніше, ніж для поперечної, оскільки її швидкість вища. Кути падіння поздовжньої хвилі, при яких зникають заломлені поздовжні і поперечні хвилі в другому середовищі, називаються критичними.

При **першому критичному куті** в другому середовищі зникає заломлена поздовжня хвиля:

$$\beta_{\text{кр.1}} = \arcsin \frac{C_{l1}}{C_{l2}}.$$

При **другому критичному куті** в другому середовищі зникає заломлена поперечна хвиля і починає формуватися неоднорідна поверхнева хвиля Релея:

$$\beta_{\text{кр.2}} = \arcsin \frac{C_{l1}}{C_{t2}}. \quad (3.17)$$

Таким чином, при зміні кута падіння поздовжньої хвилі в першому середовищі в межах $0 < \beta < \beta_{\text{кр.1}}$ в другому середовищі існуватимуть одночасно як поздовжня, так і поперечна хвиля, які поширюються під різними кутами. При куті падіння $\beta \approx \beta_{\text{кр.1}}$ (навіть дещо меншому) збуджується головна хвиля, яка поширюється

вздовж ненавантаженої поверхні другого середовища. При куті падіння $\beta = \beta_{кр.1}$ у другому середовищі зникає поздовжня хвиля. При зміні кута падіння поздовжньої хвилі в межах $\beta_{кр.1} < \beta < \beta_{кр.2}$ в другому середовищі поширюватиметься тільки поперечна хвиля. При куті падіння $\beta = \beta_{кр.2}$ в другому середовищі зникає поперечна хвиля. При куті падіння $\beta > \beta_{кр.2}$ в другому середовищі взагалі не існуватимуть об'ємні хвилі, а буде сформована поверхнева хвиля Релея.

Важливою умовою формування поверхневої хвилі Релея та головної хвилі з використанням ефекту трансформації хвиль є те, що середовище падіння хвилі повинно мати обмежені розміри, щоб створена таким чином поверхнева хвиля в подальшому могла поширюватись вздовж ненавантаженої поверхні середовища введення хвилі (рис. 3.5).

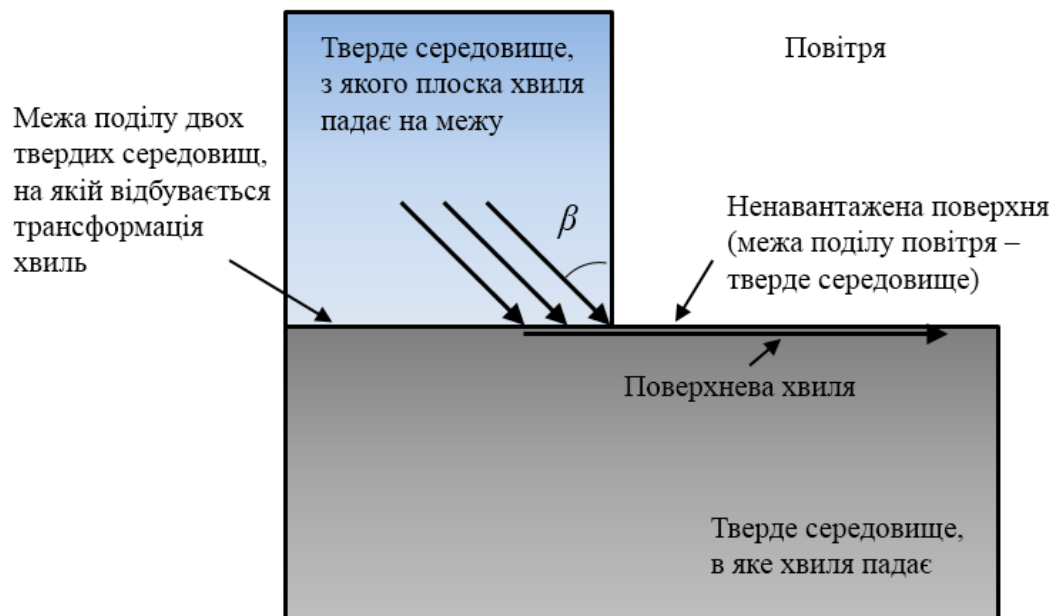


Рис. 3.5. Умови формування поверхневих хвиль вздовж ненавантаженої поверхні

Також інколи використовують поняття **третього критичного кута** – кута падіння поперечної хвилі β_t на межу поділу, при якому поздовжня віддзеркалена хвиля співпадає з межею поділу (зникає):

$$\beta_{кр.3} = \arcsin \frac{C_{t1}}{C_{l1}}.$$

3.5. Приклади розв'язку задач

Приклад 3.1. Визначити, яка частка ультразвукової енергії перейде з води у сталь при нормальному падінні площинної хвилі на межу поділу, якщо середовища мають наступні характеристики: $C_B=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_B=1,0 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{CT}=6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{CT}=8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв'язок:

Частка ультразвукової енергії, що перейде з води у сталь, визначається коефіцієнтом проходження (прозорості) за інтенсивністю і розраховується за формулою (3.6):

$$T_I = \frac{4z_B \cdot z_{CT}}{(z_B + z_{CT})^2},$$

де $z = \rho C$.

Тоді

$$T_I = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 8}{(1,5 \cdot 1 + 6 \cdot 8)^2} = 0,12.$$

Тобто, більша частина енергії відіб'ється.

Відповідь: $T_I=0,12$ (пройде 12% енергії).

Приклад 3.2. Для вказаної схеми акустичного тракту (рис. 3.6) розрахувати співвідношення тисків $P_{\Pi 1}/P_B$, $P_{\Pi 2}/P_B$ та інтенсивностей $I_{\Pi 1}/I_B$, $I_{\Pi 2}/I_B$, вважаючи, що хвиля плоска, середовища протяжні, а коефіцієнт згасання дорівнює нулю. При цьому співвідношення акустичних імпедансів середовищ наступні: $z_2=2z_1$, $z_3=0,5z_2$.

Розв'язок:

Межа z_3 -вакуум – це абсолютно м'яка межа, для якої $R_p=-1$.

Співвідношення тисків за наведеною схемою визначаються наступним чином:

$$\frac{P_{\Pi 1}}{P_B} = T_p^{12} \cdot R_p^{23} \cdot T_p^{21},$$

$$\frac{P_{\Pi 2}}{P_B} = T_p^{12} \cdot T_p^{23} \cdot R_p \cdot T_p^{32} \cdot T_p^{21}.$$

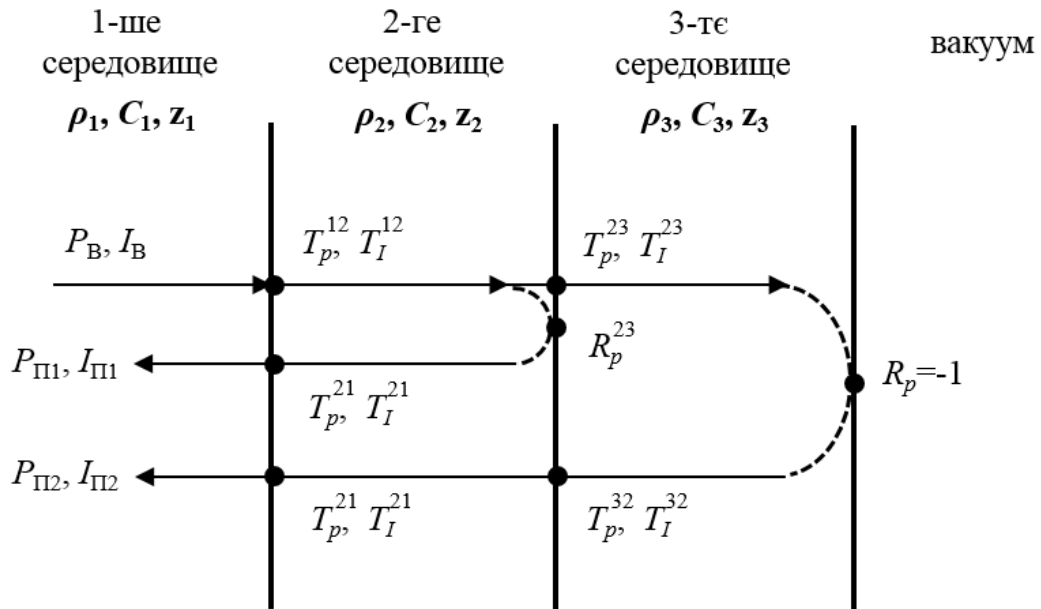


Рис. 3.6. Схема акустичного тракту (до прикладу 3.2)

Розрахуємо відповідні коефіцієнти за формулами (3.3)-(3.4):

$$R_p^{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} = -\frac{1}{3};$$

$$T_p^{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{4}{3};$$

$$T_p^{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{2}{3};$$

$$T_p^{32} = \frac{2Z_2}{Z_3 + Z_2} = \frac{4}{3};$$

$$T_p^{21} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2}{3}.$$

Розрахунок співвідношень тисків:

$$\frac{P_{\Pi 1}}{P_B} = \frac{4}{3} \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot \frac{2}{3} = -\frac{8}{27}.$$

$$\frac{P_{\Pi 2}}{P_B} = \frac{4}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1) \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{2}{3} = -\frac{64}{81}.$$

При розрахунках співвідношень інтенсивностей для тієї ж схеми акустичного тракту скористаємось тим, що $T_I = T_p^{\uparrow} \cdot T_p^{\downarrow}$, а $R_I = (R_p)^2$ (див. формули (3.5) та (3.6)).

Тоді

$$\frac{I_{\Pi 1}}{I_B} = \frac{64}{729}.$$

$$\frac{I_{\Pi 2}}{I_B} = \frac{4096}{6561}.$$

Відповідь: $\frac{P_{\Pi 1}}{P_B} = -\frac{8}{27}, \frac{P_{\Pi 2}}{P_B} = -\frac{64}{81}, \frac{I_{\Pi 1}}{I_B} = \frac{64}{729}, \frac{I_{\Pi 2}}{I_B} = \frac{4096}{6561}.$

Приклад 3.3. Нарисувати в масштабі графіки падаючої на межу поділу двох середовищ гармонійної хвилі коливальної швидкості, віддзеркаленої хвилі та хвилі, що пройшла, якщо співвідношення імпедансів середовищ $z_2=3z_1$, а швидкостей $C_2=C_1$. Фаза хвилі при $t=0$ та $x=0$ (на межі) складає $\varphi=90^\circ$. Першим є середовище, з якого хвиля падає на межу поділу.

Розв'язок:

Амплітуду хвилі, що падає прийемо рівною 1. Для того, щоб нарисувати в масштабі графіки віддзеркаленої хвилі та хвилі, що пройшла, необхідно розрахувати коефіцієнти віддзеркалення та проходження по коливальній швидкості. Скористаємось формулами (3.1) та (3.2):

$$R_v = \frac{z_1 - z_2}{z_2 + z_1} = \frac{z_1 - 3z_1}{3z_1 + z_1} = -\frac{1}{2}.$$

$$T_v = \frac{2z_1}{z_2 + z_1} = \frac{2z_1}{3z_1 + z_1} = \frac{1}{2}.$$

Таким чином, на межі поділу середовищ амплітуда віддзеркаленої хвилі складатиме половину амплітуди падаючої хвилі, при цьому фаза хвилі буде відрізнятись на 180° від фази падаючої хвилі (про що свідчить знак «-» перед коефіцієнтом віддзеркалення по коливальній швидкості). Амплітуда хвилі, що пройшла, також дорівнюватиме половині амплітуди падаючої хвилі, проте без втрати фази. Тому що швидкості в обох середовищах однакові, то довжини хвиль в обох середовищах також будуть однакові. З урахуванням виконаних розрахунків та зауважень на рис. 3.7 показані графіки падаючої хвилі, віддзеркаленої та хвилі, що пройшла.

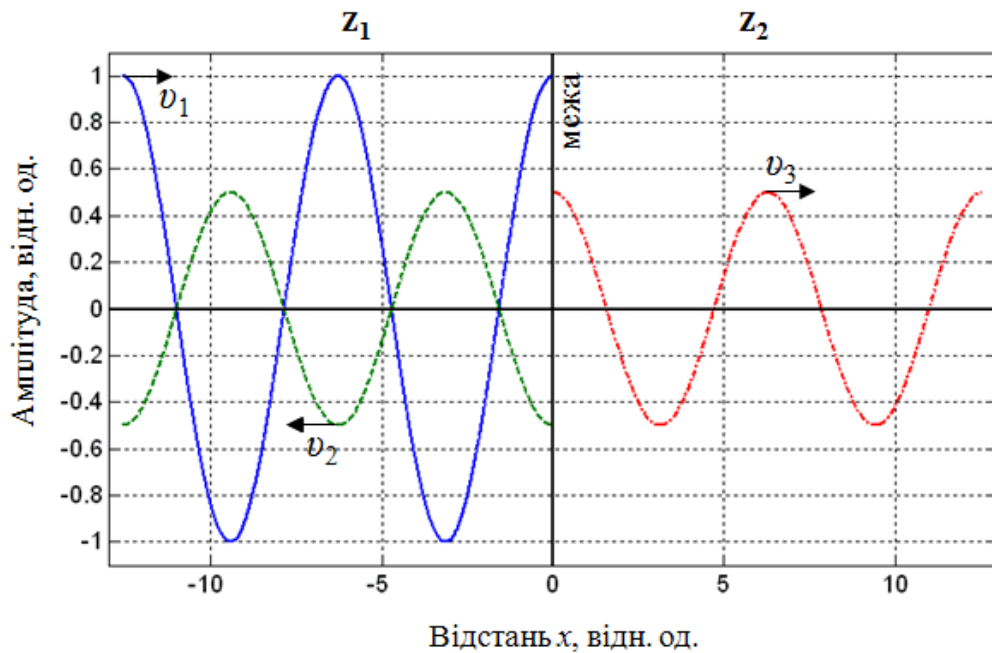


Рис. 3.7. Графічні побудови до прикладу 3.3: v_1 – падаюча хвиля, v_2 – віддзеркалена хвиля, v_3 – хвиля, що пройшла

Приклад 3.4. З’ясувати умови, при яких можливе повне просвітлення межі між п’єзоелектриком ЦТС-19 та оргсклом на частоті 2,5 МГц. Характеристики середовищ: $C_{\text{цтс}}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{цтс}}=7,4 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{орг}}=2,73 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{орг}}=1,27 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв’язок:

Знаходимо імпеданси ЦТС-19 та оргскла за формулою (2.5):

$$z_{\text{орг}} = \rho_{\text{орг}} C_{\text{орг}} = 3,47 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

$$z_{\text{цтс}} = \rho_{\text{цтс}} C_{\text{цтс}} = 24,42 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

Розрахуємо імпеданс просвітлюючого шару за формулою (3.11):

$$z_{\text{ш}} = \sqrt{z_{\text{орг}} \cdot z_{\text{цтс}}} = 9,2 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

З використанням табличних даних у **Додатку А** можна підібрати матеріал, імпеданс якого є найближчим до розрахованого. Наприклад, це може бути магній, який має наступні характеристики: $z_{\text{м}}=9,98 \cdot 10^6$ Па·с/м, $C_{\text{м}}=5,74 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{м}}=1,74 \cdot 10^3$ кг/м³.

Товщина просвітлюючого шару за формулою (3.10) при $n=1$ становитиме:

$$d_{\text{ш}} = \frac{C_{\text{ш}}}{4f} = 0,574 \text{ мм}.$$

Використання просвітлюючого шару забезпечує умови, при яких $T_I \approx 1$, тоді як без нього на межі поділу середовищ за їх безпосереднього контакту можливе значне віддзеркалення та втрата енергії, внаслідок чого $T_I < 1$.

Для прикладу розрахуємо коефіцієнт проходження по інтенсивності між п'єзоелектриком ЦТС-19 та оргсклом за їх безпосереднього контакту, використовуючи формулу (3.6):

$$T_I = \frac{4 \cdot z_{\text{орг}} \cdot z_{\text{цтс}}}{(z_{\text{орг}} + z_{\text{цтс}})^2} = \frac{4 \cdot \rho_{\text{орг}} \cdot C_{\text{орг}} \cdot \rho_{\text{цтс}} \cdot C_{\text{цтс}}}{(\rho_{\text{орг}} \cdot C_{\text{орг}} + \rho_{\text{цтс}} \cdot C_{\text{цтс}})^2} = \frac{4 \cdot 1,27 \cdot 2,73 \cdot 7,4 \cdot 3,3}{(1,27 \cdot 2,73 + 7,4 \cdot 3,3)^2} \approx 0,44.$$

Таким чином, втрати енергії на межі між ЦТС-19 та оргсклом без використання просвітлюючого шару становитимуть $\approx 56\%$.

Потреба у використанні просвітлюючого шару між ЦТС-19 (матеріалом, з якого найчастіше виготовляють п'єзопластини ультразвукових датчиків) та оргсклом виникає при розробці похилих датчиків. Але при цьому необхідною умовою є хороша обробка поверхонь, які з'єднуються між собою, та пластини просвітлюючого шару. Також треба врахувати, що при приклеюванні елементів (п'єзопластини, пластини просвітлюючого шару та призми) проміжні шари клею можуть змінити умови узгодження.

Відповідь: як просвітлюючий шар можна використовувати магнієву пластину товщиною 0,574 мм.

Приклад 3.5. Розрахувати швидкість ультразвуку, густину та товщину просвітлюючого шару між п'єзоелектриком ЦТС-19 та сталлю на частоті $f=5$ МГц, якщо довжина хвилі в шарі дорівнює $\lambda=1$ мм. Середовища мають наступні характеристики: $C_{\text{цтс}}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{цтс}}=7,2 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{ст}}=5,8 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{ст}}=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв'язок:

Знаходимо імпеданси двох середовищ, що межують, за формулою (2.5):

$$z_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} C_{\text{ст}} = 45,24 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

$$z_{\text{цтс}} = \rho_{\text{цтс}} C_{\text{цтс}} = 23,76 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

Розрахуємо імпеданс просвітлюючого шару за формулою (3.11):

$$z_{\text{ш}} = \sqrt{z_{\text{ст}} \cdot z_{\text{цтс}}} = 32,8 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}.$$

Швидкість поширення ультразвуку в матеріалі шару визначимо як:

$$C_{\text{ш}} = \lambda \cdot f = 5000 \text{ м/с.}$$

Тоді густина матеріалу шару:

$$\rho_{\text{ш}} = \frac{Z_{\text{ш}}}{C_{\text{ш}}} = 6560 \text{ кг/м}^3.$$

Товщина шару визначається за формулою (3.10) при $n=1$:

$$d_{\text{ш}} = \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4} = 0,25 \text{ мм.}$$

Відповідь: $C_{\text{ш}}=5000 \text{ м/с}$, $\rho_{\text{ш}}=6560 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{ш}}=0,25 \text{ мм}$.

Приклад 3.6. Визначити, під яким кутом поширюється поздовжня та поперечна хвилі в сталі, якщо кут падіння хвилі на межу оргскло-сталь становить $\beta=15^\circ$. Характеристики середовищ: $C_{\text{орг}}=2750 \text{ м/с}$, $C_{\text{лст}}=5900 \text{ м/с}$, $\nu_{\text{ст}}=0,27$.

Розв'язок:

Позначимо: β – кут падіння, α – кут заломлення (введення).

Розрахуємо швидкість поперечної хвилі в сталі, використовуючи формулу (2.15):

$$C_{\text{тст}} = C_{\text{лст}} \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} = 3312 \text{ м/с.}$$

Для розрахунку кутів заломлення скористаємось формулою (3.12):

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha_l} = \frac{C_{\text{орг}}}{C_{\text{лст}}} \Rightarrow \alpha_l = \arcsin \left(\sin \beta \frac{C_{\text{лст}}}{C_{\text{орг}}} \right) = 33,7^\circ.$$

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha_t} = \frac{C_{\text{орг}}}{C_{\text{тст}}} \Rightarrow \alpha_t = \arcsin \left(\sin \beta \frac{C_{\text{тст}}}{C_{\text{орг}}} \right) = 18,2^\circ.$$

Відповідь: $\alpha_l=33,7^\circ$, $\alpha_t=18,2^\circ$.

Приклад 3.7. Визначити умови, при яких 2-й критичний кут не має сенсу, якщо відомі швидкості поширення поздовжніх хвиль в середовищі падіння та заломлення, а співвідношення швидкості поперечної хвилі до поздовжньої в середовищі заломлення хвилі дорівнює 0,55.

Розв'язок:

Перепишемо рівняння (3.17) з урахуванням умови $C_{t2}=0,55C_{l2}$:

$$\beta_{кр.2} = \arcsin \frac{C_{l1}}{0,55C_{l2}}.$$

Оскільки аргумент функції арксинус не може бути більшим одиниці, то умова, при якій 2-й критичний кут не має сенсу, визначається як:

$$\frac{C_{l1}}{0,55C_{l2}} > 1 \Rightarrow 0,55C_{l2} < C_{l1}.$$

Відповідь: другий критичний кут не має сенсу (не може існувати) при $0,55 \cdot C_{l2} < C_{l1}$.

3.6. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 3.1. Визначити, яка частка енергії ультразвукової хвилі перейде із води в повітря при нормальному падінні плоскої хвилі на межу поділу. Характеристики середовищ: $C_{пов}=334$ м/с, $\rho_{пов}=1,3$ кг/м³, $C_в=1500$ м/с, $\rho_в=1000$ кг/м³.

Відповідь: $T_I=1,16 \cdot 10^{-3}$.

Задача 3.2. Розрахувати коефіцієнти проходження по тиску та інтенсивності плоскої ультразвукової хвилі через межу поділу вода-алюміній в прямому та зворотному напрямках при нормальному падінні. Характеристики середовищ: $C_{ал}=6300$ м/с, $\rho_{ал}=2700$ кг/м³, $C_в=1500$ м/с, $\rho_в=1000$ кг/м³. Результати проаналізувати.

Відповідь: $T_P^{\uparrow}=1,84$, $T_P^{\downarrow}=0,16$, $T_I=0,3$.

Задача 3.3. На межу поділу середовищ з імпедансами $z_2=0,5z_1$ падає по нормалі гармонійна площинна хвиля акустичного тиску, що має на межі поділу фазу 135° . Якою буде фаза віддзеркаленої хвилі?

Відповідь: $\varphi_в=315^\circ$.

Задача 3.4. Акустичний тракт складається з таких середовищ: z_1 - z_2 - z_3 -вакуум з площинно-паралельними межами поділу. Плоска хвиля з середовища z_1 падає

нормально на першу межу поділу, проходить другу межу, відбивається від межі z_3 -вакуум і повертається в середовище z_1 . Визначити, як зміниться акустичний тиск прийнятої хвилі по відношенню до випроміненої $P_{\text{п}}/P_{\text{в}}$, якщо $z_2=5z_1$, а $z_3=0,5z_2$. Коефіцієнтами згасання в середовищах знехтувати.

Відповідь: $P_{\text{п}}/P_{\text{в}}=-0,49$.

Задача 3.5. На абсолютно жорстку/м'яку межу поділу падає по нормалі площинна гармонійна хвиля акустичного тиску. Нарисувати в масштабі графіки падаючої хвилі тиску, віддзеркаленої хвилі та хвилі, що пройшла, для кожної межі, якщо співвідношення швидкостей в середовищах $C_2=C_1$. Фаза хвилі при $t=0$ та $x=0$ (на межі) становить $\varphi=90^\circ$. Першим є середовище, з якого хвиля падає на межу поділу. Виконати такі ж побудови для хвилі коливальної швидкості.

Відповідь: для того, щоб побудувати графіки, спочатку необхідно розрахувати відповідні коефіцієнти віддзеркалення і проходження, які визначатимуть амплітуди хвиль.

Задача 3.6. На межу поділу двох середовищ падає по нормалі площинна гармонійна хвиля акустичного тиску. Нарисувати в масштабі графіки падаючої хвилі тиску, віддзеркаленої хвилі та хвилі, що пройшла, якщо співвідношення імпедансів середовищ $z_2=0,5z_1$, а швидкостей $C_2=C_1$. Фаза хвилі при $t=0$ та $x=0$ (на межі) становить $\varphi=30^\circ$. Першим є середовище, з якого хвиля падає на межу поділу.

Відповідь: для того, щоб побудувати графіки, спочатку необхідно розрахувати відповідні коефіцієнти віддзеркалення і проходження, які визначатимуть амплітуди хвиль.

Задача 3.7. На межу поділу двох середовищ падає по нормалі площинна гармонійна хвиля акустичного тиску. Нарисувати в масштабі графіки падаючої хвилі тиску, віддзеркаленої хвилі та хвилі, що пройшла, якщо співвідношення імпедансів середовищ $z_2=3z_1$, а швидкостей $C_2=2C_1$. Фаза хвилі при $t=0$ та $x=0$ (на межі) становить $\varphi=135^\circ$. Першим є середовище, з якого хвиля падає на межу поділу.

Відповідь: для того, щоб побудувати графіки, спочатку необхідно розрахувати відповідні коефіцієнти віддзеркалення і проходження, які визначатимуть амплітуди хвиль; також необхідно врахувати, що швидкості хвиль в середовищах різні, а отже на графіках буде різна довжина хвилі.

Задача 3.8. Визначити: в якості узгоджуючого чи просвітлюючого шару можна використовувати алюміній між п'єзоматеріалом ЦТС-19 та сталлю. Знайти мінімальну товщину такого шару, якщо частота коливань становить 5 МГц. Характеристики матеріалів: $C_{ал}=6,2 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ал}=2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{ст}=5,8 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст}=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=7,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

Відповідь: узгоджуючий шар, $d_{ш}=0,62$ мм.

Задача 3.9. Визначити товщину просвітлюючого шару між п'єзоелектриком та сталевим об'єктом на частоті 2,5 МГц, якщо густина шару $\rho_{ш}=6 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{ст}=6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст}=8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс}=3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=9 \cdot 10^3$ кг/м³.

Відповідь: $d_{ш}=0,6$ мм.

Задача 3.10. Розрахувати, якою повинна бути швидкість УЗК та густина просвітлюючого шару між п'єзоелектриком ЦТС-19 і водою на частоті 5 МГц, якщо мінімальна товщина шару $d_{ш}=0,2$ мм. Характеристики матеріалів: $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=7,3 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{в}=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{в}=1 \cdot 10^3$ кг/м³.

Відповідь: $C_{ш}=4000$ м/с, $\rho_{ш}=1503$ кг/м³.

Задача 3.11. Кут падіння поздовжньої площинної хвилі на межу поділу двох рідин з імпедансами $z_1=2z_2$ та швидкостями $2C_1=C_2$ дорівнює $\beta=20^\circ$. Розрахувати коефіцієнти проходження та віддзеркалення по тиску.

Відповідь: $R_P=-0,22$, $T_P=0,78$.

Задача 3.12. Кут падіння поздовжньої площинної хвилі на межу поділу середовищ гліцерин-вода змінився з 0° на 60° . Як при цьому зміниться кут

заломлення у воді? Розрахувати коефіцієнти проходження по інтенсивності при відповідних кутах падіння. Характеристики середовищ: $C_{\text{гл}}=2 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{гл}}=1,3 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{в}}=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{в}}=1 \cdot 10^3$ кг/м³.

Відповідь: $\alpha=40,5^\circ$, $T_I^0=0,928$, $T_I^{60}=0,798$.

Задача 3.13. Визначити, при якому куті призми з оргскла в твердому ОК зникає поздовжня хвиля. Швидкість звуку в середовищах: $C_{\text{ок}}=5,4 \cdot 10^3$ м/с, $C_{\text{орг}}=2,7 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $\beta_{\text{кр1}}=30^\circ$.

Задача 3.14. Який кут повинна мати призма з оргскла, щоб шляхом трансформації в сталевому ОК зникли просторові хвилі (поздовжні і поперечні) та була сформована поверхнева хвиля? Порівняти цей кут з кутом, визначеним для алюмінію. Характеристики матеріалів: $C_{\text{орг}}=2,8 \cdot 10^3$ м/с, $C_{\text{лст}}=5,8 \cdot 10^3$ м/с, $v_{\text{ст}}=0,25$, $C_{\text{ал}}=6,3 \cdot 10^3$ м/с, $v_{\text{ал}}=0,34$.

Відповідь: $\beta_{\text{ст}}=56,7^\circ$, $\beta_{\text{ал}}=64,5^\circ$.

Задача 3.15. Розрахувати 3-й критичний кут для сталі, якщо співвідношення поздовжньої і поперечної хвиль складає $C_{\text{лст}} \approx 0,55 C_{\text{лст}}$.

Відповідь: $\beta_{\text{кр3}}=33^\circ$

Задача 3.16. Розрахувати третій критичний кут для твердого ОК, коефіцієнт Пуассона якого становить $\nu=0,21$.

Відповідь: $\beta_{\text{кр3}}=37,3^\circ$.

Задача 3.17. Визначити, під яким кутом поширюється віддзеркалена від межі сталь-повітря поперечна хвиля, що виникла в результаті трансформації, якщо поздовжня хвиля падає на межу поділу цих середовищ під кутом 30° . Врахувати, що $C_{\text{лст}} \approx 0,55 C_{\text{лст}}$.

Відповідь: $\beta_t=16^\circ$.

Задача 3.18. Визначити, при яких кутах призми з оргскла можливе формування в сталевому ОК тільки просторової поперечної хвилі. Коефіцієнт Пуассона для сталі $\nu_{ст}=0,26$. Швидкості поздовжніх хвиль: $C_{ст}=5,8 \cdot 10^3$ м/с, $C_{орг}=2,7 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: при кутах призми в межах $27,7^\circ - 54,8^\circ$.

Задача 3.19. Чому дорівнює другий критичний кут, якщо швидкості поширення поздовжніх ультразвукових хвиль в першому та другому середовищах становлять відповідно $C_1=4,5 \cdot 10^3$ м/с та $C_2=5,8 \cdot 10^3$ м/с. Співвідношення між поперечною та поздовжньою хвилею в другому середовищі дорівнює 0,55. Пояснити.

Відповідь: не існує.

Задача 3.20. Чому дорівнює перший критичний кут, якщо швидкості поширення поздовжніх ультразвукових хвиль в першому та другому середовищах становлять відповідно $C_1=5,8 \cdot 10^3$ м/с та $C_2=4,5 \cdot 10^3$ м/с. Пояснити.

Відповідь: не існує.

Запитання для самоконтролю

1. Від чого залежать коефіцієнти проходження та віддзеркалення ультразвукової хвилі на межі двох середовищ?
2. Що трапиться із ультразвуковою хвилею, яка падає нормально до поверхні, при її переході через плоску межу із «м'якого» середовища в «жорстке»? Як зміняться її параметри?
3. В чому схожість та відмінність між законами віддзеркалення та заломлення в оптиці та акустиці?
4. Поясніть, що таке тонкий шар?
5. В чому полягає відмінність між узгоджувачами та просвітлюючими шарами?

6. Поясніть, чому просвітлюючі шари обов'язково використовують між п'єзокерамікою та біологічним об'єктом під час проектування ультразвукових перетворювачів для медичної діагностики?

7. Поясніть закон Снеліуса в акустиці.

8. Що таке трансформація хвиль? Яким чином вона виконується?

9. Поясніть відмінності між першим, другим та третім критичними кутами.

10. Поясніть умови формування поверхневих хвиль вздовж ненавантаженої поверхні твердого середовища.

4. ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

4.1. Коефіцієнти згасання по тиску та інтенсивності

Поширюючись в середовищі, ультразвукові хвилі згасають. Причиною згасання є як поглинання енергії ультразвукових хвиль в однорідному середовищі, що обумовлене опором тертя (в'язкістю), теплопровідністю та іншими ефектами, так і розсіювання ультразвуку на твердих частках, газових бульбашках та інших неоднорідностях середовища.

Згасання ультразвукової хвилі в середовищі зазвичай описується експоненційним законом:

$$A_x = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot x},$$

де δ – просторовий коефіцієнт згасання, x – відстань, A_0 – початкове значення амплітуди.

Просторовий коефіцієнт згасання δ має розмірність м^{-1} , але зазвичай вимірюється в неперах на метр (Нп/м). Одному неперу відповідає відношення двох величин однакової розмірності, що дорівнює $e=2,7183$.

Для експериментального визначення коефіцієнта згасання досить знати амплітуду або інтенсивність коливань у двох точках x_1 і x_2 . У такому випадку коефіцієнт згасання розраховують за формулами:

- по тиску:

$$\delta_P = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \ln \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) \left[\frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right];$$

- по інтенсивності:

$$\delta_I = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \ln \left(\frac{I(x_2)}{I(x_1)} \right) = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \ln \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right)^2 = \frac{2}{x_2 - x_1} \cdot \ln \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) = 2\delta_P \left[\frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right].$$

Коефіцієнт згасання завжди є від'ємною величиною. Проте в практиці ультразвукового контролю знак мінус опускають і користуються модулем коефіцієнту згасання¹⁵.

Хоча коефіцієнт згасання по інтенсивності і може виражатись в Нп/м, проте найчастіше він виражається в децибелах на метр (дБ/м). У такому випадку використовують наступну розрахункову формулу:

$$\delta_I = \frac{1}{x_2 - x_1} 10 \lg \left(\frac{I(x_2)}{I(x_1)} \right) = \frac{1}{x_2 - x_1} 10 \lg \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right)^2 = \frac{1}{x_2 - x_1} 20 \lg \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) \left[\frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right]. \quad (4.1)$$

Історично склалося так, що «децибел» в першу чергу використовується для розрахунку співвідношення енергетичних величин (наприклад, потужність, інтенсивність), а «непер» – для силових величин (напруга, тиск).

Для того, щоб перевести співвідношення енергетичних величин (що виражене в дБ/м) у співвідношення силових величин (що виражене в Нп/м) необхідно скористатись наступною залежністю:

$$\frac{\delta_I \left[\frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right]}{\delta_P \left[\frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right]} = \frac{20 \lg \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) \left[\frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right]}{\ln \left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) \left[\frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right]} = 8,68 \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Нп}} \right].$$

Таким чином, переведення Нп/м у дБ/м здійснюється множенням на коефіцієнт 8,68.

Окрім просторового коефіцієнту згасання δ також користуються **часовим коефіцієнтом згасання** δ_t , що має розмірність Нп/с (або дБ/с). Ці коефіцієнти пов'язані між собою наступною залежністю:

$$\delta_t = \delta \cdot C,$$

де C – швидкість поширення ультразвуку.

Ще однією величиною, яка характеризує згасання, є **декремент згасання**, який виражається через співвідношення амплітуд акустичного тиску (коливальної швидкості) на інтервалі однієї довжини хвилі λ уздовж її поширення (або за один період T гармонійного коливання):

¹⁵ Про це важливо пам'ятати при вирішенні деяких задач цього підручника.

$$\theta = \frac{A_0(t)}{A_1(t+T)} = \frac{A_0(x)}{A_1(x+\lambda)}.$$

В практиці розрахунків зазвичай користуються *логарифмом декременту згасання* або так званим логарифмічним декрементом згасання Δ :

$$\Delta = \ln \frac{p_0(x)}{p_1(x+\lambda)} = \ln \frac{p_0}{p_0 e^{-\delta_p \lambda}} = \ln e^{\delta_p \lambda} = \delta_p \lambda, \quad (4.2)$$

або

$$\Delta = \ln \frac{p_0(t)}{p_1(t+T)} = \ln \frac{p_0}{p_0 e^{-\delta_t T}} = \ln e^{\delta_t T} = \delta_t T.$$

4.2. Залежність коефіцієнту згасання від частоти

Коефіцієнт згасання є частотнозалежним, причому *зі збільшенням частоти коефіцієнт згасання також збільшується*. Коефіцієнт згасання залежить від поглинання та розсіювання:

$$\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{роз}},$$

де $\delta_{\text{п}}$ – коефіцієнт поглинання, $\delta_{\text{роз}}$ – коефіцієнт розсіювання.

При поглинанні акустична енергія перетворюється в теплову. Поглинання обумовлене в'язкістю (в рідині), пружним гістерезисом (тобто різною пружною залежністю при розширенні та стисненні) та теплопровідністю. Коефіцієнт $\delta_{\text{п}}$ для твердих речовин найчастіше пропорційний частоті: співвідношення $\delta_{\text{п}}/f$ для поздовжніх хвиль в сталі дорівнює 0,1...1,5 Нп/(МГц·м), для алюмінію – 0,05...0,06 Нп/(МГц·м), для магнію – 0,1 Нп/(МГц·м).

Поглинання поперечних хвиль менше, ніж поздовжніх, тому що вони не пов'язані з адіабатичними змінами об'єму, при яких з'являються втрати на теплопровідність. Втрати на теплопровідність пропорційні квадрату частоти.

Розсіювання обумовлюється тим, що матеріал не є строго однорідним. При розсіюванні акустична енергія не перетворюється в інший вид енергії, а залишається акустичною, проте вона зменшується в результаті віддзеркалення від неоднорідностей середовища, які мають відмінний від самого середовища

хвильовий опір. Для деяких матеріалів це пов'язано із тим, що вони являють собою складні та неоднорідні з'єднання різних компонентів (наприклад, для чавуна – це ферит і графіт); для інших матеріалів – з наявністю пор, сторонніх включень, окремих кристалітів в полікристалах, різною орієнтацією анізотропних кристалів та ін. В газах неоднорідностями можуть бути, наприклад, рідкі краплі, у водному середовищі – бульбашки повітря.

Розсіювання відсутнє в однорідних аморфних речовинах (таких як скло, однорідні пластмаси тощо), тобто для них коефіцієнт $\delta_{\text{роз}}=0$.

Тип розсіювання в твердих матеріалах залежить від співвідношення довжини хвилі і середнього розміру зерна матеріалу:

- при розмірі зерна, яке менше довжини хвилі, – релеївське розсіювання;
- при розмірі зерна, яке співмірне з довжиною хвилі, – стохастичне розсіювання;
- при розмірі зерна, яке більше довжини хвилі, – дифузне розсіювання.

В речовинах з дуже великими розмірами зерен в порівнянні з довжиною хвилі процес розсіювання можна представити геометрично: на похилій межі поділу хвиля, що падає, розділяється на віддзеркалену хвилю та хвилю, що пройшла (рис. 4.1). Для кожної з цих хвиль такий же процес повторюється і на наступній межі зерна. Таким чином, від початкового ультразвукового променя весь час відділяються складові хвилі.

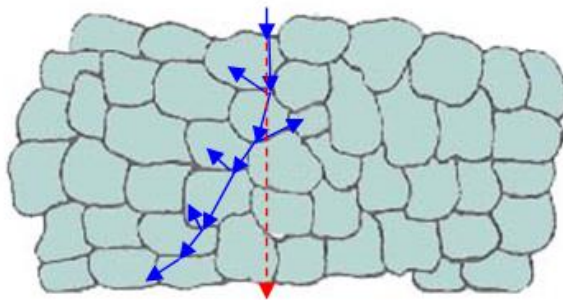


Рис. 4.1. Розсіювання ультразвукової хвилі на кристалах

В діапазоні частот, які використовуються в ультразвуковому неруйнівному контролі, розміри зерен, як правило, менші довжини хвилі. У такому випадку замість геометричного розчеплення відбувається розсіювання, аналогічне розсіюванню

світла прожектора на дрібних крапельках води в тумані. Для розмірів зерна від 1/1000 до 1/100 довжини хвилі розсіювання практично не відіграє ніякої ролі. Однак при подальшому зменшенні співвідношення розміру зерна до довжини хвилі воно стрімко посилюється, а в межах від 1/10 до однієї довжини хвилі вплив розсіювання досягає такого значення, при якому контроль вже практично неможливий.

Для розрахунку коефіцієнту згасання в твердих матеріалах використовується наступна узагальнена формула:

$$\delta = Af + Bf^n D_c^m, \quad (4.3)$$

де f – частота, D_c – середній розмір кристалів, A , B – коефіцієнти пропорційності, m , n – показники степені.

В формулі (4.3) перший доданок визначає вплив поглинання, другий – розсіювання. Для полікристалічних речовин (зокрема, металів) $\delta_{\text{роз}}$ збільшується зі зростанням пружної анізотропії, середнього розміру кристалітів D_c та частоти: $\delta_{\text{роз}} \sim f^n$ ($n=2\dots4$). В області $4D_c \leq \lambda \leq 10D_c$ значення $\delta_{\text{роз}} \sim D_c \cdot f^2$, а при $\lambda > 10D_c$ значення $\delta_{\text{роз}} \sim D_c^3 \cdot f^4$. Наприклад, в області $\lambda > 10D_c$ для маловуглецевої сталі коефіцієнт згасання для поздовжніх і поперечних хвиль розраховується як:

$$\delta_{p[l]} = 0,12 f + 20 D_c^3 \cdot f^4, \quad (4.4)$$

$$\delta_{p[t]} = 0,1 f + 105 D_c^3 \cdot f^4. \quad (4.5)$$

В формули (4.4)-(4.5) значення D_c підставляється в міліметрах, f – в мегагерцах, у результаті отримують коефіцієнт δ в Нп/м.

При малих частотах ультразвукових коливань, коли $\lambda \gg D_c$, загальний коефіцієнт згасання в металах в першу чергу визначається складовою $\delta_{\text{п}}$ (коефіцієнтом поглинання). Тому в області низьких частот можна вважати, що коефіцієнт згасання має лінійну залежність від частоти. При збільшенні частоти визначну роль починає відігравати коефіцієнт розсіювання $\delta_{\text{роз}}$, тому в області високих частот залежність загального коефіцієнту згасання від частоти є нелінійною.

В ультразвуковій дефектоскопії твердих матеріалів здебільшого використовують діапазон частот від 1 МГц до 5 МГц. При таких частотах довжина

хвилі, наприклад, в сталі із середньою швидкістю ультразвуку 5900 м/с становитиме $\lambda=1,18...5,9$ мм. Тоді, у випадку контролю низьковуглецевої сталі із середнім розміром зерна $D_c=0,05$ мм, співвідношення $\lambda/D_c=23,6...118$. Тобто, цей діапазон частот для зерна розміром 0,05 мм можна вважати низьким, в якому коефіцієнт згасання пропорційний частоті. Якщо ж середній розмір зерна становитиме, наприклад, $D_c=0,2$ мм, то матимемо співвідношення $\lambda/D_c=5,9...29,5$. Тобто, при таких умовах залежність коефіцієнту згасання від частоти у діапазоні частот від 1 до 5 МГц здебільшого буде нелінійною (так, для даного прикладу у діапазоні 1...1,5 МГц можна припустити, що $\delta \sim f$; у діапазоні 1,5...3 МГц – $\delta \sim f^4$; у діапазоні 3...5 МГц – $\delta \sim f^2$).

Варто зазначити, що у вуглецевій сталі зерна складаються з дуже великої кількості дрібних пластинок заліза та цементу (Fe_3C). Розміри їх значно менші середнього розміру зерна D_c . Схоже, що саме з цим пов'язаний той факт, що в широкому діапазоні частот в дрібнозернистих вуглецевих сталях (до 4...5 МГц) згасання визначається поглинанням, тобто пропорційне частоті.

На рис. 4.2 та рис. 4.3 наведені графіки залежності коефіцієнтів згасання для поздовжньої хвилі у хроммолібденовій (2,25%Cr-Mo) сталі та поперечної хвилі у вуглецевій сталі відповідно. Залежності для деяких інших матеріалів наведені у **Додатку В**. Згасання поперечних хвиль вище, ніж поздовжніх на одній і тій же частоті.

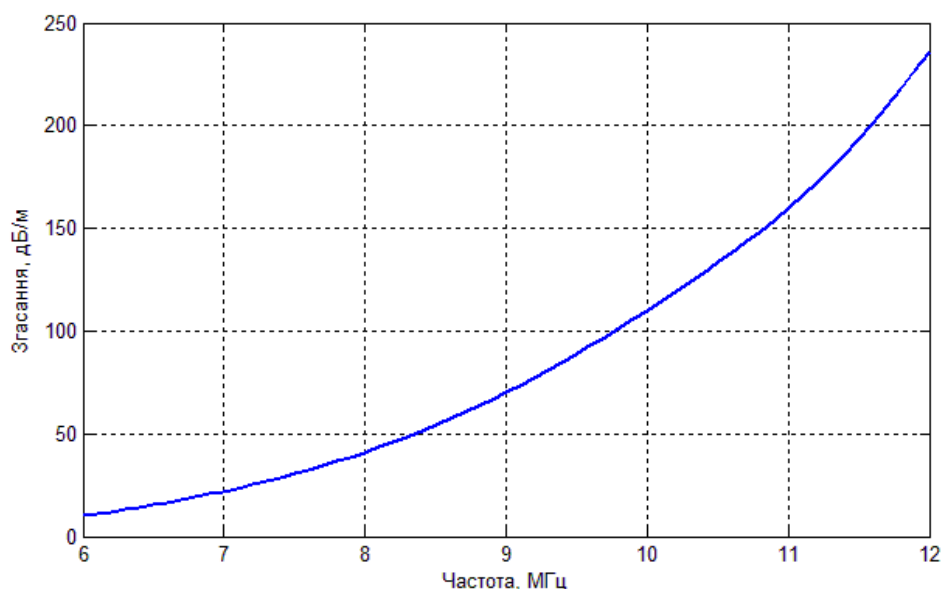


Рис. 4.2. Частотна залежність згасання поздовжніх хвиль у хроммолібденовій (2,25%Cr-Mo) сталі

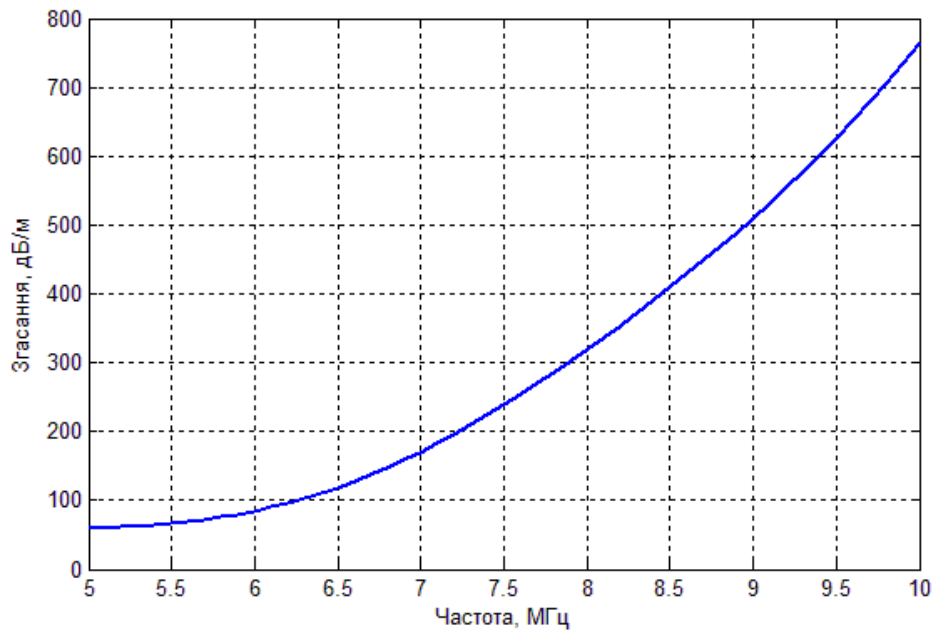


Рис. 4.3. Частотна залежність згасання поперечних хвиль у вуглецевій сталі

В нелегованих дрібнозернистих сталях поперечні хвилі мають велике згасання. При збільшенні частоти поперечних хвиль, що поширюються у такому матеріалі, енергія коливань настільки сильно поглинається і розсіюється, що навіть відносно малі об'єкти не можуть бути проконтрольовані з достатньою чутливістю.

Величина коефіцієнту згасання для металів та інших матеріалів змінюється в широких межах в залежності від найрізноманітніших параметрів виготовлення. Тому в табл. 4.1 наведені лише узагальнені значення коефіцієнтів згасання для різних матеріалів і можливості їх контролю на частоті 2 МГц. Також в **Додатку Г** наведені значення коефіцієнтів згасання для деяких металів.

З підвищенням температури згасання, як правило, збільшується, особливо в пластмасах.

Втрати енергії сигналу, які обумовлені як розсіянням, так і поглинанням, ускладнюють контроль матеріалів, але по-різному. Чисте поглинання послаблює віддзеркалену енергію від дефекту і від задньої стінки ОК. Для компенсації цього можна застосувати підвищену потужність випромінювання і збільшити підсилення, а також скористатися меншим поглинанням при роботі з низькими частотами. Значно більше труднощів створює розсіяння, тому що при луно-методі

послаблюються не тільки амплітуда віддзеркалення від дефекту і задньої стінки, а й з'являються численні віддзеркалення, що відповідають різному часу приходу хвиль, – так званий шум, який заважає виявленню корисного сигналу. Очевидно, що ці перешкоди не можна подолати збільшенням випромінюваної потужності або підвищенням підсилення, оскільки одночасно з цим буде збільшуватися рівень шуму. Виходом з даної ситуації є тільки використання більш низьких частот для контролю. Проте використання низьких частот обумовлює зростання довжини імпульсів та погіршення променевої роздільної здатності. Таким чином, можливість виявлення малих дефектів має свою природну нездоланну межу¹⁶.

Таблиця 4.1. Коефіцієнт згасання поздовжніх хвиль для різних матеріалів

Коефіцієнт згасання δ , дБ/м	Матеріал	Максимальна глибина контролю, м
0,1-10	Виливки з алюмінію і магнію чисті та слабологовані. Штамповки (чисті і низьколеговані): сталь, алюміній, магній, срібло, нікель, вольфрам, титан. Неметали: скло, фарфор.	1-10
10-100	Пластики: полістирол, оргскло, резина, синтетичні смоли, полівінілхлорид. Виливки: алюмінієві та магнієві сплави, низьколегована сталь, чавун зі сфероїдальним графітом. Штамповки: мідь, латунь, бронза, металокераміка.	0,1-1
>100	Пластики: оргскло, резина, синтетичні смоли, полівінілхлорид. Пластики з наповнювачем та резиною, вулканізована резина, дерево. Литво: високолегована сталь, сірий чавун, мідь, цинк, латунь, бронза. Неметали: пориста кераміка, гірські породи.	0-0,1

¹⁶ Тому при виборі робочої частоти перетворювача для проведення ультразвукового контролю того чи іншого об'єкту намагаються знайти певну оптимальну частоту, при якій з одного боку забезпечується достатня чутливість контролю, а з іншого – можливість виявлення малих дефектів та достатня роздільна здатність.

При використанні поверхневих хвиль, хвиль в пластинах та прутках додається ще один фактор, який обумовлює послаблення коливань, – шорсткість поверхні.

В чистих рідинах (в яких відсутні пил, сторонні частинки, пухирці газу та ін.) розсіювання відсутнє, тому згасання визначається тільки поглинанням. У такому випадку коефіцієнт згасання δ здебільшого пропорційний квадрату частоти коливань. Тому як характеристику згасання в рідинах часто використовують незалежну від частоти константу:

$$\delta' = \frac{\delta}{f^2}.$$

Згасання УЗК в біологічних тканинах (як і у твердих матеріалах) також обумовлюється поглинанням і розсіюванням. Коефіцієнт поглинання ультразвуку в біологічних середовищах в основному визначається релаксаційними процесами у біополімерах, переважно у білках і нуклеїнових кислотах тканин. На величину поглинання ультразвукових хвиль в анатомічних структурах впливає також функціональний стан органів (стан скорочення або розтягнення, збудження або пригнічення) і зовнішні умови (температура, тиск, вологість тощо).

Розсіювання ультразвуку в біологічних середовищах у значній мірі визначається їх структурою і гістологічними властивостями, причому основний внесок в ступінь розсіювання ультразвукових хвиль в біологічних середовищах вносить акустична гетерогенність біосередовищ на мікроструктурному рівні. Існує також певна залежність між величиною згасання ультразвукової енергії в м'яких біологічних тканинах і макроструктурою останніх. В тканинних структурах, що володіють складною клітинною архітектонікою (текстурою), подібних тканинам нирок, ультразвукові хвилі згасають у значно більшій мірі, ніж в тканинах з менш складною клітинною організацією (жирова тканина, печінка). Можливо, ці відмінності виникають в основному за рахунок зміни коефіцієнта розсіювання ультразвукових хвиль, який у тканинах складної текстури великий. З цієї причини в пружноізотропних тканинах, наприклад, печінки, розсіювання не відіграє суттєвої ролі і згасання ультразвукових хвиль в основному визначається поглинанням. Тому для тканини здорової печінки можна наближено вважати, що коефіцієнт згасання

обумовлюватиметься виключно величиною коефіцієнта поглинання. Однак, при патологічних змінах (наприклад, цирозних ущільненнях) коефіцієнт розсіяння стає істотним і його значення може служити діагностичною ознакою захворювання.

В багатьох видах м'яких тканин ультразвук згасає однаково, причому частотну залежність згасання можна виразити наступною апроксимацією:

$$\delta = Af^m,$$

де A – коефіцієнт пропорційності, m – показник степені, який пов'язаний з можливими відносними внесками різних механізмів згасання в біологічних тканинах ($1 \leq m \leq 2$).

Частотна залежність коефіцієнта згасання ультразвуку в кістковій і м'яких біологічних тканинах різна. Для більшості м'яких тканин внутрішніх органів можна вважати, що показник степені $m \approx 1,2$, а для кісткової тканини $m \approx 2$ (рис. 4.4).

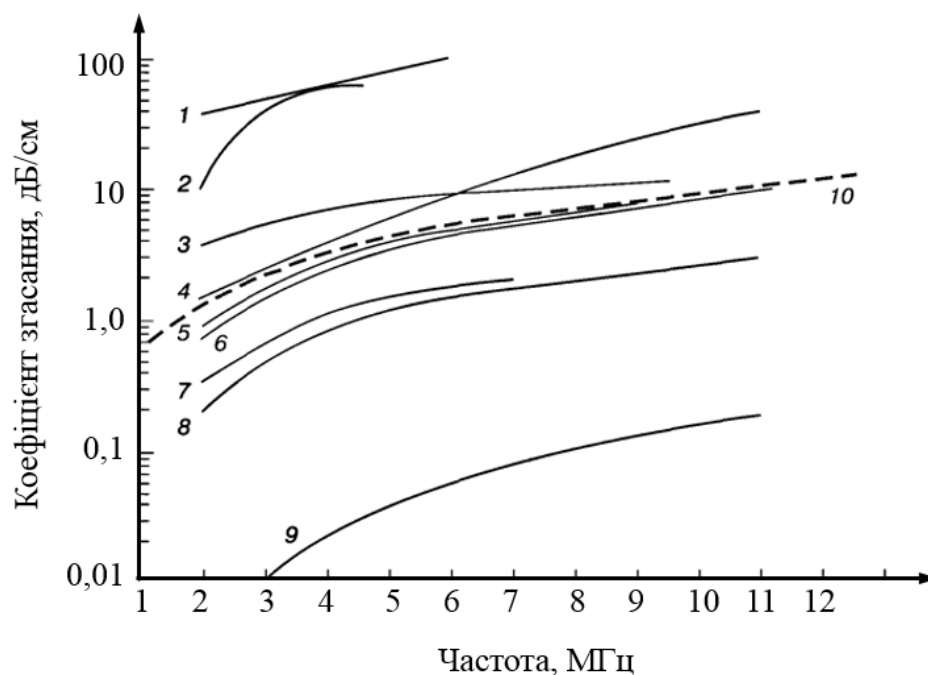


Рис. 4.4. Залежності коефіцієнтів згасання ультразвуку від частоти в різних тканинах і біологічних рідинах¹⁷: 1 – легені, 2 – кістки черепа, 3 – шкіра, 4 – м'язи, 5 – мозок дорослого, 6 – мозок дитини, 7 – печінка, 8 – кров, 9 – вода, 10 – усереднене значення згасання для м'яких тканин

¹⁷ Для більшості м'яких тканин опубліковані дані характеризуються великим розкидом, причому отримані значення перекриваються для тканин різного виду. Наведені приклади лише демонструють характерні частотні залежності і співвідношення між параметрами тканин

Як видно з рис. 4.4 для більшості м'яких тканин людського організму та біологічних рідин значення α близькі до одиниці, тобто залежність згасання від частоти є приблизно лінійною.

Акустичні властивості деяких біологічних середовищ також наведені у Додатку Д.

4.3. Приклади розв'язку задач

Приклад 4.1. Коефіцієнт згасання акустичної хвилі по інтенсивності у воді на певній частоті становить 0,0025 дБ/см. На якій глибині акустичний сигнал зменшиться по тиску у 10 разів.

Розв'язок:

Запишемо величину коефіцієнту згасання в системі одиниць вимірювання СІ: $\delta_I=0,25$ дБ/м. За умовою співвідношення тисків $P_2/P_1=0,1$.

Коефіцієнт згасання по інтенсивності розраховується за формулою (4.1), з якої можна виразити відстань (глибину):

$$\Delta x = \left| \frac{20 \lg \frac{P_2}{P_1}}{\delta_I} \right| = \left| \frac{20 \lg 0,1}{0,25} \right| = \left| \frac{-20}{0,25} \right| = 80 \text{ м.}$$

Як зазначалося в розділі 4.1 коефіцієнт згасання – це величина від'ємна, але на практиці користуються модулем цієї величини (що і було дано в задачі). Тому, щоб в результаті вирішення задачі не вийшло від'ємного значення відстані треба було або поставити знак мінус перед коефіцієнтом згасання, або взяти результат по модулю, або замість співвідношення $P_2/P_1=0,1$ використовувати співвідношення $P_1/P_2=10$.

Відповідь: $\Delta x=80$ м.

Приклад 4.2. Визначити логарифмічний декремент згасання у децибелах, якщо коефіцієнт згасання в середовищі зі швидкістю звуку 6000 м/с на частоті 3 МГц дорівнює 1,5 Нп/м.

Розв'язок:

Логарифмічний декремент згасання розраховуємо за формулою (4.2):

$$\Delta = \delta_p \cdot \lambda = \delta_p \cdot \frac{C}{f} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Нп.}$$

Переводимо величину з неперів в децибели:

$$\Delta = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 8,68 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ дБ.}$$

Відповідь: $\Delta = 26 \cdot 10^{-3}$ дБ.

Приклад 4.3. Визначити коефіцієнт згасання в органічному склі на частоті $f_2 = 7$ МГц, якщо відомо, що на частоті $f_1 = 2,5$ МГц коефіцієнт згасання становить $\delta_{p1} = 30$ Нп/м.

Розв'язок:

Тому що в органічному склі та пластмасах коефіцієнт згасання пропорційний частоті (при збільшенні частоти лінійно зростає коефіцієнт згасання), то можемо записати:

$$\delta_{p2} = \delta_{p1} \cdot f_2 / f_1 = 30 \cdot 7 / 2,5 = 84 \text{ Нп/м.}$$

Відповідь: $\delta_{p2} = 84$ Нп/м.

4.4. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 4.1. Як співвідношення амплітуд $A_2/A_1 = 0,045$ виражається у децибелах? В неперах?

Відповідь: $N[\text{дБ}] = -27$ дБ, $N[\text{Нп}] = -3,1$ Нп.

Задача 4.2. На скільки децибел зменшиться інтенсивність площинної хвилі на ділянці 0,2 м, якщо коефіцієнт згасання по акустичному тиску складає 10 Нп/м? Визначити послаблення також у відносних одиницях.

Відповідь: $N[\text{дБ}] = 17,36$ дБ, $N = 0,136$.

Задача 4.3. Акустичний тиск площинної хвилі зменшився у 50 разів на відстані 40 см. Визначити коефіцієнти згасання по тиску та інтенсивності.

Відповідь: $\delta_P=9,78$ Нп/м, $\delta_I=19,56$ Нп/м.

Задача 4.4. Визначити часовий коефіцієнт згасання площинної звукової хвилі по інтенсивності в децибелах за секунду, якщо швидкість звуку в ОК дорівнює $C_{ок}=4000$ м/с, а просторовий коефіцієнт згасання по тиску становить 10^{-3} Нп/м.

Відповідь: $\delta_I=34,72$ дБ/с.

Задача 4.5. На відстані $r_1=5$ м від точкового ізотропного джерела звукових коливань амплітуда зміщення частинок середовища становить $A_1=60$ мкм, а на відстані $r_2=10$ м амплітуда $A_2=20$ мкм. Знайти коефіцієнт згасання хвилі по акустичному тиску.

Відповідь: $\delta_P=0,081$ Нп/м.

Задача 4.6. Визначити коефіцієнт згасання по інтенсивності (в дБ/м) ультразвукової хвилі на частоті 1 МГц, якщо на довжині в 1000λ акустичний тиск падає в 10 раз. Швидкість ультразвуку $C_{ок}=5 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $\delta_I=4$ дБ/м.

Задача 4.7. На скільки децибел зменшиться інтенсивність площинної хвилі у воді, якщо на шляху її поширення розташувати товстий плоскопаралельний шар з оргскла? Характеристики середовищ: $C_{орг}=3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{орг}=1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_в=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_в=1 \cdot 10^3$ кг/м³. Згасанням звуку у воді та оргсклі знехтувати.

Відповідь: $N=2,5$ дБ.

Задача 4.8. За який час площинна ультразвукова хвиля згасне в гліцерині у 1000 разів по акустичному тиску, якщо просторовий коефіцієнт згасання по інтенсивності становить 0,2 дБ/см, а швидкість ультразвуку дорівнює 1800 м/с?

Відповідь: $t \approx 1,67$ мс.

Задача 4.9. Джерело звукових коливань у вигляді нескінченного тонкого стрижня створює на відстані $r_1=1$ м від своєї осі тиск $P_1=100$ Па. Знайти тиск P_2 на відстані $r_2=7$ м, якщо просторовий коефіцієнт згасання по тиску в середовищі поширення хвилі становить $\delta_p=0,5$ Нп/м.

Відповідь: $P_2=1,9$ Па.

Задача 4.10. Визначити коефіцієнт згасання по тиску в повітрі на частоті 1 МГц, якщо декремент згасання $\approx 80\%$. Швидкість ультразвуку $C_{\text{пов}}=334$ м/с.

Відповідь: $\delta_p=668$ Нп/м.

Задача 4.11. Для заліза із середньою величиною зерна 0,2 мм розрахувати коефіцієнт згасання на частоті 2,5 МГц для поздовжніх та поперечних хвиль.

Відповідь: $\delta_{p[l]}=6,55$ Нп/м, $\delta_{p[t]}=33,06$ Нп/м.

Задача 4.12. Оцінити, на скільки децибел згасне сигнал частотою 7,5 МГц у віконному склі товщиною 200 мм. Відомо, що на частоті 2,5 МГц коефіцієнт згасання у склі становить 0,55 Нп/м.

Відповідь: $N[\text{дБ}]=2,86$ дБ.

Задача 4.13. Визначити добротність Q коливальної механічної системи, що являє собою феритний стрижень довжиною $L=50$ мм, який коливається на першій гармоніці. Коефіцієнт згасання становить $\delta_p=3$ Нп/м.

Відповідь: $Q=10,5$.

Запитання для самоконтролю

1. Якими показниками оцінюють згасання ультразвукових коливань і хвиль?
2. Наведіть причини та складові згасання ультразвукових хвиль.
3. Які основні причини розсіяння ультразвукових хвиль?

4. Які основні причини поглинання ультразвукових хвиль?
5. Чому коефіцієнти згасання ультразвуку в твердих тілах, рідинах і газах мають різну залежність від частоти?
6. Поясніть, яким чином ускладнюють ультразвуковий контроль розсіювання та поглинання.
7. Як залежить коефіцієнт згасання від частоти в біологічних тканинах?
8. Що характеризує логарифмічний декремент згасання?
9. У скільки разів фактично зменшується амплітуда хвилі при: а) -3 дБ; б) -6 дБ; в) -20 дБ?

5. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

5.1. Характеристики п'єзоматеріалів

Для збудження УЗК використовують різні види перетворювачів, які залежно від фізичної природи використововуваного ефекту перетворення поділяються на різні класи: електродинамічні, електростатичні, п'єзоелектричні, електромагнітні, магнітострикційні.

У техніці ультразвукового НК найбільш поширеними є п'єзоелектричні перетворювачі, робота яких заснована на п'єзоефекті. **Прямий п'єзоелектричний ефект** полягає в утворенні електричної поляризації під дією механічної деформації. **Зворотний п'єзоелектричний ефект** полягає у виникненні деформації кристала при прикладанні різниці потенціалів. П'єзоефект властивий цілому класу діелектриків і напівпровідників, причому зворотній п'єзоефект є частковим випадком явища електрострикції – зміни розмірів тіла під дією зовнішнього електричного поля, властивого всім кристалічним речовинам.

На відміну від електрострикції п'єзоефект спостерігають тільки в кристалах, що не мають центра симетрії. Кристалічна решітка таких матеріалів складається з полярних молекул, що володіють дипольним моментом:

$$P_i = ql,$$

де q – заряд, l – відстань між зарядами.

Загальна поляризація діелектрика оцінюється поляризованістю P , що є векторною сумою електричних моментів диполів в одиничному об'ємі. Поляризованість пов'язана з індукцією D і напруженістю $E_{\text{ел}}$ електричного поля співвідношенням:

$$D = \varepsilon_0 \cdot E_{\text{ел}} + P,$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

Абсолютна діелектрична проникність середовища визначається як:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{\text{ел}} \cdot \varepsilon_0,$$

де $\varepsilon_{\text{ел}}$ – діелектрична проникність.

Найбільш високими значеннями діелектричної проникності володіють речовини, що відносяться до типу сегнетоелектриків, у яких п'єзоефект особливо значний. Навіть за відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики розділяються на домени – мікроскопічні області спонтанної поляризації, що володіють електричним моментом. Під час поляризації у зовнішньому полі домени орієнтуються за його напрямком, чим і обумовлюється високе значення діелектричної проникності. Поляризація сегнетоелектриків у цьому сенсі аналогічна намагнічуванню феромагнетиків. Сегнетоелектрики мають залишкову електричну поляризацію та електричний гістерезис. Сегнетоелектрики виявляють помітні нелінійні властивості, тобто їхні параметри залежать від зовнішніх впливів; також вони мають більші, ніж інші групи діелектриків, електричні і механічні втрати. При температурі Кюрі тепловий рух руйнує домени і сегнетоелектричні властивості зникають.

Розрізняють два види сегнетоелектриків: монокристали і поляризовані полікристали (п'єзокераміка). В ультразвуковому контролі найбільшого поширення одержали перетворювачі на основі п'єзокераміки. Більшість типів п'єзокераміки засновані на хімічних сполуках з формулою ABO_3 (наприклад, $BaTiO_3$) із кристалічною структурою типу перовскіта та твердих розчинів на їхній основі. Практичний інтерес також мають з'єднання типу AB_2O_6 (наприклад, $PbNb_2O_6$), що мають високу температуру Кюрі ($\sim 570^\circ\text{C}$). П'єзокераміку отримують шляхом спікання п'єзоелектричних мікрокристалів з присадками (сполучними речовинами). Після спікання диполі мікрокристалів розташовуються довільним чином, тому отримана кераміка поляризується за допомогою прикладення високої напруги при високій температурі. Завдяки цьому уздовж осі поляризації створюється максимальне розтягнення матеріалу. Поляризацію здійснюють в полях напруженості 0,5-3 кВ/мм при одночасному нагріванні для збільшення рухливості доменів. В ультразвуковій дефектоскопії у переважній більшості випадків застосовують п'єзопластини, поляризовані по товщині. П'єзокераміці властиве старіння, тобто зміни її параметрів з часом.

З п'єзоматеріалів найбільше застосування отримала п'єзокераміка цирконат-титанат свинцю. Кварц застосовують, якщо необхідно забезпечити високостабільні вимірювання. Метаніобат свинцю має низьку механічну добротність і його можна застосовувати без демпфера. Крім того, у нього дуже малі радіальні коливання, які є джерелом завад. Ніобат літію має високу температуру точки Кюрі (1160°C).

Також в неруйнівному контролі для виготовлення ультразвукових перетворювачів застосовується еластична полімерна плівка полівінілденфторид (ПВДФ), якій можна надавати практично будь-яку форму. Вона має невеликий хвильовий опір, що полегшує акустичне узгодження з імерсійним середовищем. Радіальні коливання близькі до нуля, акустична добротність досить низька. ПВДФ застосовується при контролі на високих частотах (сотні мегагерц), коли неможливо застосовувати п'єзокераміку. Це пов'язано з тим, що п'єзокераміка є досить крихким матеріалом. Тому що товщина п'єзопластини обернено пропорційна частоті, то на високих робочих частотах вона буде дуже малою, а отже, нестійкою до крихкого руйнування.

Зміна розмірів п'єзоелектричної пластинки Δh при випромінюванні акустичного імпульсу пропорційна прикладеній напрузі U :

$$\Delta h = d \cdot U,$$

де d – п'єзоелектричний модуль.

При прийманні акустичного імпульсу амплітуда змінної електричної напруги пропорційна деформації, тиску або квадратному кореню із інтенсивності падаючої ультразвукової хвилі:

$$U = e \cdot \Delta h,$$

де e – п'єзоконстанта по деформації.

Максимально допустима електрична напруга $U_{\max}$, що може бути подана на п'єзопластину від генератора залежить від електричної міцності п'єзоматеріалу, яка визначається напруженістю максимально допустимого електричного поля $E_{\max}$. Однак лінійність перетворення спостерігається до величини $0,3E_{\max}$:

$$U_{\max} = 0,3E_{\max}h,$$

де h – товщина п'єзопластини.

Наприклад, для ЦТС-19 $E_{\max}=3000$ В/мм.

Коливальний п'єзокристал являє собою електромеханічний перетворювач, ефективність якого характеризується *коефіцієнтом електромеханічного зв'язку* β :

$$\beta = \sqrt{\frac{W_m}{W}} = \sqrt{\frac{W_e}{W}},$$

де W_m – енергія, запасена в механічній формі; W_e – енергія електричного поля, що генерується п'єзоелементом; $W=W_m+W_e$ – повна енергія деформованого п'єзоелектрика.

Коефіцієнт β характеризує ефективність п'єзоперетворювача в режимах випромінювання та прийому пружних коливань.

У Додатку Е наведені основні характеристики п'єзоматеріалів, що застосовуються в ультразвуковій дефектоскопії.

5.2. Плоскі монолітні п'єзоперетворювачі

Серед плоских ПЕП найбільшого застосування знайшли перетворювачі із круглими та прямокутними випромінюючими пластинами (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Круглі та прямокутні п'єзопластини

Для даних типів ПЕП будемо застосовувати наступні позначення (рис. 5.2): діаметр п'єзопластини круглого ПЕП позначатимемо як $2a$ (відповідно радіус – a), тимчасом позначення $2a$ для прямокутного ПЕП визначатиме довжину його більшої сторони (вертикальна площина), відповідно довжина меншої сторони позначатиметься як $2b$ (горизонтальна площина). Товщина п'єзопластини будь-

якого вигляду розраховується за формулою (за умови роботи перетворювача в резонансному режимі):

$$h = \frac{\lambda_{\text{ПЕП}}}{2} = \frac{C_{\text{ПЕП}}}{2f}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{ПЕП}}$ – швидкість ультразвуку в матеріалі п'єзоперетворювача, f – робоча частота п'єзоперетворювача.

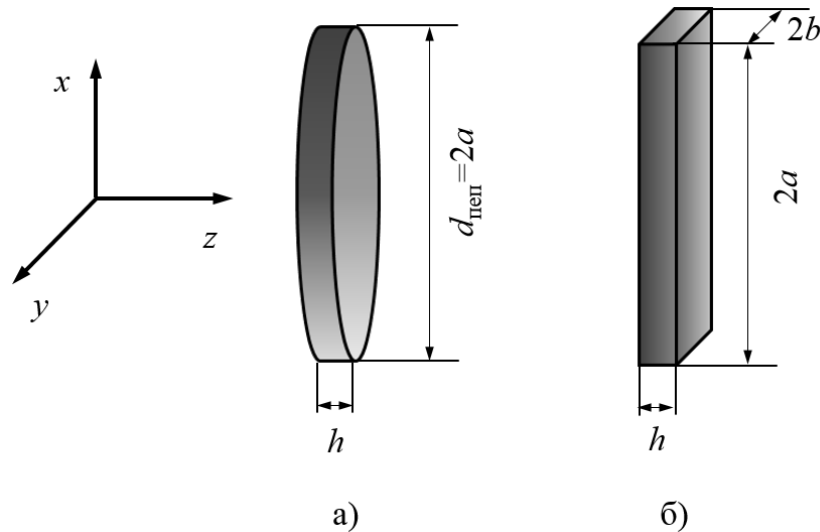


Рис. 5.2. Форми п'єзопластини: а) кругла; б) прямокутна

Вибір півхвильової товщини п'єзопластини обумовлений тим, що при такій товщині ефективність перетворення у режимі випромінювання та приймання пружних хвиль буде максимальною.

Параметри акустичного поля перетворювача є найважливішими характеристиками приладів ультразвукової дефектоскопії. **Акустичним полем перетворювача**¹⁸ називають область простору, в межах якого поширюються створені ним пружні коливання. При цьому амплітуда тиску в кожній точці цього простору визначається положенням точки щодо перетворювача та фізико-механічними характеристиками виробу. Стосовно до перетворювача розрізняють: поле випромінювання I_v , поле прийому I_p , поле випромінювання-прийому I_{vp} .

Акустичне **поле випромінювання** визначається тиском (діючою компонентою тензора напружень), який створюється випромінюючим перетворювачем і діє на

¹⁸ Об'єктом, який породжує акустичне поле може бути не тільки випромінювач, але й відбивач, межа поділу середовищ тощо

елементарний приймач в довільній точці простору. Поле випромінювання перетворювача визначає амплітуду і фазу коливань в деякій точці простору.

Поле прийому визначає амплітуду і фазу коливань приймаючого перетворювача при дії на нього точкового ненаправленого сферичного випромінювача, що знаходиться в деякій точці простору.

Поле випромінювання-прийому визначається сигналом перетворювача, що виникає при віддзеркаленні коливань, випромінених ним же, від точкового відбивача, поміщеного в деякій точці простору, який рівномірно розсіює падаючі хвилі в усіх напрямках.

Параметри акустичного поля залежать від наступних факторів:

- розмір перетворювача;
- конструкція перетворювача;
- тип перетворювача;
- робоча частота коливань;
- тривалість імпульсу;
- властивості пружного середовища, в якому створюється поле.

Зазвичай в розрахунках акустичних полів застосовують два різних теоретичних підходи. Перший з них полягає в безпосередньому використанні принципу Гюйгенса. За цим принципом передбачається, що по поверхні випромінювача, який безперервно коливається за гармонійним законом зміщення, розподілені елементарні точкові джерела із заданою потужністю і певною фазою. Такий підхід лежить в основі теорії Френеля. Щоб обчислити поле в заданих точках простору для перетворювачів будь-якої форми, необхідно проводити чисельне інтегрування внесків від кожного елементарного точкового джерела.

Другий теоретичний підхід до розгляду дифракційного поля (за Юнгом) заснований на передумові, що це поле є результатом суперпозиції тільки двох хвиль, а не нескінченної кількості сферичних елементарних хвиль Гюйгенса, як у класичній теорії Френеля. Дві ці хвилі являють собою: 1) хвилю, просторова протяжність і фаза якої не змінюються в процесі поширення та ідентичні протяжності і фазі хвилі в межах випромінюючої апертури, і 2) хвилю, що

поширюється у всіх напрямках від краю випромінювача з досить специфічним розподілом фази. Дифракційне поле є результатом інтерференції між цими двома хвилями. У випадку плоского круглого випромінювача такими хвилями є плоска хвиля і крайова хвиля напівтороїдальної форми. Зазначений підхід виявляється корисним під час аналізу розподілів імпульсних акустичних полів, розрахунок яких виконується на основі методу імпульсних характеристик.

5.2.1. Акустичне поле плоского перетворювача круглої форми

Спочатку розглянемо акустичне поле круглого ПЕП. Звуковий тиск на акустичній осі круглого поршневого випромінювача описується формулою:

$$P = 2P_0 \cdot \sin\left(\frac{k}{2} \cdot \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z\right)\right) = 2\rho C v_0 \cdot \sin\left(\frac{k}{2} \cdot \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z\right)\right), \quad (5.2)$$

де P_0 – амплітуда акустичного тиску, v_0 – амплітуда коливальної швидкості, ρ – густина середовища, C – швидкість поширення УЗК у певному матеріалі, k – хвильове число, z – відстань вздовж осі.

Очевидно, що тиск матиме як додатні, так і від’ємні значення (які являють собою інверсію фази). На рис. 5.3 наведено графік зміни абсолютної величини тиску, розрахований за формулою (5.2) при наступних значеннях параметрів: $C=5900$ м/с, $f=5$ МГц, $a=5$ мм.

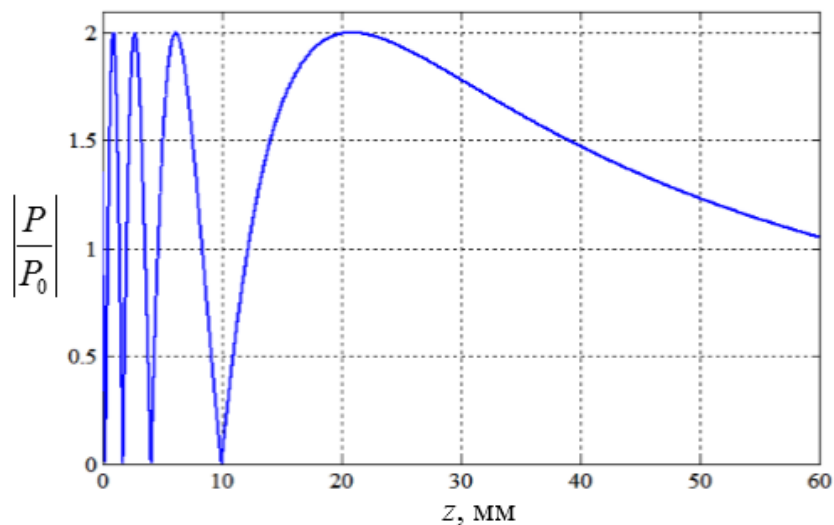


Рис. 5.3. Структура поля на акустичній осі круглого ПЕП

В акустичному полі виділяють дві основні зони: ближню та дальню (рис. 5.4). У **ближній зоні** (зоні Френеля) спостерігаються обумовлені інтерференцією немонотонні зміни (осциляції) амплітуди поля. Понад 80% випроміненої енергії зосереджено в межах циліндра, обмеженого краями п'єзопластини, однак по перетину циліндра енергія розподілена нерівномірно. Якщо випромінювач працює в поршневому режимі, то в ближній зоні поширюється плоска хвиля. Ближня зона визначається положенням останнього максимуму тиску на акустичній осі ПЕП (див. рис. 5.3); на цій відстані спостерігається незначне «природне» фокусування акустичних променів. Величина ближньої зони розраховується за формулою:

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{ок}}}, \quad (5.3)$$

де a – радіус випромінюючої пластини, $\lambda_{\text{ок}}$ – довжина хвилі в середовищі.

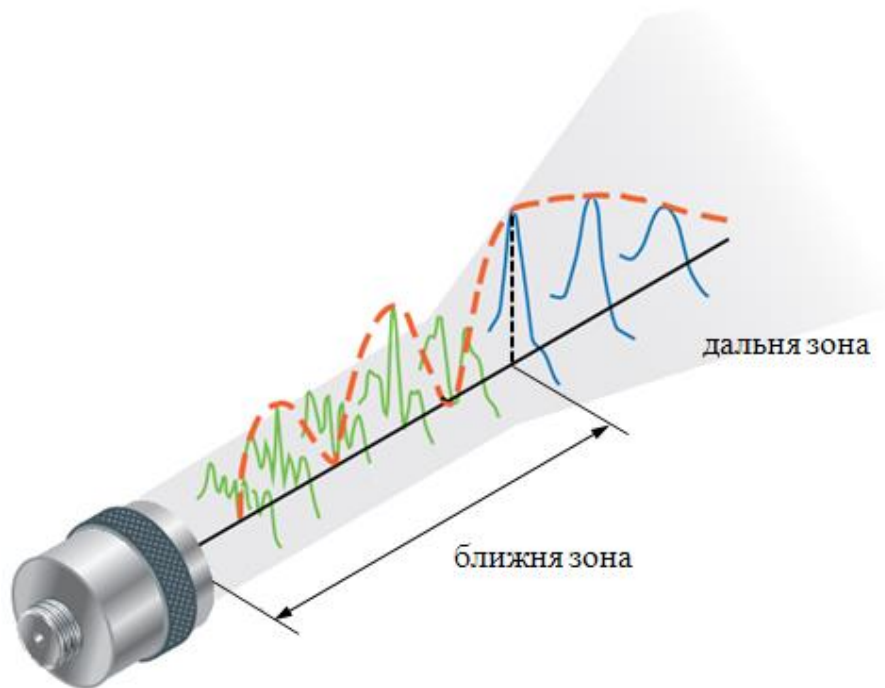


Рис. 5.4. Структура акустичного поля в ближній та дальній зонах круглого ПЕП (рисунок схематичний, масштаб вздовж акустичної осі не дотримано)

У **дальній зоні** (зоні Фраунгофера) поле має вигляд променів, що розходяться із точки, яка називається акустичним центром. Така структура поля в дальній зоні обумовлена переважним впливом дифракційних процесів, що супроводжують поширення ультразвукової хвилі.

Аналіз формули (5.2) дає змогу зробити висновок, що на достатньо великих відстанях від ПЕП тиск описується залежністю (див. розділ 5.7, розв'язок прикладу 5.1):

$$P = P_0 \frac{S}{\lambda_{ок} z}, \quad (5.4)$$

де S – площа перетворювача.

Це означає, що на великих відстанях тиск зменшується обернено пропорційно відстані. Саме так поводить себе сферична хвиля. Вираз (5.4) показує, що на достатньо великих відстанях форма випромінювача не відіграє ніякої ролі; значення має лише площа. Таким чином, всі випромінювачі на значній відстані можна розглядати як точкові.

Характерною особливістю дальньої зони є те, що хвиля із плоскої в ближній зоні перетворюється у сферичну в дальній. На рис. 5.5 суцільною лінією показане поле на осі круглого ПЕП, розраховане за формулою (5.2) починаючи з відстані $r_{бл}/2$, та його наближення у вигляді сферичної хвилі (штрихова лінія), що розраховане за формулою (5.4). На відстані $z=r_{бл}$ значення тиску сферичної хвилі завищене по відношенню до тиску на осі круглого ПЕП на приблизно 57%, на відстані $z=2r_{бл}$ – 11%, на відстані $z=3r_{бл}$ – 5%, а на відстані $z=4r_{бл}$ – 3%. З рис. 5.5 видно, що тиск досягає значення P_0 поза межами ближньої зони на відстані $3r_{бл}$. Вважається, що саме з цієї відстані починається дальня зона акустичного поля¹⁹, тобто $r_d > 3r_{бл}$.

Простір у межах від $r_{бл}$ до $3r_{бл}$ називають *перехідною зоною*.

Таким чином, можна зауважити, що зони акустичного поля випромінювача залежать від його поперечних розмірів і товщини (оскільки товщина визначає резонансну частоту, від якої залежить довжина хвилі в ОК).

¹⁹ Варто зазначити, що в деяких літературних джерелах початок дальньої зони визначається іншими співвідношенням, наприклад, $r_d > (6-8)r_{бл}$. Причиною цього може бути різний підхід до визначення того, коли хвиля із площинної остаточно перетворюється у сферичну. Однак у підручнику для розрахунку початку дальньої зони використовується співвідношення $r_d > 3r_{бл}$.

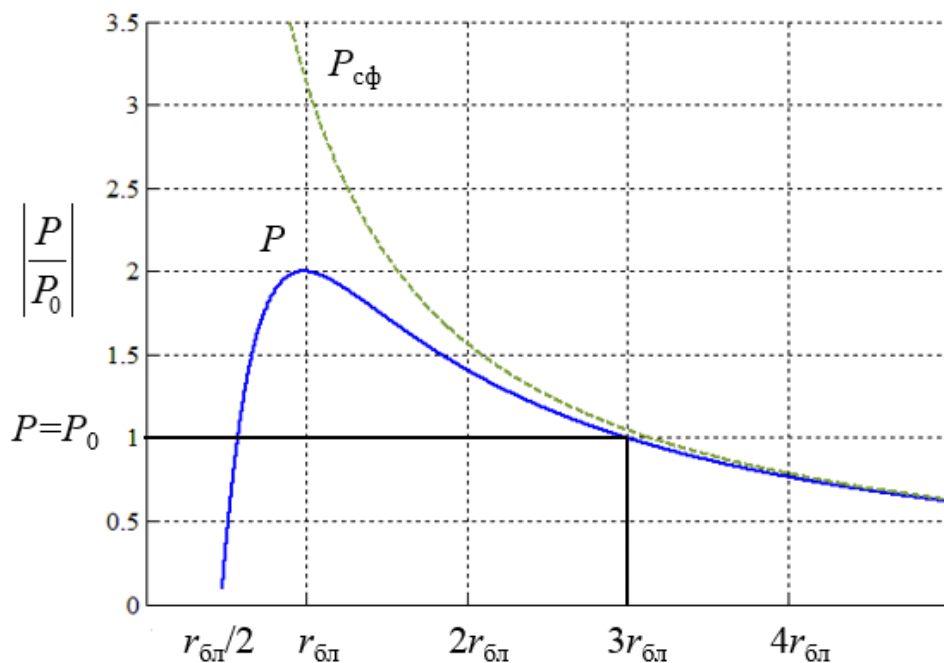


Рис. 5.5. Акустичне поле на осі круглого ПЕП у дальній зоні

У ближній зоні структура поля характеризується великою неоднорідністю, тому вести контроль в ній не рекомендується. Ближню зону можна назвати зоною невпевненого контролю. Якщо оцінювати дефекти в ближній зоні за амплітудою віддзеркалених сигналів, можна помилитись у визначенні місця розташування та кількості дефектів. Наприклад, на відстані $r_{\text{бл}}/2$ від випромінювача поле має мінімум на осі, а збоку – максимумами (див. рис. 5.4). Тоді під час пошуку і оцінюванні дефектів за максимумом амплітуди луно-сигналів, якщо в цій зоні на акустичній осі буде знаходитись один дефект, то із-за бічних максимумів поля він може бути помилково визначений як два дефекти, що розміщені з боків від реального дефекту. Тому здебільшого вимірювання виконуються у дальній зоні. Якщо ж виникає потреба шукати дефекти у ближній зоні, то застосовують певні прийоми, які дозволяють керувати структурою акустичного поля у цій зоні.

У практиці ультразвукового контролю найчастіше використовується імпульсне випромінювання. Тривалість імпульсу пов'язана з шириною спектра – чим менше тривалість, тим ширше спектр частот, тим сильніше згладжуються осциляції амплітуди поля в ближній зоні. Можна підібрати тривалість імпульсу таким чином, що осциляції зникнуть і структура поля в ближній зоні буде однорідною. Але, навіть у цьому випадку, на межі ближньої зони існує

невизначеність по амплітуді, тому контроль у цій області проводити не рекомендується.

Збуджувані п'єзоелементом ультразвукові коливання поширюються у середовищі в різних напрямках, маючи при цьому різну інтенсивність. Здатність перетворювача випромінювати ультразвукові хвилі в одних напрямках більшою мірою, ніж в інших, називається **направленістю випромінювання**.

Направленість перетворювача описують характеристикою направленості – відношенням інтенсивності, що створюється цим перетворювачем у напрямку максимального випромінювання, до інтенсивності ненаправленого випромінювача тієї ж потужності на однаковій відстані.

Характеристику направленості випромінювання визначають поперечні розміри перетворювача, які також задають фронтальну (кутову) роздільну здатність, чутливість та ін. Від поперечних розмірів залежить поява у спектрі випромінювання додаткових заважаючих сигналів, обумовлених реверберацією в радіальному напрямку, зокрема й на нових типах хвиль.

Направленість випромінювання переважно проявляється у дальній зоні акустичного поля круглого перетворювача, оскільки у ближній зоні, як зазначалось вище, акустичне поле являє собою трубку випромінювання. У дальній зоні акустичне поле має вигляд усіченого конуса з деяким кутом θ_0 при вершині. Характеристику направленості перетворювача у дальній зоні прийнято називати діаграмою направленості.

Діаграма направленості – це залежність амплітуди акустичного поля в дальній зоні від кута між акустичною віссю і напрямком конкретного променя. Акустична вісь – це пряма, що проведена через акустичний центр у напрямку максимуму діаграми направленості. За одиницю масштабу прийнято амплітуду тиску на акустичній осі.

У дальній зоні дискового випромінювача діаметром $2a$ акустичне поле вісесиметричне. ДН поля випромінювання у будь-якій із площин розраховується за формулою²⁰ (рис. 5.6):

$$R(\theta) = \frac{2J_1(a \cdot k \cdot \sin \theta)}{a \cdot k \cdot \sin \theta},$$

де J_1 – функція Бесселя 1-го роду 1-го порядку, нулі якої відповідають нулям ДН, k – хвильове число.

Центральну частину ДН, у межах якої амплітуда зменшується від одиниці до нуля, називають **основною (головною) пелюсткою**. Амплітуду основної пелюстки вважають сталою, коли вона змінюється не більше ніж на 3 дБ. У межах основної пелюстки зосереджено близько 85% енергії поля випромінювання. Крім цього центрального пучка, є ще більш слабкі максимуми випромінювання у вигляді концентричних **бічних пелюсток**. Межею акустичного поля у дальній зоні умовно вважають геометричне місце точок, де амплітуда падає у 10 разів порівняно із її значенням на осі, тобто на -20 дБ. Ширина ДН у дальній зоні на практиці характеризується зменшенням амплітуди в 2 рази, тобто на -6 дБ.

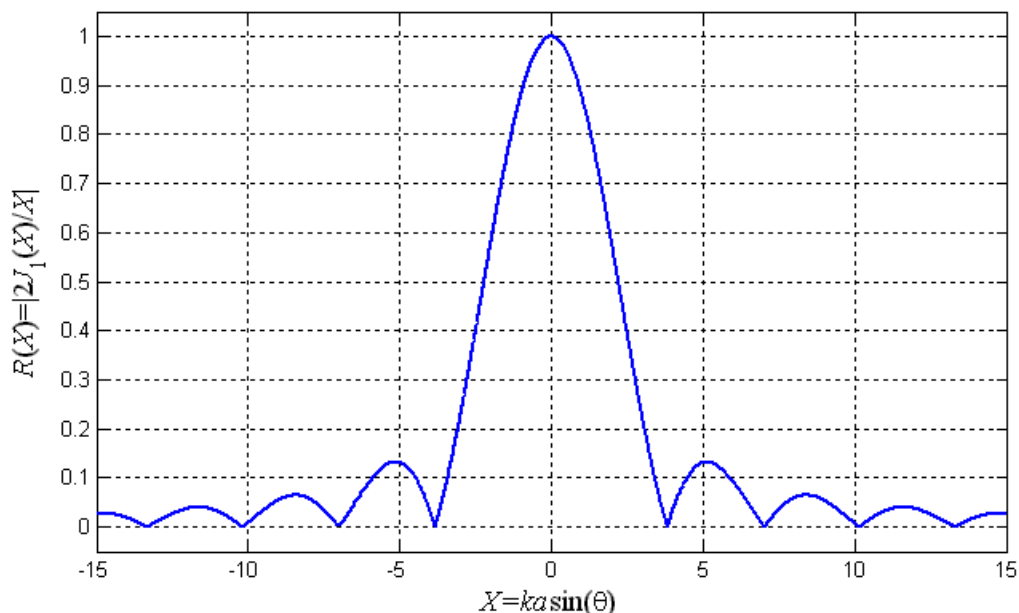


Рис. 5.6. Модуль діаграми направленості круглого ПЕП

²⁰ Формули для розрахунку ДН в даному розділі наведені для випадку неперервного гармонійного збудження випромінювача. У випадку імпульсного збудження в ДН будуть відсутні чітко виражені нулі і бічні максимуми.

Кут θ_0 , при якому функція $R(\theta)$ перетворюється у нуль вперше, називається кутом розхилу²¹ (розкриття) діаграми направленості:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{0,61\lambda_{\text{ок}}}{a}.$$

У практиці ультразвукового контролю інколи визначають кут розхилу основної пелюстки поля випромінювання на рівнях, що відрізняються від нульового:

- на рівні 0,1 від максимуму (-20 дБ):

$$\theta_{0,1} = \arcsin \frac{0,54\lambda_{\text{ок}}}{a};$$

- на рівні 0,5 від максимуму (-6 дБ):

$$\theta_{0,5} = \arcsin \frac{0,35\lambda_{\text{ок}}}{a};$$

- на рівні 0,7 від максимуму (-3 дБ):

$$\theta_{0,7} = \arcsin \frac{0,25\lambda_{\text{ок}}}{a}. \quad (5.5)$$

На практиці ДН поля випромінювання круглого перетворювача в межах основної пелюстки оцінюють за допомогою наближених виразів:

$$R(\theta) \approx e^{-0,142(ka \cdot \sin\theta)^2}, \quad (5.6)$$

або

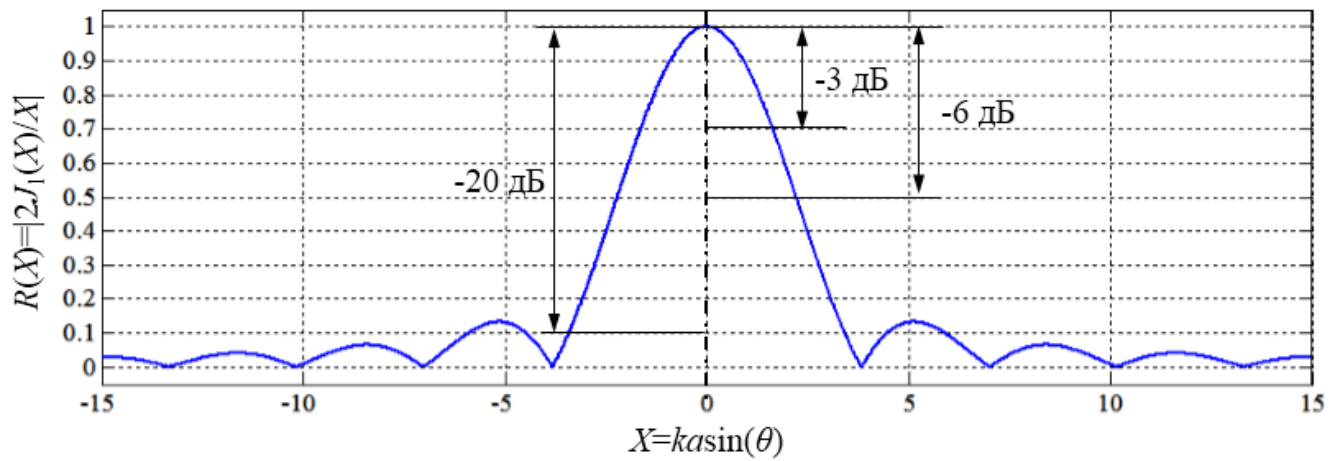
$$R(\theta) \approx 1,32^{-0,5(ka \cdot \sin\theta)^2}. \quad (5.7)$$

Залежності (5.6) та (5.7) особливо добре співпадають із кривими для випромінювання коротких імпульсів.

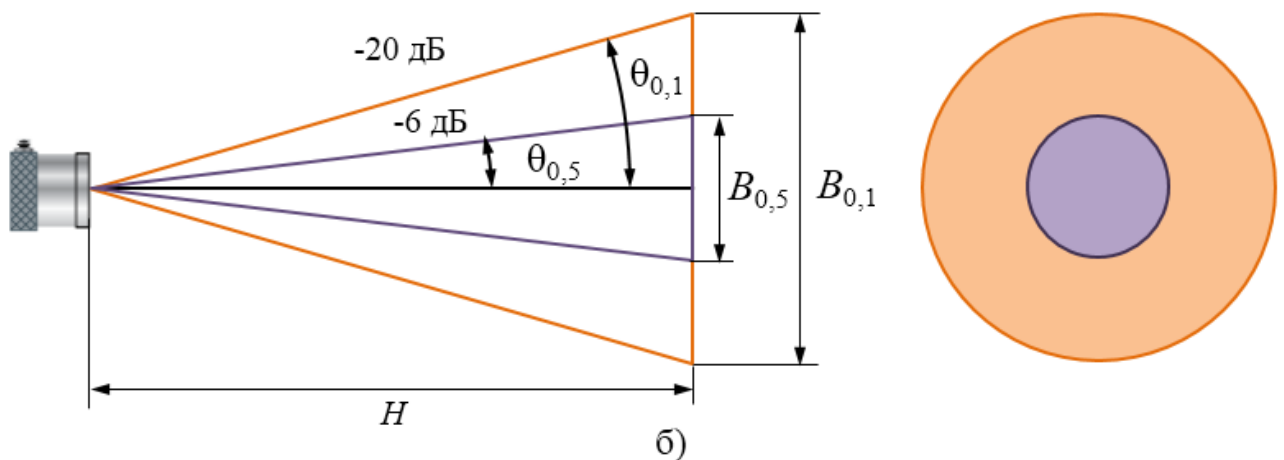
При відомому куті розхилу основної пелюстки на рівні α можна розрахувати діаметр акустичного променя на заданій глибині H в дальній зоні (рис. 5.7):

$$B_\alpha = 2H \cdot \text{tg}(\theta_\alpha).$$

²¹ Зауважимо, що в технічній літературі відсутня єдина термінологія відносно кутів, що характеризують розходження звукового променя. В даному підручнику під кутом розхилу розуміється кут між акустичною віссю та напрямком випромінювання або прийому на заданому рівні відносно максимуму. Подвоєне значення кута розхилу $2\theta_\alpha$ на заданому рівні α називатимемо просто «розхил основної пелюстки на рівні α » або «ширина основної пелюстки на рівні α »



а)



б)

Рис. 5.7. До розрахунку діаметру акустичного променя: а) рівні амплітуди, за якими визначається кут розхилу; б) залежність діаметру променя в дальній зоні від відстані та рівня вимірювання в дБ

При луно-методі ультразвукового контролю характеристика направленості поля випромінювання (вільного поля) становить менший інтерес, ніж відповідна характеристика поля випромінювання-прийому для виявлення невеликого дефекту по віддзеркаленню за межами осі. Оскільки направленість випромінювача однакова і при випромінюванні, і при прийомі, то характеристика чутливості при луно-способі дорівнює квадрату характеристики поля випромінювання. Це потрібно враховувати при завданні кутів розхилу: θ_0 в обох випадках однакове, але, наприклад, $\theta_{0,7}$ неоднакове, тому що $0,7^2 = 0,49 \approx 0,5$, а отже:

$$\theta_{0,7} (\text{поле випромінювання}) = \theta_{0,5} (\text{поле випромінювання-прийому})$$

Висока направленість поля дає змогу зменшити похибку вимірювань, обумовлену геометричними характеристиками об'єкту контролю (перевіддзеркаленням від стінок і кутів), які спричиняють появу випадкових сигналів, що співставні з сигналами від дефектів.

На рис. 5.8 схематично показані межі звукового поля випромінювання-прийому на рівні -6 дБ для круглого ПЕП.

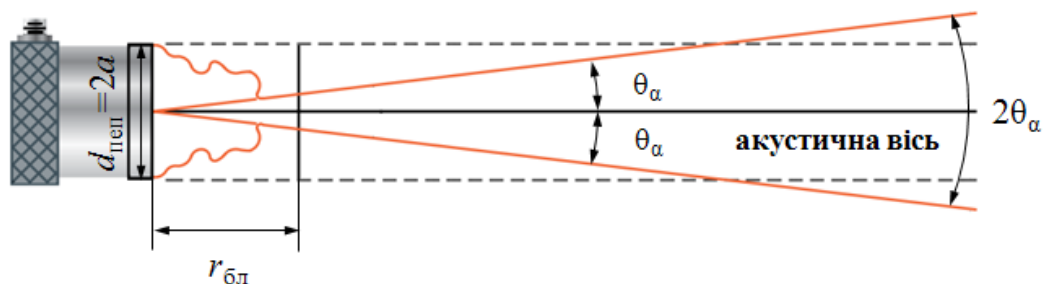


Рис. 5.8. Звукове поле випромінювання-прийому круглого ПЕП в перетині площиною на рівні -6 дБ: α – індекс, що вказує на рівень зниження тиску від максимального, при якому розраховується кут розхилу ДН

З рис. 5.8 видно, що пучок, ослаблений на 6 дБ, може розглядатися як конус тільки починаючи з відстані близько $0,8r_{\text{бл}}$. На відстані $1r_{\text{бл}}$ пучок має ширину приблизно $d_{\text{пеп}}/4$, тобто там він вже сфокусований. І тільки на відстані $4r_{\text{бл}}$ розміри пучка знову досягають діаметра випромінювача $d_{\text{пеп}}$.

5.2.2. Акустичне поле плоского перетворювача прямокутної форми

Акустичне поле прямокутного випромінювача має таку ж зонну структуру, що і поле круглого. Проте протяжність ближньої зони для прямокутного ПЕП розраховується дещо інакше. Якщо визначати довжину ближнього поля як положення останнього максимуму на акустичній осі, то для прямокутного ПЕП справедливий наступний вираз:

$$r_{\text{бл}} = k_{\text{зв}} \frac{a^2}{\lambda_{\text{ок}}}, \quad (5.8)$$

де a – половина довжини більшої сторони пластини, $k_{\text{зв}}$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення сторін b/a (див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Коефіцієнт зв'язку для розрахунку довжини ближньої зони акустичного поля прямокутного ПЕП

Співвідношення сторін b/a	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Коефіцієнт $k_{зв}$	1,37	1,25	1,15	1,09	1,04	1,01	1,00	0,99	0,99	0,99

Довжина ближнього поля прямокутного випромінювача буде більшою за довжину ближнього поля круглого випромінювача тієї ж площі.

Оскільки прямокутні джерела УЗК не мають симетрії тіл обертання, тому поперечні перетини звукового поля не будуть колами, як у круглого випромінювача. Структура звукового поля залежатиме від розмірів обох сторін ПЕП (визначатиметься співвідношенням b/a).

ДН прямокутного випромінювача в перерізі, перпендикулярному акустичній осі, має вигляд еліпса, велика вісь якого паралельна меншій стороні випромінювача (для квадратного перетворювача на великих відстанях перетин поля буде мати форму кола). Тому для прямокутного випромінювача вказують два значення кута розхилу основної пелюстки θ_{a0} і θ_{b0} .

ДН прямокутного випромінювача в площині (рис. 5.9), паралельній стороні прямокутника $2a$, відповідає виразу:

$$R_a(\theta) = \frac{\sin(a \cdot k \cdot \sin \theta)}{a \cdot k \cdot \sin \theta}, \quad (5.9)$$

а в площині, паралельній стороні прямокутника $2b$:

$$R_b(\theta) = \frac{\sin(b \cdot k \cdot \sin \theta)}{b \cdot k \cdot \sin \theta}. \quad (5.10)$$

Функція $R_a(\theta)$ перетворюється в нуль при куті:

$$\theta_{a0} = \arcsin \frac{0,5\lambda_{ок}}{a}.$$

Для функції $R_b(\theta)$ формули аналогічні із заміною параметра a на b .

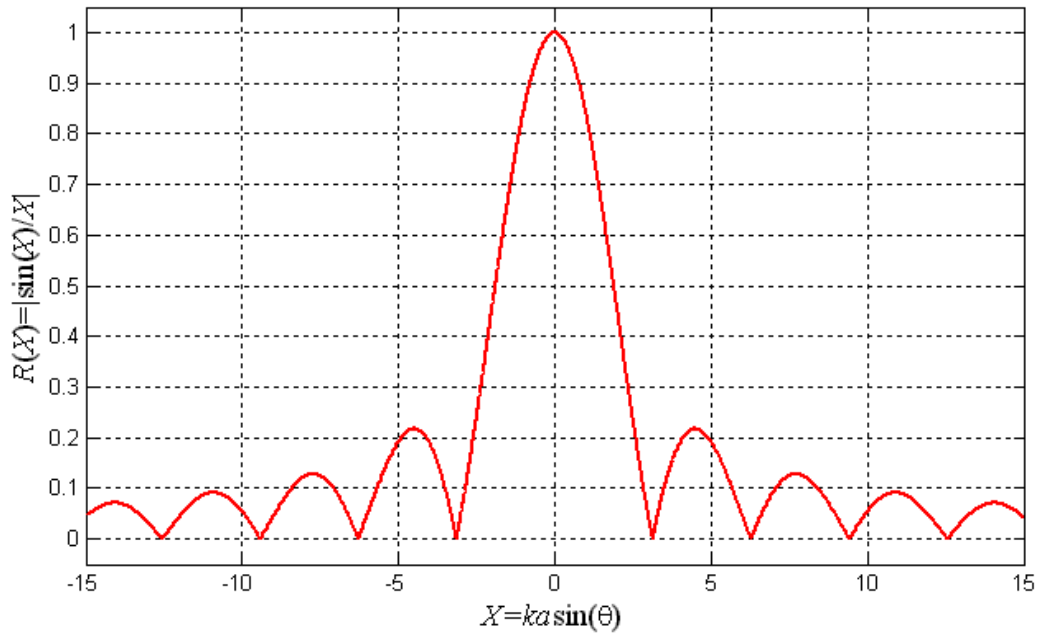


Рис. 5.9. Модуль діаграми направленості прямокутного ПЕП в одній із площин

Кути розхилу основної пелюстки поля випромінювання на різних рівнях для прямокутного випромінювача визначаються виразами:

- на рівні 0,1 від максимуму (-20 дБ):

$$\theta_{a0,1} = \arcsin \frac{0,46\lambda_{\text{ок}}}{a};$$

$$\theta_{b0,1} = \arcsin \frac{0,46\lambda_{\text{ок}}}{b};$$

- на рівні 0,5 від максимуму (-6 дБ):

$$\theta_{a0,5} = \arcsin \frac{0,3\lambda_{\text{ок}}}{a};$$

$$\theta_{b0,5} = \arcsin \frac{0,3\lambda_{\text{ок}}}{b};$$

- на рівні 0,7 від максимуму (-3 дБ):

$$\theta_{a0,7} = \arcsin \frac{0,22\lambda_{\text{ок}}}{a};$$

$$\theta_{b0,7} = \arcsin \frac{0,22\lambda_{\text{ок}}}{b}.$$

Прямокутні перетворювачі застосовуються в тих випадках, коли потрібно збільшити зону контролю за один прохід перетворювача. Основний недолік прямокутних перетворювачів – нерівномірна чутливість уздовж довгої сторони (внаслідок інтерференції хвиль в ближній зоні). Існує кілька способів усунення цього недоліку: скорочення тривалості імпульсу, за рахунок чого згладжуються інтерференційні максимуми в ближній зоні; розширення смуги частот; зміна форми п'єзопластини.

5.3. Перетворювачі фокусувального типу

Ультразвуковий пучок, випромінюваний площинним випромінювачем, внаслідок дифракції розходить в радіальному напрямку в дальній зоні. На значній відстані від випромінювача інтенсивність пучка зменшується, а його перетин збільшується, що призводить до погіршення поперечної (фронтальної) роздільної здатності. Для отримання задовільної роздільної здатності і високої інтенсивності пучка застосовують фокусування.

Фокусувальний перетворювач концентрує енергію акустичного поля в певній області – фокальній зоні, яка при сферичному фокусуванні має вигляд кола, при циліндричному – смуги (рис. 5.10). Сферично сфокусовані перетворювачі дають змогу збільшити чутливість до невеликих дефектів, а циліндрично сфокусовані перетворювачі використовуються для контролю труб і пруткових заготовок.

Важливою геометричною характеристикою фокусування є так звана **фокусна відстань** перетворювача²² – це відстань від зовнішньої поверхні перетворювача до точки акустичного поля, в якій локалізовано сигнал з максимальною амплітудою.

Фокусування (незалежно від типу фокусувальної системи) є найбільш ефективним в ближній зоні поля випромінювання; в дальній зоні ефект від фокусування незначний внаслідок негативного впливу дифракції.

²² У несфокусованих перетворювачах ця відстань відповідає довжині ближньої зони, де відбувається незначне зменшення діаметру променя (т. зв. природне фокусування).

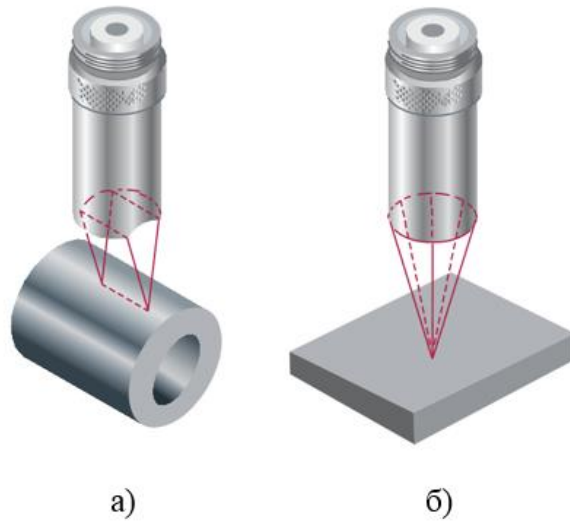


Рис. 5.10. Вигляд зони фокусування: а) циліндричний фокус, б) сферичний фокус

До основних типів ультразвукових фокусувальних систем можна віднести (рис. 5.11): **активні концентратори** (зігнуті випромінювачі), **рефрактори** (акустичні заломлюючі лінзи), **рефлектори** (пасивні відбивачі) і **розподілені перетворювачі** (дефлектори, фазовані антенні решітки, комутовані матриці)²³.

Оскільки рефлектор не знайшов широкого застосування в техніці неруйнівного контролю (очевидно, що подібний спосіб фокусування можна використовувати тільки в рідинах або газах), тому його характеристики не розглядаються в даному розділі.

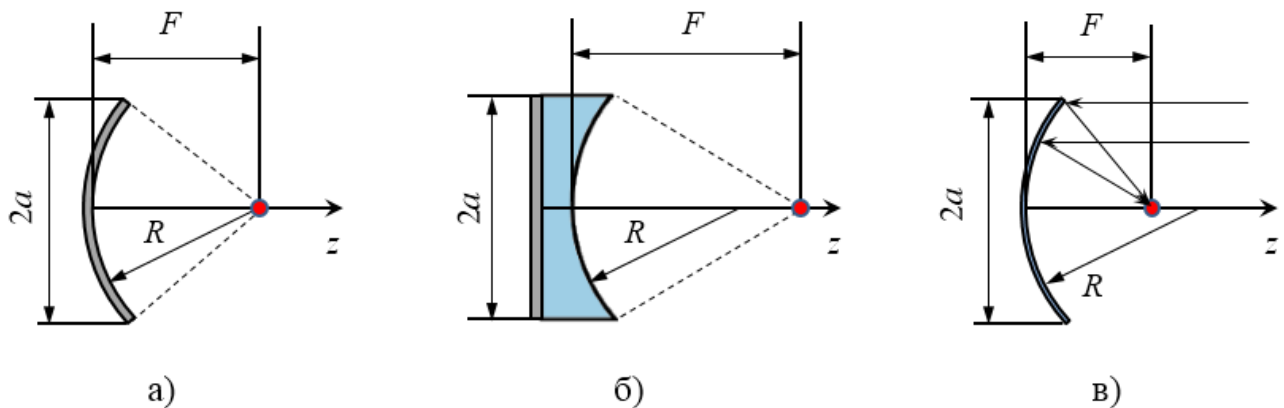


Рис. 5.11. Основні типи фокусувальних систем: а) активний концентратор; б) рефрактор; в) рефлектор: F – фокус, R – радіус кривизни, a – радіус зіниці відповідної фокусувальної системи

²³ Про цей тип перетворювачів докладно буде описано в наступному розділі.

Круговий активний концентратор є випромінювачем у формі частини сфери або циліндра. Кут розкриття фронту складає:

$$\psi_m = \arcsin \frac{a}{R} = \arcsin \frac{a}{F},$$

де R – радіус кривизни випромінювача, a – радіус зіниці концентратора.

Активні концентратори в основному мають кут розкриття в межах $\psi_m \leq 30^\circ$ (тому що при великих значеннях кута спостерігається взаємна компенсація акустичного тиску від симетрично розташованих ділянок концентратора).

Для активного концентратора акустичне поле на осі визначається виразом:

$$P = P_0 \cdot \left| \frac{2}{1 - \frac{z}{R}} \right| \cdot \left| \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{(z-h)^2 + a^2} - z \right) \right] \right|, \quad (5.11)$$

де $h = R - \sqrt{R^2 - a^2}$, P_0 – початковий тиск; λ – довжина акустичної хвилі; z – відстань вздовж осі.

Згідно законів геометричної акустики фокусна відстань концентратора має дорівнювати радіусу його кривизни, тобто $F=R$. Це твердження справедливе для малих радіусів кривизни; при збільшенні радіусу кривизни реальний фокус (відстань, на якій тиск максимальний) буде дещо ближче до випромінювача, тобто $F_{\max} < R$. На рис. 5.12 наведено графік, побудований за формулою (5.11) при наступних параметрах: $a=5$ мм, $R=33$ мм, $\lambda=0,5$ мм.

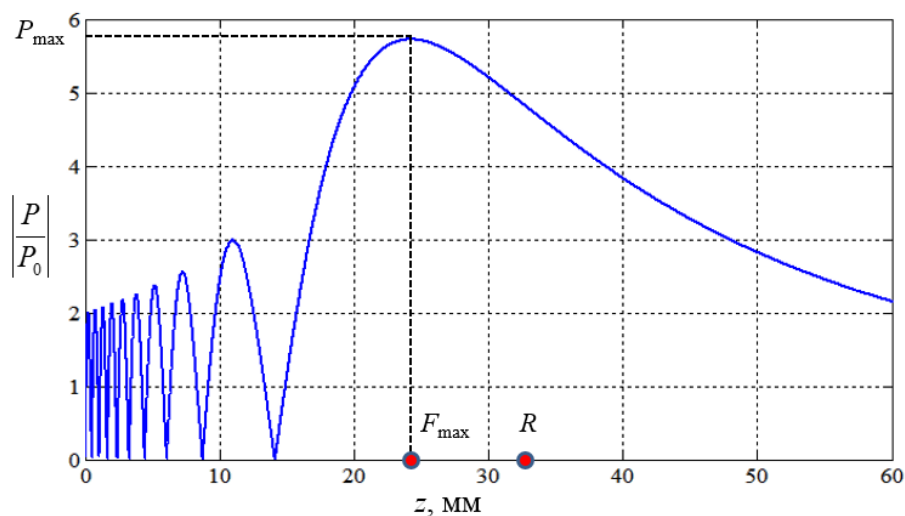


Рис. 5.12. Розподіл звукового тиску на осі концентратора

В точці фокусу відбувається максимальна концентрація акустичної енергії за рахунок інтерференції, причому в площині, перпендикулярній напрямку акустичної осі, акустичне поле матиме чітко виражені мінімуми і максимуми інтенсивності (рис. 5.13).

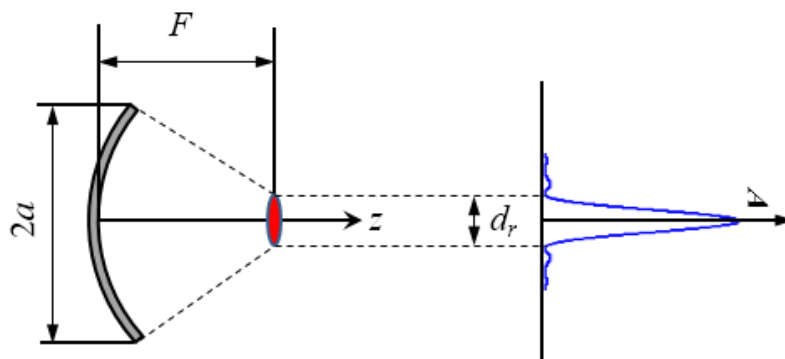


Рис. 5.13. Розподіл акустичного тиску в точці фокусування (графік функції розподілу показаний по модулю)

Діаметр акустичного променя в точці фокусу (де він є найменшим) називають **діаметром фокальної плями** (диском Ейрі), який визначається за формулою:

$$d_r = 1,22 \frac{F \lambda_{\text{ок}}}{a}, \quad (5.12)$$

де $F=R$ у випадку концентратора.

З рис. 5.13 видно, що діаметр фокальної плями, розрахований за формулою (5.12) визначається положенням перших мінімумів функції розподілу відносно максимального значення в центрі²⁴. Такий підхід до розрахунку діаметру фокальної плями в акустику прийшов із оптики, в якій дифракційна межа розрізнення виражається через кутовий параметр (в радіанах) диску Ейрі (центральної зони дифракційної картини для круглої апертури радіуса a) $\delta_r = 1,22\lambda/a$.

Звідси визначається дифракційна межа поперечної роздільної здатності системи навіть за умови фокусування. Для розрахунку поперечної (фронтальної) роздільної здатності найчастіше використовується критерій роздільної здатності, що ґрунтується на розрізненні двох точок. В кінці XIX століття англійський фізик

²⁴ Діаметр фокальної плями в практиці неруйнівного контролю може бути визначений і на інших рівнях (наприклад, -6 дБ), проте в цьому випадку використовуватимуться інші коефіцієнти пропорційності.

Дж. Релей запропонував умовно вважати оптичне розрізнення повним, коли відстань між центрами двох точкових зображень дорівнює (або перевищує) радіус диска Ейрі (рис. 5.14). Цей же принцип застосовують і в акустиці. У такому випадку поперечна роздільна здатність визначатиметься за наступною формулою (релеївський критерій):

$$d_{\text{Релея}} = \frac{d_r}{2} = 0,61 \frac{F \lambda_{\text{ок}}}{a}. \quad (5.13)$$

Таким чином, два сусідні точкові джерела вважаються розрізненими, якщо максимум відгуку на одне з них співпадає з першим мінімумом відгуку на інше (див. рис. 5.14). При одночасному спостереженні двох джерел, які розташовані на відстані $d_{\text{Релея}}$ один від одного, провал інтенсивності в проміжку між ними складає 26,5%, що цілком достатньо для їх розрізнення (ще раз зауважимо, що цей критерій застосовується переважно в оптиці).

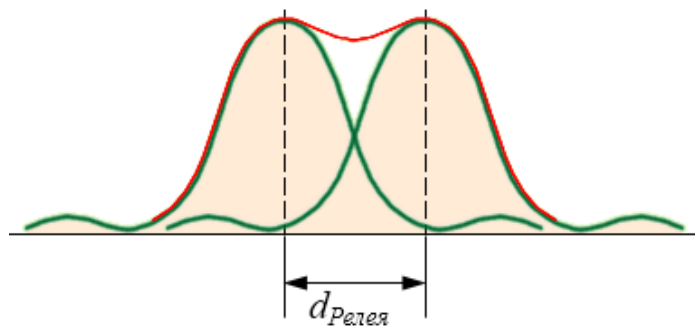


Рис. 5.14. Межа розрізнення за Релеєм (червона лінія – розподіл сумарної інтенсивності)

Коефіцієнт підсилення фокусувальної системи дорівнює відношенню амплітуд акустичного тиску сфокусованого і несфокусованого перетворювачів з однаковими розмірами зіниць. Для активного концентратора коефіцієнт підсилення за акустичним тиском в ближній зоні:

$$K_p = \frac{\pi r_{\text{бл}}}{2F} = \frac{\pi r_{\text{бл}}}{2R} = \frac{\pi a^2}{2\lambda_{\text{ок}} R} = \frac{S}{2\lambda_{\text{ок}} R}.$$

Тепер розглянемо фокусувальну систему типу рефрактор. Рефрактор складається з двох основних елементів: заломлюючої лінзи та плоского п'єзоелектричного перетворювача (рис. 5.15).

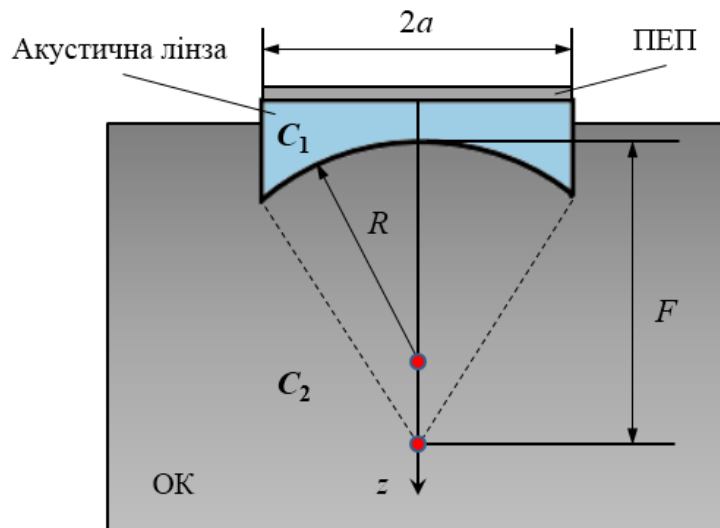


Рис. 5.15. Фокусувальна система типу рефрактор: R – радіус кривизни, a – радіус зіниці рефрактора, F – фокусна відстань, C_1 , C_2 – швидкості хвиль в матеріалі лінзи та середовищі фокусування відповідно

Рефрактори, як і активні концентратори, також мають кут розкриття в межах $\psi_m \leq 30^\circ$.

Фокусна відстань рефрактора розраховується як:

$$F = \frac{R}{1 - n_{12}} = \frac{R}{1 - \frac{C_2}{C_1}}. \quad (5.14)$$

Оскільки $C_2 < C_1$, тоді $F > 0$, а отже, лінза є збираючою.

Звукове поле на осі рефрактора визначається виразом:

$$P = P_0 \cdot \left| \frac{2}{1 - \frac{z}{z_0}} \right| \cdot \left| \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{(z - h)^2 + a^2} - \left(z - \frac{C_2}{C_1} h \right) \right) \right] \right|, \quad (5.15)$$

де $z_0 = \frac{h^2(1 - (C_2/C_1)^2) + a^2}{2h(1 - C_2/C_1)}$; розшифровування інших позначень згідно формули (5.11).

Зауважимо, що величина z_0 в формулі (5.15) є фокусною відстанню. Записана раніше формула (5.14) є простішою для розрахунків і дає змогу наближено розрахувати положення фокусу, тобто $F \approx z_0$.

Ефект фокусування з використанням рефрактора менший, ніж для концентратора того ж діаметру. Максимум звукового тиску на осі рефрактора не знаходиться в тому місці, де він повинен бути згідно геометричних міркувань (якщо його розраховувати за формулою (5.14)), а ближче. На рис. 5.16 наведено графік, побудований за формулою (5.15) при наступних параметрах: $a=5$ мм, $R=16$ мм, $\lambda=0,5$ мм, $C_1=2700$ м/с, $C_2=1500$ м/с.

Діаметр фокальної плями та поперечна роздільна здатність рефрактора розраховуються за формулами (5.12)-(5.13).

Коефіцієнт підсилення рефрактора за акустичним тиском в ближній зоні визначається як:

$$K_p \cong \frac{\pi r_{\text{бл}}}{2F} = \frac{\pi r_{\text{бл}}}{2R} (1-n) = \frac{S}{2\lambda_{\text{ок}} R} \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right).$$

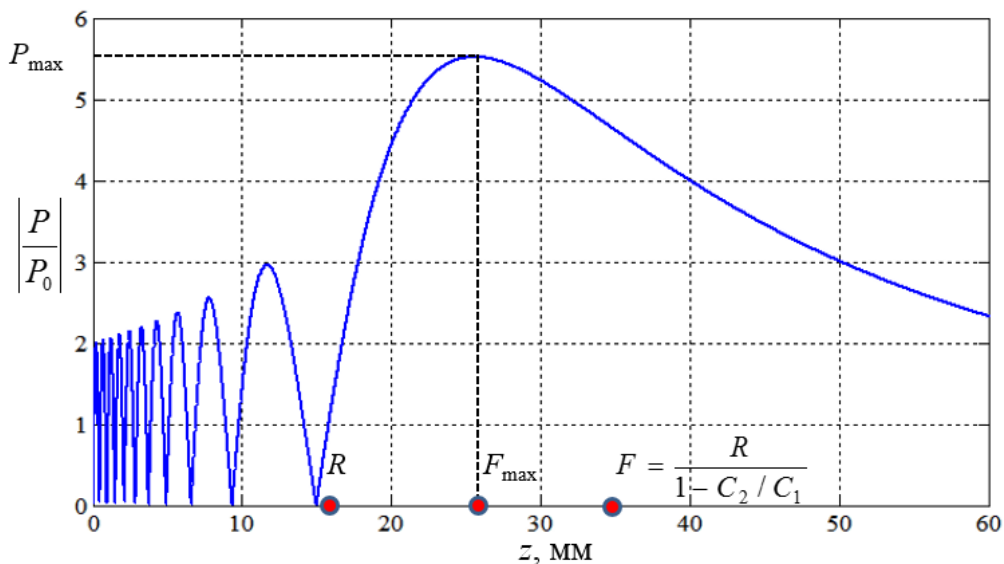


Рис. 5.16. Розподіл звукового тиску на осі рефрактора

Сфокусований акустичний промінь може бути охарактеризований **фокусним фактором** або приведеною фокусною відстанню:

$$S_{\text{ac}} = \frac{F}{r_{\text{бл}}},$$

де $r_{\text{бл}}$ – глибина ближньої зони, F – фокусна відстань ($F < r_{\text{бл}}$), $0 < S_{\text{ac}} < 1$.

Сфокусовані промені класифікуються на:

- 1) сильно сфокусовані – $0,1 < S_{\text{ac}} < 0,33$;

2) середньо сфокусовані – $0,33 < S_{ac} < 0,67$;

3) слабо сфокусовані – $0,67 < S_{ac} < 1$.

Фокусувальні перетворювачі з фокусним фактором від 0,8 до 1,0 практично не мають ніяких переваг в порівнянні із плоскими (несфокусованими) перетворювачами. У більшості промислових задач використовуються сфокусовані поля з $S_{ac} < 0,6$.

Для середньо і сильно сфокусованих полів діаметр променя в точці фокусування рефрактора на рівні -6 дБ поля випромінювання-прийому (рис. 5.17) розраховується за формулою:

$$\Delta d_{-6\text{дБ}} \approx \frac{D \cdot S_{ac}}{4} = \frac{F \cdot C}{D \cdot f}, \quad (5.16)$$

де $D=2a$ – діаметр зіниці фокусувальної системи.

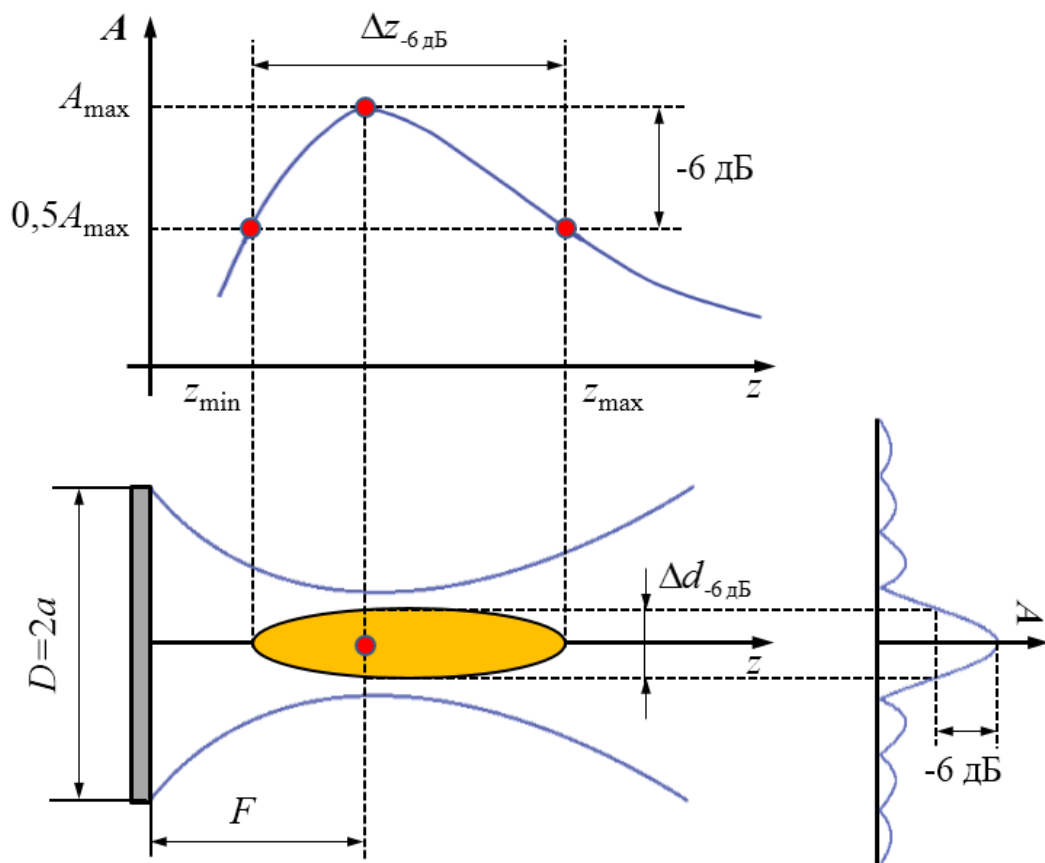


Рис. 5.17. Глибина фокальної зони та діаметр фокальної плями сфокусованого поля випромінювання-прийому на рівні -6 дБ

Глибина фокальної зони (глибина різкості) рефрактора на рівні -6 дБ поля випромінювання-прийому (див. рис. 5.17) розраховується за формулою:

$$\Delta z_{-6\text{ дБ}} \approx r_{\text{бл}} \cdot S_{\text{ac}}^2 \left(\frac{2}{1 + 0,5S_{\text{ac}}} \right) = \frac{2F^2}{r_{\text{бл}} + 0,5F}, \quad (5.17)$$

За умови $S_{\text{ac}} < 0,6$ глибина фокальної зони рефрактора по рівню -6 дБ поля випромінювання-прийому може бути розрахована за наближеним виразом:

$$\Delta z_{-6\text{ дБ}} \approx 7\lambda_{\text{ок}} \left(\frac{F}{D} \right)^2,$$

Формули (5.16) та (5.17) узгоджуються з наступними твердженнями:

- чим вище частота перетворювача при незмінному геометричному розмірі, тим вужчий промінь він формує;
- чим менше S_{ac} , тим менше глибина фокальної зони;
- чим менше S_{ac} , тим менший діаметр променя.

5.4. Розподілені перетворювачі типу фазованих антенних решіток та комутованих матриць

Розподілені ПЕП знаходять широке застосування в неруйнівному контролі, оскільки мають ряд суттєвих переваг в порівнянні зі звичайними одноелементними перетворювачами: можливість електронного керування променем, що дає змогу виконувати сканування певного об'єму ОК без механічного переміщення датчика, та фокусування, яке підвищує роздільну здатність. На сьогоднішній день існує значна кількість конструкцій розподілених багатоеlementних перетворювачів (рис. 5.18), призначених для різного застосування.

Перетворювач у вигляді кільцевої решітки складається з ряду концентричних кільцевих елементів, що утворюють плоску або викривлену поверхню. Введення відповідних фазових затримок між сигналами, випроміненими або прийнятими кожним елементом (або одночасно між сигналами обох цих типів), дає змогу в принципі сформувати хвильовий фронт з круговою апертурою і будь-якою необхідною формою. На практиці часто необхідно, щоб хвильові фронти були сферичними або мали близьку до сферичної конфігурацію. Для цієї мети використовуються дві різні конструкції кільцевих решіток. У першому випадку

застосовується стаціонарне геометричне фокусування без введення яких-небудь фазових затримок в межах апертури решітки. Фокусування на осі досягається за допомогою акустичної лінзи або шляхом надання певної конфігурації самій решітці. У другому випадку між сусідніми кільцевими елементами вводяться однакові фазові затримки. В результаті така решітка перетворюється на звичайну зонну пластинку Френеля, у якої зовнішні діаметри кілець зростають в послідовності $1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$ і далі у такому порядку, причому площі всіх кілець рівні між собою.

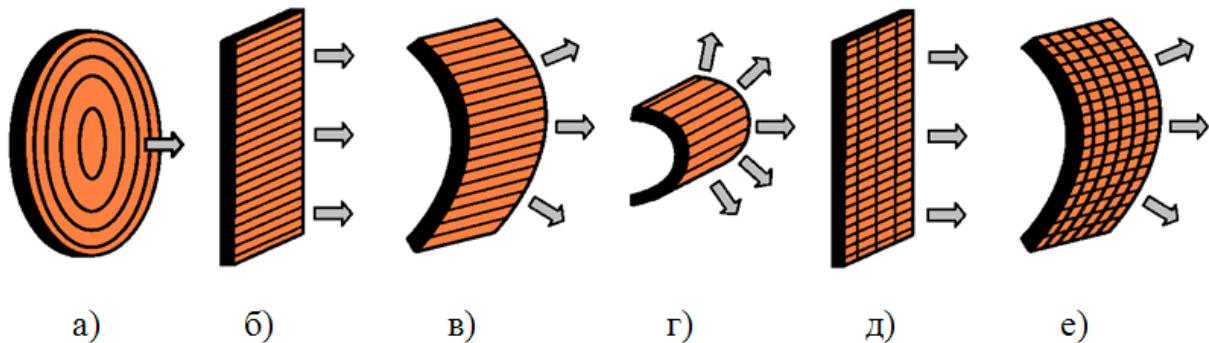


Рис. 5.18. Конфігурація п'єзоелементів в різних типах розподілених перетворювачів:
 а) кільцева решітка; б) одновимірна лінійна решітка; в) одновимірна конвексна решітка;
 г) одновимірна мікроконвексна решітка; д) двовірна плоска решітка; е) двовірна конвексна решітка

Комутовані матриці і фазовані решітки належать до випромінювачів розподіленого типу, в яких передбачено можливість керування амплітудно-фазовими характеристиками збудження окремих елементів або групи елементів випромінювача. Лінійні комутовані матриці і фазовані решітки мають практично однакові конструкторсько-технологічні характеристики і відрізняються лише способом електронного сканування ОК та формування вихідного зображення.

Ультразвукові лінійні КМ та ФАР складаються з групи окремих, ідентичних, упорядковано розташованих в одній площині випромінювальних елементів. У лінійних решіток центри п'єзоелементів розміщені на одній осі x , причому довжина п'єзоелемента l зазвичай значно перевищує його ширину w (рис. 5.19). По суті, антенні решітки є набором незалежних перетворювачів, що конструктивно об'єднані в одному корпусі, але розв'язані між собою електрично і акустично.

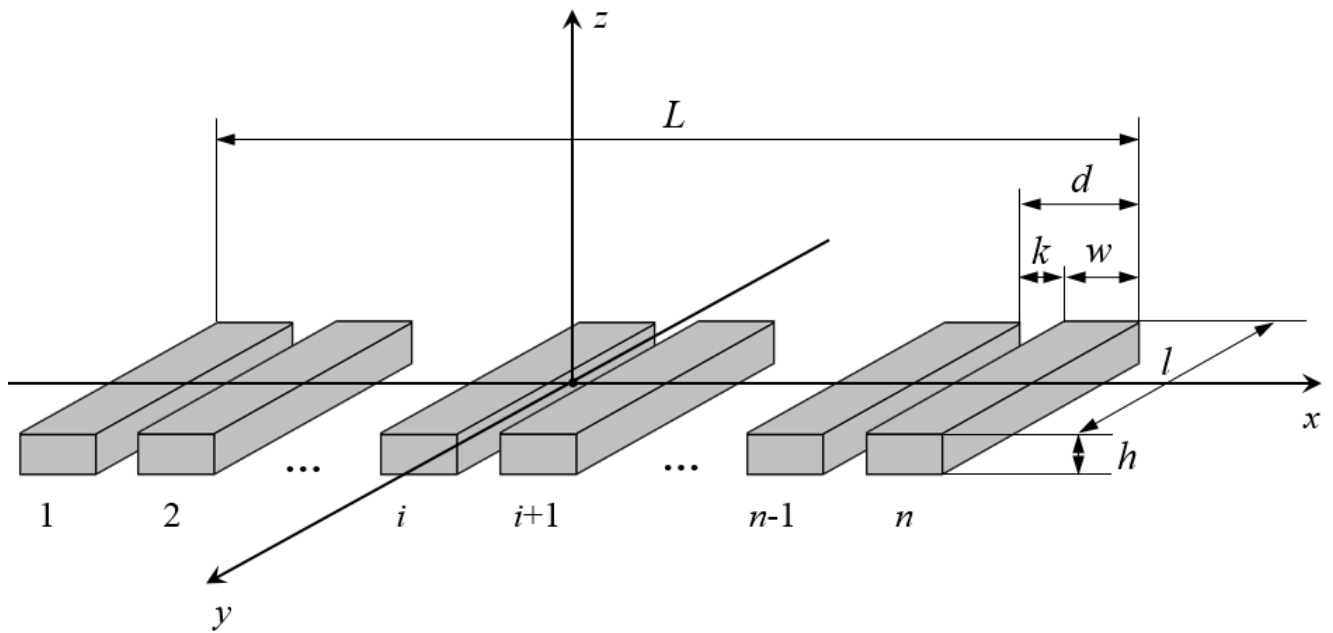


Рис. 5.19. Розподілений перетворювач: L – довжина перетворювача (активна апертура), d – крок решітки, w – ширина елементу, k – ширина паза між елементами, h – товщина елементу, l – ширина решітки (пасивна апертура), n – кількість елементів перетворювача

Активна апертура розраховується як:

$$L = n \cdot d - k \approx n \cdot d .$$

Ширина паза між елементами визначається як:

$$k = d - w .$$

Ширина паза між елементами k вибирається експериментально з урахуванням технологічних можливостей обладнання, за допомогою якого виконуються такі прорізи. Співвідношення $w/d < 1$ називається функцією заповнення і впливає на формування акустичного поля.

Існує декілька підходів до вибору ширини (пасивної апертури) решітки l :

1. Оптимальна величина пасивної апертури КМ визначається частотою та необхідним діапазоном фокусних відстаней:

$$l = 1,4 \cdot \sqrt{\lambda_{\text{ок}} (F_{\text{min}} + F_{\text{max}})} ,$$

де F_{min} , F_{max} – відповідно мінімальна та максимальна глибини фокусування.

2. Пасивна апертура ФАР визначається довжиною решітки (активною апертурою) та максимальним кутом відхилення променя:

$$L \cdot \cos \theta_{k \max} \leq l \leq L,$$

де $\theta_{k \max}$ – максимальний кут відхилення променя.

Пасивна апертура впливає на чутливість і на точність визначення розмірів дефектів. Для лінійної решітки максимальна чутливість досягається при $l=L$. Також пасивна апертура впливає на ширину променя та розподіл акустичного тиску. Найчастіше антенні решітки виготовляють із співвідношенням $l/d > 10$.

Діаграма направленості лінійної ФАР формується в результаті інтерференції хвиль, що випромінюються окремими елементами. Якщо решітка складається з мініатюрних п'єзоелементів, подібних джерелам Гюйгенса, то при одночасному збудженні певної групи елементів можна синтезувати плоский хвильовий фронт, протяжність якого відповідає розміру апертури даної групи елементів. За умови, що випромінювачі ідентичні і однаково орієнтовані, то загальну ДН ФАР можна представити у вигляді добутку ДН окремого елемента на множник решітки.

Якщо врахувати, що $w < \lambda_{\text{ок}}$ (у такому випадку кожним окремим елементом формується широка ДН²⁵), то модуль ДН ФАР визначається як:

$$R(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi d n}{\lambda_{\text{ок}}} \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda_{\text{ок}}} \sin \theta\right)} \right|, \quad (5.18)$$

де d , $\lambda_{\text{ок}}$ і n – крок, довжина хвилі в ОК і кількість елементів ФАР відповідно.

Нескладно помітити, що вищенаведений вираз може мати одиничні значення не тільки при $\theta=0^\circ$ (головна пелюстка ДН). Виникнення одиничних максимумів можливо за умови, коли чисельник і знаменник виразу (5.18) згортаються в 0. Тоді з'являються бічні максимуми, що рівні по амплітуді головному (рис. 5.20в). Їх напрямки визначають із рівняння:

$$\sin \theta = \pm r \frac{\lambda_{\text{ок}}}{d},$$

де $r=1,2,\dots$

²⁵ Вузькі ДН окремих елементів антенної решітки в просторі випромінювання можуть не перетнутися і не виникне просторова інтерференція, що формує загальну ДН ФАР.

Для того, щоб додаткових максимумів одиничного рівня не виникало, повинна виконуватись умова:

$$d < \lambda_{\text{ок}} \frac{n-1}{n}.$$

На рис. 5.20 наведено ДН ФАР для різних співвідношень $d/\lambda_{\text{ок}}$ (при цьому активна апертура L в кожному випадку залишалась незмінною).

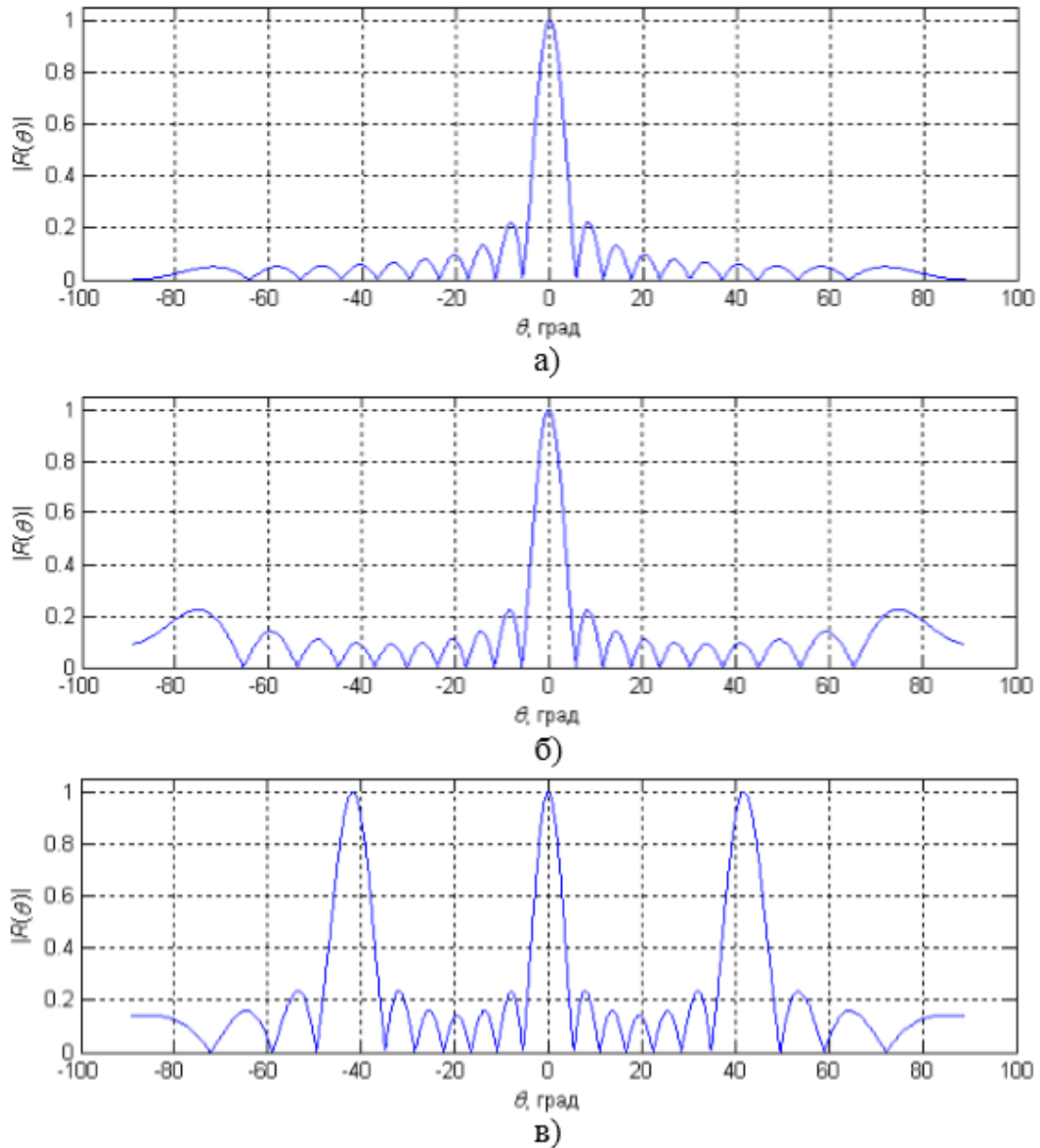


Рис. 5.20. ДН ФАР при різних співвідношеннях $d/\lambda_{\text{ок}}$: а) $d = \lambda_{\text{ок}}/2$; б) $d = 0,9\lambda_{\text{ок}}$; в) $d = 1,5\lambda_{\text{ок}}$

Таким чином, можна зауважити, що форма і рівні бічних пелюсток ДН ФАР залежать від співвідношення $d/\lambda_{\text{ок}}$: чим щільніше заповнена база, тим ближче форма і рівні бічних пелюсток до ДН монолітного перетворювача. При $d \geq \lambda_{\text{ок}}(n-1)/n$ мають

місце бічні максимуми; при $\lambda_{ок}/2 < d < \lambda_{ок}(n-1)/n$ бічні максимуми переходять у бічні пелюстки, а при $d < \lambda_{ок}/2$ – форма і рівні бічних пелюсток відповідають аналогічним в ДН прямокутного монолітного випромінювача. Тому на практиці крок решітки вибирають з наступної умови:

$$d = \frac{\lambda_{ок}}{2}.$$

Окремі елементи розподілених перетворювачів називаються малоапертурними перетворювачами. Основною відмінною їх властивістю є формування при випромінюванні (а, відповідно, і чутливість при прийомі) в тверде середовище декількох типів ультразвукових хвиль з широкою діаграмою направленості. На рис. 5.21 схематично відображені ДН різних типів хвиль, сформованих малоапертурним перетворювачем: поздовжньої (L), поперечної з вертикальною (щодо поверхні) поляризацією (SV) і поверхневої хвилі Релея (R). Діаграми симетричні щодо осі апертури.

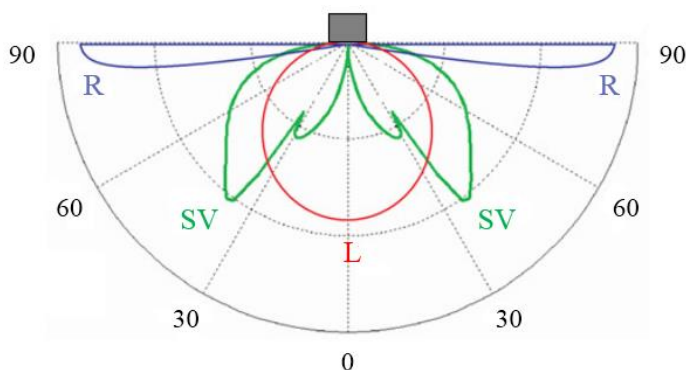


Рис. 5.21. Типи хвиль та діаграми направленості, що формуються одиночним малоапертурним перетворювачем

Якщо збільшувати ширину w окремого елемента, то зростає ефективність випромінювання поздовжньої хвилі, а відносний рівень поперечної хвилі та хвилі Релея падають, проте при цьому ДН поздовжньої хвилі звужується.

Розглянута властивість малоапертурних перетворювачів обмежує кути сканування ФАР, навантаженої на тверде середовище. У той же час, при навантаженні ФАР на біологічні середовища, які переважно складаються з рідини (води), поперечні хвилі малоапертурним перетворювачем не створюються (тому що в рідинах зсувні хвилі не поширюються). Тому кути сканування в даному випадку

можуть бути значно більшими. Це є однією з причин, чому ФАР знаходять значно більше застосування в медицині, ніж в промисловості для контролю твердих об'єктів.

Для фокусування або кутового відхилення акустичного пучка кожен п'єзoeлемент необхідно збуджувати з певною часовою затримкою, що змінюється від елемента до елемента (рис. 5.22). Зміна часових затримок (відносних фаз) між сигналами збудження, що подаються на окремі елементи ФАР, дає змогу керувати зміною напрямку введення променя, при цьому ефективне випромінювання антени підсилюється у заданому напрямку. Таким чином проводиться електронне сканування ОК, у результаті чого отримують двовимірне зображення.

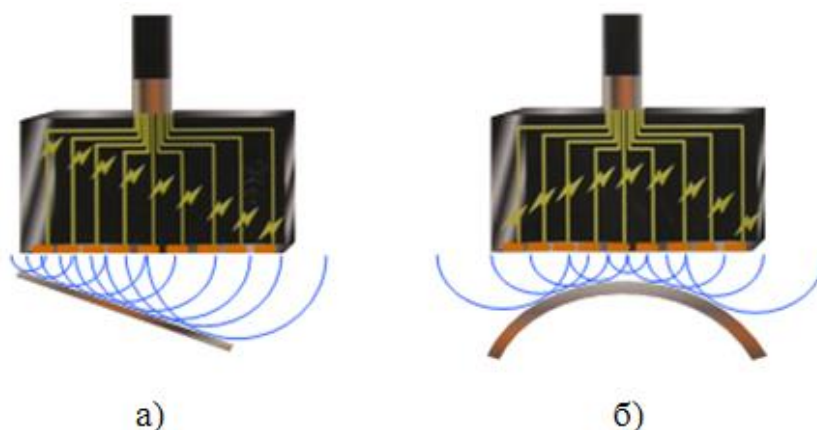


Рис. 5.22. Розподіл часових затримок (фазових зрушень) збуджуючих імпульсів для формування ультразвукових променів ФАР: а) відхиленого; б) сфокусованого

Для формування компенсованої ДН необхідно забезпечити затримку випромінювання сигналів між сусідніми елементами ФАР, що визначається як:

$$\Delta\tau = \frac{d}{C} \cdot \sin\theta_k ,$$

де θ_k – кут компенсації (відхилення акустичного променя).

Якщо скористатися порядком нумерації елементів решітки, як показано на рис. 5.23, то формула для розрахунку затримки на кожному окремому елементі буде наступною:

$$t_{Bi} = \Delta\tau \cdot (i - 1) ,$$

де $i=1 \dots n$.

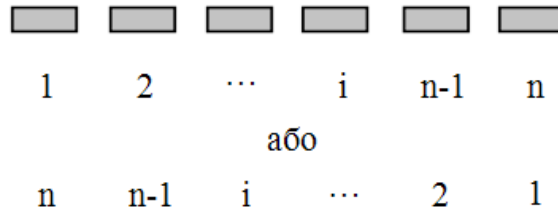


Рис. 5.23. Нумерація елементів при розрахунку затримок на відхилення і фокусування акустичного променя

Особливістю КМ та ФАР є можливість фокусування променя в заданій точці простору (рис. 5.22б). Це дає змогу покращити фронтальну роздільну здатність, яка є мінімальною відстанню між двома однаковими за розміром точковими дефектами, що залягають на однаковій глибині та можуть бути роздільно виявлені.

Для того ж порядку нумерації елементів, що представлений на рис. 5.23, загальна формула розрахунку затримок для фокусування визначається як:

$$t_{\phi i} = \begin{cases} \frac{d^2}{2F \cdot C} \cdot \left(\left(\frac{n}{2} \right)^2 - \left(\frac{n}{2} - i + 1 \right)^2 \right), & 1 < i \leq \frac{n}{2} \\ \frac{d^2}{2F \cdot C} \cdot \left(\left(\frac{n}{2} \right)^2 - \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 \right), & \frac{n}{2} < i \leq n \end{cases}, \quad (5.19)$$

де F – фокусна відстань.

Розрахунок затримок для фокусування зручно проводити з використанням порядку нумерації елементів решітки, що представлена на рис. 5.24 (при цьому затримки розраховуються тільки для однієї половини антени, для іншої вони будуть такі ж, але симетрично розвернуті):

$$t_j = \frac{d^2}{2F \cdot C} \cdot \left(\left(\frac{n}{2} \right)^2 - j^2 \right).$$

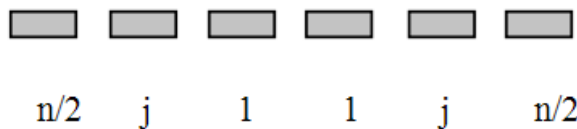


Рис. 5.24. Нумерація елементів при розрахунку затримок між сусідніми елементами решітки для фокусування

На рис. 5.25а наведені розраховані за формулою (5.19) затримки для фокусування променя на різних глибинах (15 мм, 30 мм та 60 мм) при наступних вихідних параметрах: робоча частота перетворювача $f=5$ МГц, середовище фокусування – вода (швидкість УЗК $C=1500$ м/с), період решітки $d=\lambda/2$, кількість елементів решітки $n=32$. На рис. 5.25б схематично показано характер акустичного поля при фокусуванні на заданих глибинах²⁶.

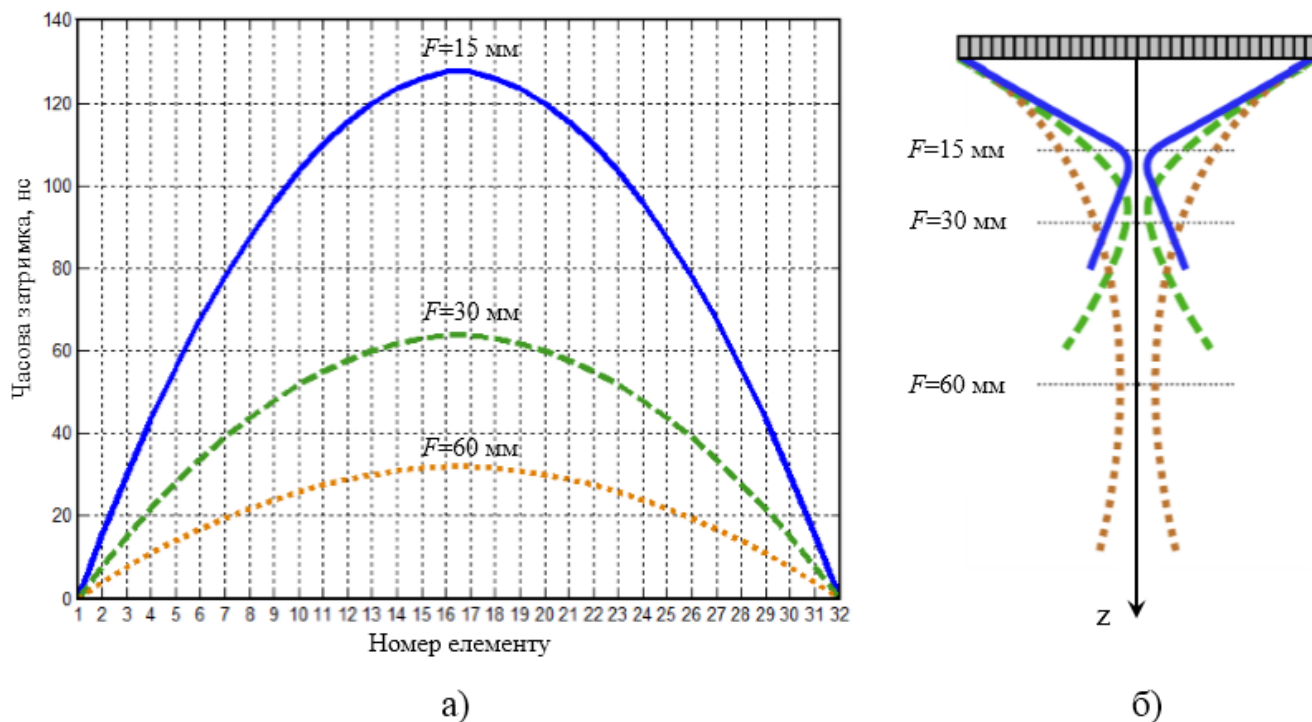


Рис. 5.25. Фокусування акустичного променя: а) часові затримки на елементах; б) характер акустичного поля при відповідних часових затримках

Зазвичай для проведення контролю певної області ОК використовують комбінацію наступних методів керування акустичним променем: лінійне сканування і фокусування або кутове сканування в поєднанні з фокусуванням.

Якщо необхідно забезпечити одночасно відхилення променя на заданий кут та фокусування, то загальна затримка на кожному окремому елементі визначається як:

$$t_{3i} = t_{Bi} + t_{\phi i}.$$

²⁶ Зауважимо, що при вказаних параметрах контролю (якщо вважати, що пасивна апертура дорівнює активній) глибина фокусування 60 мм знаходиться не в межах ближньої зони, а в перехідній зоні. Очевидно, що при цьому ефективність фокусування буде дещо меншою, ніж в ближній зоні. Проте в даному випадку інтерес становить сам графік часових затримок.

На рис. 5.26 наведено графіки зміни часових затримок на елементах ФАР для відхилення променя з фокусуванням та схематичне зображення форми акустичного поля при наступних параметрах контролю: робоча частота ПЕП $f=2,5$ МГц, середовище фокусування – сталь (швидкість УЗК $C=5900$ м/с), кут відхилення $\theta_k=20^\circ$, глибина фокусування $F_0=15$ мм, кількість елементів решітки $n=40$.

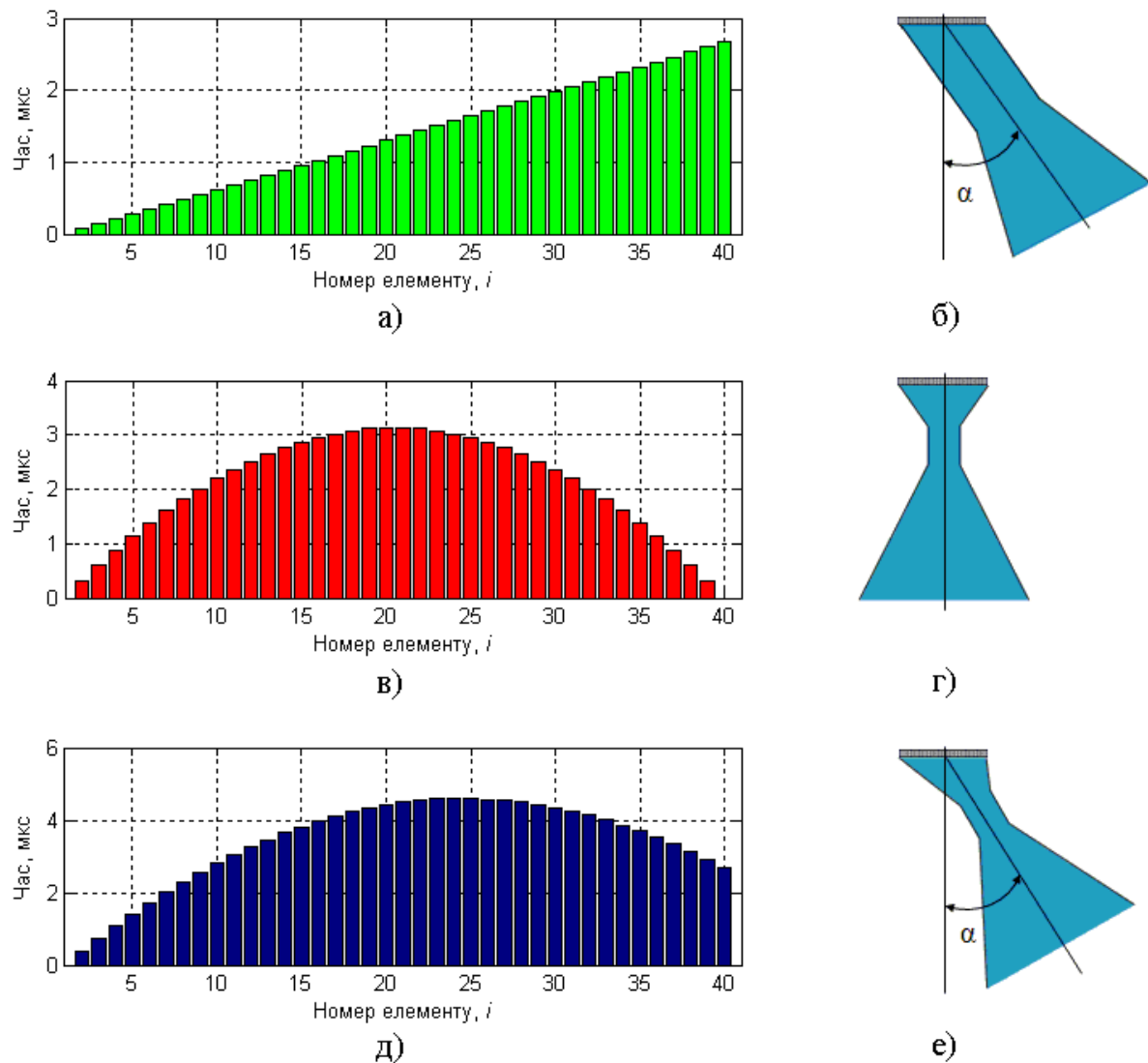


Рис. 5.26. Відхилення акустичного променя з одночасним фокусуванням: а) затримка для відхилення променя; б) схематичне зображення форми поля при відхиленні променя; в) затримка для фокусування променя; г) схематичне зображення форми поля при фокусуванні променя; д) сумарна затримка для відхилення променя із фокусуванням; е) схематичне зображення форми поля при відхиленні променя із фокусуванням

Хоча розрахунок конструктивних параметрів КМ (таких, як крок решітки, ширина та довжина окремого елемента) не відрізняється від відповідних

розрахунків для ФАР, основною відмінністю між цими типами перетворювачів є спосіб сканування об'єму ОК.

У випадку ФАР в одному циклі випромінювання-прийому УЗК беруть участь всі елементи решітки, причому за рахунок введення затримок між елементами досягається відхилення променя на заданий кут від нормалі та фокусування. У випадку ж використання КМ відхилення променя не відбувається, а лише фокусування. При цьому в одному циклі випромінювання-прийому УЗК бере участь лише деяка (визначена умовами контролю) активна група елементів із загальної їх кількості. Сканування об'єкту досягається переміщенням цієї групи в межах загальної апертури КМ. Тому найчастіше загальна кількість елементів КМ набагато перевищує кількість елементів ФАР, що обумовлює значно більші геометричні розміри КМ по довжині.

Різні підходи в скануванні ОК обумовлюють той факт, що ФАР бувають тільки лінійними, тоді як КМ можуть бути як лінійними, так і конвексними, і мікроконвексними (див. рис. 5.18).

Принципи комутації п'єзоелементів по групах і введення керованих ліній затримок можна застосовувати для формування необхідної діаграми направленості не тільки в режимі випромінювання, а також і в режимі прийому. Фактично, протягом часу прийому всієї послідовності луно-сигналів, отриманих у результаті випромінювання одиночного акустичного імпульсу, можна проводити безперервне регулювання ліній затримки так, щоб система в режимі прийому мала ДН із фокусуванням на заданій глибині в заданий момент часу. Таке сканування фокусом приймаючої системи дає змогу реєструвати з максимальною чутливістю луно-сигнали, віддзеркалені від локалізованих на різних глибинах структур. Цей спосіб називається «змінним» або «динамічним фокусуванням».

5.5. Класифікація ультразвукових перетворювачів

Перетворювачі для приладів неруйнівного контролю за способом введення УЗК ділять на:

- **контактні перетворювачі**, які притискаються до поверхні виробу, що попередньо змащена рідиною (маслом, гліцерином тощо); в деяких випадках шар рідини замінюють еластичним матеріалом (еластичним протектором);
- **імерсійні перетворювачі**, між поверхнею яких і виробом є товстий шар рідини (товщина цього шару у багато разів перевищує довжину хвилі); при цьому виріб цілком або частково занурюють у імерсійну ванну;
- **щілинні (меніскові) перетворювачі**, між поверхнею яких і виробом створюється зазор порядку довжини хвилі ультразвуку; рідина в зазорі утримується силами поверхневого натягу;
- **перетворювачі з сухим точковим контактом**, що мають кулясту поверхню, яка щільно дотикається до виробу, площа дотику $0,01 \div 0,5 \text{ мм}^2$;
- **безконтактні перетворювачі**, що збуджують акустичні коливання у виробі через шар повітря (повітряно-акустичний зв'язок).

За формою і типом п'єзоелемента перетворювачі діляться на:

- **монолітні** перетворювачі з п'єзопластиною плоскої форми;
- **фокусувальні** перетворювачі, що забезпечують звуження акустичного поля в деякій області ОК;
- **розподілені** лінійні або конвексні перетворювачі, що складаються з групи окремих елементів.

5.6. Конструкції ультразвукових перетворювачів

Найбільш широке застосування в ультразвуковій дефектоскопії отримали контактні перетворювачі. П'єзоперетворювачі, призначені для введення хвилі у напрямку, перпендикулярному поверхні, називають прямими, або нормальними, а для введення під деяким кутом – похилими, або призматичними. П'єзоперетворювачі включаються за роздільною, суміщеною або роздільно-суміщеною схемами. В останньому випадку в одному корпусі розміщуються два п'єзоперетворювача, розділених між собою екраном. Конструкції основних типів перетворювачів наведені на рис. 5.27. П'єзопластина 1 в контактному прямому

суміщеному перетворювачі (рис. 5.27а) приклеєна або притиснута з одного боку до демпфера 2, з іншого – до протектору 3. П'єзопластину, демпфер і протектор, склеєні між собою, розміщують в корпусі 6. За допомогою виводів 7 п'єзопластину з'єднують з електронним блоком дефектоскопа. Контактна рідина 4 забезпечує передачу пружних коливань ультразвукової частоти від перетворювача до ОК 5 та навпаки.

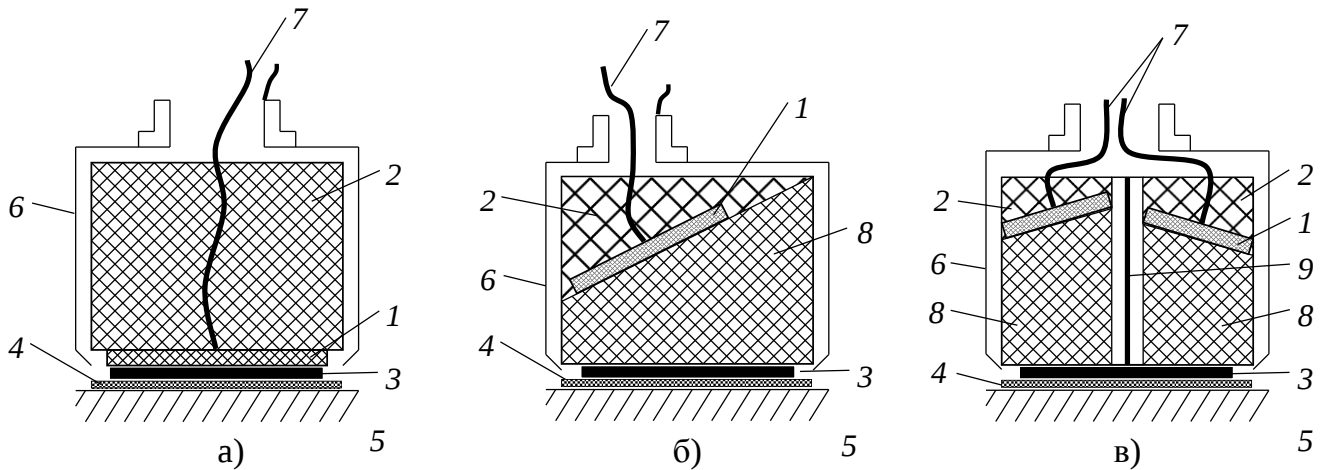


Рис. 5.27. Типи конструкцій ультразвукових датчиків:

а) прямий; б) похилий; в) роздільно-суміщений

Прямі перетворювачі призначені для збудження поздовжніх хвиль. У контактних похилих суміщених перетворювачах (рис. 5.27б) для введення ультразвукових коливань під кутом до поверхні ОК застосовують призму 8. Ці перетворювачі призначені для збудження в основному зсувних (поперечних) і поверхневих хвиль. Конструкція контактних роздільно-суміщених перетворювачів (рис. 5.27в) містить дві призми 8 з приклеєними до них п'єзопластинами 1, які розділені електроакустичним екраном 9. Електроакустичний екран служить для запобігання прямої передачі сигналів від випромінюючої п'єзопластини, яка підключена до генератора, до приймаючої п'єзопластини, яка підключена до підсилювача електронного блоку дефектоскопа.

Протектор використовується для захисту п'єзопластини від механічних пошкоджень і дії контактної рідини, узгодження матеріалу п'єзопластини із матеріалом ОК та поліпшення акустичного контакту при контролі контактним способом. Для перетворювачів контактного типу протектор повинен виготовлятися

із матеріалу з високою корозійною та ерозійною стійкістю. Для імерсійних, похилих перетворювачів і перетворювачів із затримкою протектор додатково служить акустичним трансформатором між активним п'єзоелементом з високим акустичним імпедансом і водою, похилою призмою або лінією затримки, які зазвичай мають значно менший акустичний імпеданс. Ця умова виконується шляхом забезпечення заданої товщини протектора, що дорівнює $1/4$ довжини ультразвукової хвилі, та підбором відповідного значення його акустичного імпедансу (див. розділ 3.2).

Демпфер застосовується для ослаблення вільних коливань п'єзопластики, управління добротністю перетворювача і захисту п'єзопластики від механічних пошкоджень. Матеріал і форма демпфера повинні забезпечувати достатнє згасання і відведення коливань, випромінених п'єзопластиною в матеріал демпфера без повернення їх до пластики.

Використання демпфера призводить до зменшення тривалості власних коливань ПЕП після його збудження ударним імпульсом. Підбором матеріалу демпфера можна керувати акустичною (механічною) добротністю п'єзопластики, а отже, і смугою пропускання сигналу. Для навантаженої п'єзопластики (з одного боку демпфером, а з іншого ОК без проміжних шарів) добротність розраховується за формулою:

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{z_{\text{пеп}}}{z_{\text{д}} + z_{\text{ок}}} , \quad (5.20)$$

де $z_{\text{пеп}}$ – акустичний імпеданс ПЕП, $z_{\text{д}}$ – імпеданс демпфера, $z_{\text{ок}}$ – імпеданс ОК.

Із формули (5.20) випливає, що демпфер завжди знижує добротність ПЕП. Чим нижча добротність датчика, тим він стає більш широкосмуговим, що дає змогу випромінювати і приймати коротші імпульси. У такому випадку покращується променева роздільна здатність, проте з іншого боку, падає чутливість ПЕП. І навпаки, чим вища добротність, тим смуга пропускання датчика стає вузькою, що у свою чергу не дає змоги випромінювати і приймати короткі імпульси без спотворення, але при цьому зростає чутливість. Таким чином, підбір демпфера є завданням компромісним, при якому необхідно узгодити найліпші параметри

тривалості імпульса (а отже, роздільної здатності) та чутливості для заданих умов контролю.

Швидкість згасання вільних коливань ПЕП після завершення дії збуджуючого електричного або прийнятого ультразвукових імпульсів буде тим більшою, чим буде меншою різниця між імпедансами демпфера та п'єзопластини. Негативним наслідком використання демпфера є те, що не тільки в контрольоване середовище, але й в нього також випромінюються ультразвукові імпульси, які можуть багаторазово перевіддзеркалюватись в матеріалі демпфера і, відповідно, прийматись перетворювачем. Очевидно, що такі імпульси є паразитними. Тому, щоб позбутись їх впливу, матеріал демпфера повинен мати великий коефіцієнт згасання. Окрім того, для зменшення впливу паразитних імпульсів демпферу може надаватись спеціальна форма, наприклад, конусоподібна, яка виконує роль акустичної пастки.

Найчастіше як матеріал демпфера використовують різноманітні гетерогенні суміші, наприклад, епоксидну смолу, змішану з наповнювачем із дрібнодисперсного порошку вольфраму. Використання цих компонентів дає змогу в широких межах змінювати характеристичний імпеданс демпфера шляхом зміни вагового співвідношення смоли і вольфрамового порошку.

Використання демпферу призводить до розширення смуги пропускання ПЕП; це в свою чергу дає можливість випромінювати в ОК ультразвукові імпульси будь-якої необхідної форми, а також приймати ці імпульси без спотворення їх форми (частотного спектру), що підвищує надійність результатів вимірювання або контролю.

Окрім механічного демпфування для створення ширококутових ПЕП використовуються наступні підходи:

1. Розширення смуги пропускання при використанні звичайних півхвильових п'єзоелементів шляхом їх оптимального акустичного узгодження з середовищем, в яке вони випромінюють, електричного демпфування, використання коригуючих R , L , C -ланцюгів та ін.

2. Використання спеціальних електронних схем збудження півхвильових п'єзоелементів і схем включення їх в режимі прийому УЗК (компенсація вільних коливань п'єзоелементів, компенсація реактивної складової їх вхідного опору та ін.).

3. Використання п'єзоелементів спеціальної форми (наприклад, клиноподібних); використання п'єзокераміки спеціального складу і технологічної обробки п'єзоелементів (наприклад, використання високопористої п'єзокераміки); застосування нерезонансно збуджуваних п'єзоелементів (їх ще називають «товстими» п'єзоелементами) та ін.

Часто для узгодження з електронним блоком дефектоскопа всередині корпусу перетворювача розміщують трансформатор, котушку індуктивності, резистор, а іноді і попередній підсилювач.

Призма є важливим елементом похилого перетворювача, за допомогою якої забезпечується введення та прийом ультразвукових хвиль під необхідним кутом. Розміри та форма призми вибираються таким чином, щоб забезпечити відсутність перевіддзеркалених від граней призми імпульсів, оскільки вони можуть стати ревербераційних завад (рис. 5.28).

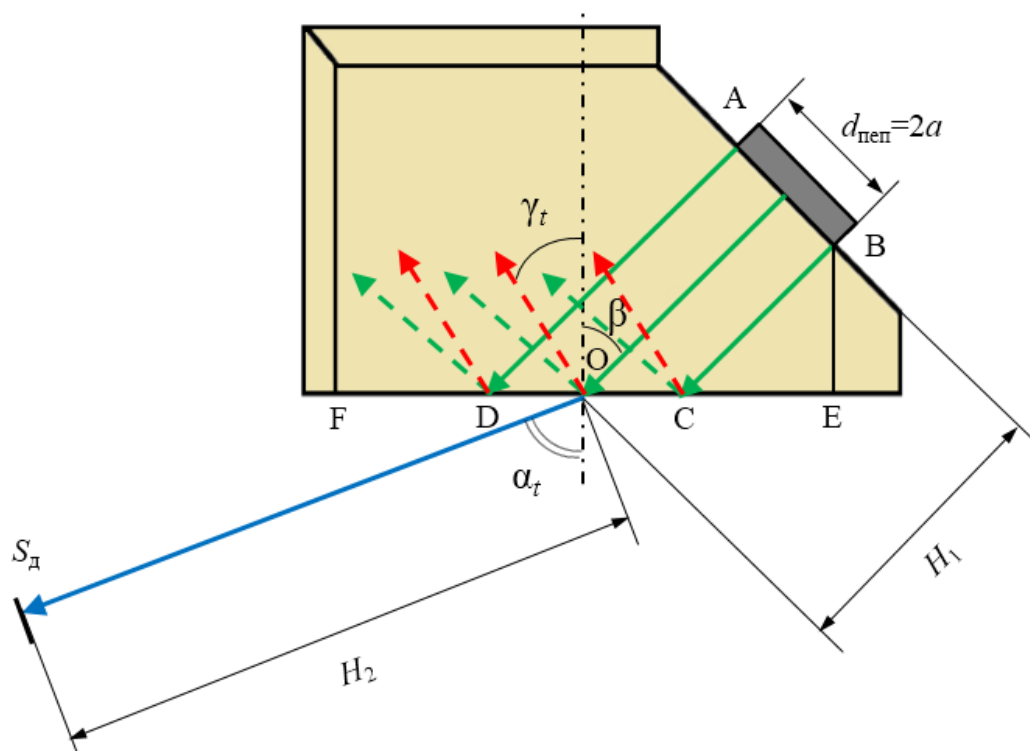


Рис. 5.28. Поширення звукового променя в призмі при похилому введенні

Віддзеркалена від межі призма-ОК поперечна складова променя ВС не повинна потрапляти на верхню частину п'єзопластини, а складова променя AD – на

ребро двогранного кута. У такому випадку повинні виконуватись умови (див. рис. 5.28):

$$BE > \frac{2a \cdot \cos \beta}{\operatorname{tg}(\beta + \gamma_t)},$$

$$OF > OD = \frac{a}{\cos \beta}.$$

Кут віддзеркалення поперечної хвилі в призмі розраховується як:

$$\beta_t = \arcsin \left(\frac{C_{\text{торг}}}{C_{\text{логр}}} \sin \beta \right).$$

Тоді шлях поширення променя в призмі H_1 :

$$H_1 > \frac{2a}{\operatorname{tg}(\beta + \gamma_t)} + a \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

При цьому шлях поширення променя в призмі повинен знаходитись в межах ближньої зони акустичного поля випромінювача.

Під час розробки призм враховують наступні моменти:

- матеріал призми повинен мати достатньо високий імпеданс для узгодження з п'єзоелементом з одного боку і ОК – з іншого;
- швидкість поширення ультразвукових коливань в призмі по відношенню до ОК повинна бути низькою для забезпечення критичних кутів;
- матеріал призми повинен забезпечувати достатнє поглинання ультразвуку для послаблення ревербераційних завад;
- призма повинна мати конструктивні особливості, що дають змогу зменшити коефіцієнт віддзеркалення ультразвуку від неробочих граней призми.

В ультразвуковій дефектоскопії як матеріал призми найбільшого поширення набуло органічне скло, яке має хороші акустичні властивості та змочуваність маслами і водою. Оргскло найбільш доступне і легко піддається механічній обробці.

Окрім оргскла можна використовувати такі полімерні матеріали, як капролон та полікарбонат, які за тих же швидкостей ультразвуку вигідно відрізняються від оргскла вищою зносостійкістю. Проте адгезія цих матеріалів до п'єзокераміки і

змочуваність контактними рідинами помітно гірші, ніж в оргскла.

На підвищених частотах, коли потрібне зменшення коефіцієнта згасання, але, як і раніше, необхідна порівняно мала швидкість звуку, можна використовувати поліамідоїмід або полістирол. Останнім часом значного поширення для виготовлення призм набув полістирол марки Rexolite® 1422, який має низьке згасання (в 2-4 рази менше, ніж в оргскла) і низьку швидкість ультразвуку 2350 м/с. Такі характеристики Rexolite® 1422 дозволяють створювати датчики з меншим кутом призми та меншими геометричними розмірами (меншою довжиною акустичного шляху променя в призмі). В основному Rexolite® 1422 застосовується для контролю на частотах вище 7,5 МГц. Недоліком цього матеріалу у порівнянні з оргсклом є нижча стійкість до стирання.

Тому що кут введення залежить від швидкості ультразвуку в призмі, остання повинна мати якомога менший коефіцієнт залежності швидкості від температури (в іншому випадку, значна зміна кута введення із-за зміни температури може призвести до пропуску дефектів).

При використанні похилого перетворювача необхідно враховувати наступні ефекти:

1. Поблизу критичних кутів спостерігається відхилення від закону Снеліуса, при цьому спотворюється поле в ОК. В результаті максимум щільності випромінювання в ОК і напрямку акустичної осі не збігаються. Розбіжність акустичної осі і центрального променя, що відповідає максимуму ДН, пояснюється лише тим, що при деяких значеннях кута падіння β , близьких до критичних, коефіцієнт прозорості межі поділу швидко змінюється. При проходженні через межу поділу менше послаблюються промені ДН, відповідні більшому значенню коефіцієнту прозорості. Відхилення експериментального значення кута заломлення (для центрального променя) від теоретичного (розрахованого за законом синусів) відбувається в бік кутів, для яких значення коефіцієнту прозорості більше. Збільшення хвильового розміру п'єзопластини призводить до звуження ДН в призмі і ослаблення описаного ефекту. Збільшення кута призми, у свою чергу, призводить до посилення цього ефекту.

2. У випадку, коли бічні пелюстки ДН досить великі, можливе погіршення чутливості контролю за рахунок виникнення додаткових шумів. Причиною їх виникнення є віддзеркалення променів бічних пелюсток від різних перешкод в ОК: дефектів, стінок, дна тощо. Як наслідок, виникають помилкові сигнали, що заважають проведенню контролю. Для зменшення впливу цього ефекту застосовують демпфування.

3. При введенні під кутом виникає деформація ДН. Ефект виявляється тим сильніше, чим менше добуток af (де f – частота, a – радіус п'єзопластини). Якщо в загальному випадку ДН вузька, то ефект деформації діаграми буде слабо виражений. Для широких діаграм цей ефект виражений більш яскраво.

На рис. 5.29 наведено фотографії датчиків, що використовуються для проведення неруйнівного контролю.



Рис. 5.29. Ультразвукові датчики для неруйнівного контролю:

а) прямий контактний суміщений; б) прямий контактний роздільно-суміщений; в) похилий контактний суміщений

На рис. 5.30 наведено фотографії антенних решіток, що використовуються для контролю технічних та біологічних об'єктів.



Рис. 5.30. Ультразвукові антенні решітки:

а) для технічного застосування; б) для медичного застосування

5.7. Приклади розв'язку задач

Приклад 5.1. Поле на осі круглого п'єзоперетворювача радіусом a , який розміщено в нескінченно плоскому нерухомому екрані та який здійснює гармонійні коливання, створюючи початковий тиск амплітудою P_0 , описується рівнянням (5.2). Визначити положення нулів та максимумів тиску на акустичній осі перетворювача, координату найвіддаленішого максимуму та поведінку амплітуди на великих відстанях (див. рис. 5.3).

Розв'язок:

Відстані, на яких тиск P перетворюється в нуль, визначаються з умови:

$$\sqrt{z^2 + a^2} - z = \frac{2\pi m}{k} = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad m=1, 2, 3, \dots$$

Фізичний зміст цього виразу полягає в наступному: різниця ходу двох променів, які йдуть в точку спостереження від краю поршня і від його центру, рівна

парній кількості півхвиль. Це свідчить про те, що на випромінювачі укладається парна кількість $(2m)$ зон Френеля.

Положення максимумів визначається аналогічно:

$$\sqrt{z^2 + a^2} - z = (2m+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Вони формуються в точках на осі, для яких на випромінювачі укладається непарна кількість $(2m+1)$ зон Френеля. Найвіддаленіший максимум (при $m=0$) знаходиться на відстані:

$$\sqrt{z^2 + a^2} - z = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow (z^2 + a^2) = \left(z + \frac{\lambda}{2}\right)^2 \Rightarrow z^2 + a^2 = z^2 + z\lambda + \frac{\lambda^2}{4}.$$

Звідки:

$$z = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \approx \frac{a^2}{\lambda}.$$

Ця величина називається межею ближньої зони. Для визначення поведінки амплітуди на великих відстанях, тобто в дальній зоні, враховуватимемо, що $z \gg a^2/\lambda$. Це дає змогу спростити вираз під знаком функції синуса, використовуючи розклад в степеневий ряд Тейлора. Степеневі ряди дають можливість замінити задану функцію приблизно рівною їй сумою деякої кількості перших членів ряду, тобто многочленом. Важливою умовою є те, щоби ряд збігався.

Для заміни функцій використовують біноміальні ряди, що мають вигляд:

$$(1+x)^n = 1 + \frac{n}{1!}x + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \dots$$

Такий ряд має інтервал збіжності $-1 < x < 1$.

Окремим випадком біноміального ряду є:

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1 \cdot 1}{2 \cdot 4}x^2 + \frac{1 \cdot 1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 - \frac{1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8}x^4 + \dots$$

Розкладемо вираз $(z^2 + a^2)^{1/2}$ в біноміальний ряд, винісши попередньо за знак кореня z :

$$\sqrt{z^2 + a^2} = z \cdot \sqrt{1 + \frac{a^2}{z^2}} = z \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{a^2}{z^2} - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{a^2}{z^2}\right)^2 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{a^2}{z^2}\right)^3 - \dots \right).$$

Отриманий ряд матиме збіжність, тому що $0 < a^2/z^2 < 1$. Враховуючи, що $a \ll z$, третій та наступні члени ряду можна відкинути, тому що вони матимуть значно вищий порядок малості в порівнянні з другим членом ряду. В результаті всіх спрощень отримаємо:

$$\sqrt{z^2 + a^2} \approx z \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{a^2}{z^2} \right) \approx z + \frac{a^2}{2z}.$$

Тоді в дальній зоні тиск визначатиметься за формулою:

$$P = 2P_0 \cdot \sin \left(\frac{k}{2} \left(z + \frac{a^2}{2z} - z \right) \right) = 2P_0 \cdot \sin \left(\frac{k \cdot a^2}{4 \cdot z} \right).$$

Враховуючи, що при малих значеннях аргументу функція синус практично дорівнює своєму аргументу, отримаємо:

$$P = 2P_0 \cdot \left(\frac{k \cdot a^2}{4 \cdot z} \right) = P_0 \cdot \left(\frac{k \cdot a^2}{2 \cdot z} \right) = P_0 \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{\lambda \cdot z}.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що амплітуда акустичного тиску на значному віддаленні від випромінювача зменшується з відстанню без осциляцій за законом z^{-1} , що відповідає сферичній хвилі, яка розходиться.

Відповідь: положення нулів $\left(z^2 + a^2 \right)^{\frac{1}{2}} - z = 2m \frac{\lambda}{2}$, положення максимумів

$$\left(z^2 + a^2 \right)^{\frac{1}{2}} - z = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ положення найвіддаленішого максимуму } z = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4},$$

амплітуда на великих відстанях змінюється за законом z^{-1} .

Приклад 5.2. Визначити робочу частоту п'єзоперетворювача з ЦТС-19, товщина якого 0,66 мм. Швидкість УЗК в матеріалі ПЕП $C_{\text{цтс}} = 3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Розв'язок:

Скористаємось формулою (5.1), виразивши частоту f :

$$f = \frac{C_{\text{цтс}}}{2h} = \frac{3300}{2 \cdot 0,66 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \text{ МГц.}$$

Відповідь: $f = 2,5$ МГц.

Приклад 5.3. Перетворювач із ЦТС-19 розмірами $20 \times 15 \times 0,66$ мм ($2a \times 2b \times h$) випромінює УЗК в сталь. Визначити межі зон випромінювання. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{ст}=6 \cdot 10^3$ м/с, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Розв’язок:

Розрахуємо співвідношення сторін перетворювача:

$$\frac{b}{a} = \frac{7,5}{10} = 0,75.$$

В табл. 5.1 знаходимо коефіцієнт зв’язку $k_{зв}$ для розрахованого співвідношення сторін. Враховуючи, що в табл. 5.1 є значення коефіцієнту для співвідношень сторін 0,7 та 0,8, тому для співвідношення 0,75 знаходимо потрібне значення $k_{зв}$ із використанням лінійної інтерполяції. Тоді $k_{зв}=1,12$.

Розрахуємо довжину хвилі в середовищі, використовуючи формули (2.1) та (5.1):

$$\lambda_{ст} = 2h \cdot \frac{C_{ст}}{C_{цтс}} = 2,4 \text{ мм.}$$

Глибину ближньої зони розрахуємо за формулою (5.8):

$$r_{бл} = k_{зв} \frac{a^2}{\lambda_{ст}} = 1,12 \frac{10^2}{2,4} = 46,67 \text{ мм.}$$

Початок дальньої зони розрахуємо із умови $r_d > 3r_{бл}$:

$$r_d = 3 \cdot r_{бл} \approx 140 \text{ мм.}$$

Відповідь: $r_{бл}=46,67$ мм, $r_d \approx 140$ мм.

Приклад 5.4. Розрахувати довжину ближньої зони $r_{бл}$ дискового п’єзоперетворювача діаметром $2a=8$ мм на частоті $f=5$ МГц при випромінюванні у сталь з середньою швидкістю поширення УЗК $C_{ст}=5920$ м/с. Визначити відносну зміну акустичного тиску поля випромінювання на глибині $H=140$ мм для точки, що зміщена на $l=15$ мм відносно акустичної осі.

Розв’язок:

Довжину хвилі розрахуємо за формулою (2.1):

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{C_{\text{ст}}}{f} = \frac{5920}{5 \cdot 10^6} = 1,18 \text{ мм.}$$

Глибину ближньої зони розрахуємо за формулою (5.3):

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{4^2}{1,18} \approx 13,6 \text{ мм.}$$

Враховуючи, що $3r_{\text{бл}} < H$, то можна стверджувати, що глибина H знаходиться в дальній зоні. Визначимо кут θ_x для зміщеної точки:

$$\theta_x = \arctg \frac{l}{H} \approx 6,1^\circ.$$

Упевнимся, що зміщена точка прийому знаходиться у межах кута розхилу головної пелюстки:

$$\theta_0 = \arcsin \left(0,61 \frac{\lambda_{\text{ст}}}{a} \right) \approx 10,4^\circ$$

Отже, умова $\theta_x < \theta_0$ виконується.

Для розрахунку відносної зміни акустичного тиску при зміщенні точки прийому від акустичної осі скористаємося формулою (5.6).

$$\begin{aligned} R(\theta) &= \exp \left(-0,14 (ka \sin \theta_x)^2 \right) = \exp \left(-0,14 \left(\frac{2\pi a}{\lambda_{\text{ст}}} \cdot \sin \theta_x \right)^2 \right) = \\ &= \exp \left(-0,14 \left(\frac{6,28 \cdot 4}{1,18} \cdot \sin 6,1^\circ \right)^2 \right) = 0,49 \end{aligned}$$

Відповідь: Акустичний тиск у зміщеній точці складе 49% від максимального.

5.8. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 5.1. До горизонтальних граней вертикально поляризованого куба п'єзоматеріалу підводять електричну напругу величиною $U=1$ кВ. На скільки при цьому зміниться висота куба, якщо п'єзомодуль п'єзоматеріалу дорівнює $d=2 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н? Вивести розмірності.

Відповідь: $\Delta h=0,2$ мкм.

Задача 5.2. Розрахувати максимально допустиму електричну напругу, яку можна подати на п'єзоперетворювач з ЦТС-19, що має робочу частоту випромінювання 5 МГц. Швидкість УЗК в матеріалі ПЕП $C_{\text{цтс}}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $U_{\text{max}}=297$ В.

Задача 5.3. Розрахувати акустичну добротність п'єзоперетворювача, навантаженого на воду. Як зміниться добротність, якщо перетворювач буде навантажений на сталь? Імпеданси матеріалів: демпфера $z_d=6 \cdot 10^6$ Па·с/м, води $z_v=1,5 \cdot 10^6$ Па·с/м, сталі $z_{\text{ст}}=46 \cdot 10^6$ Па·с/м, п'єзоперетворювача $z_{\text{пеп}}=24 \cdot 10^6$ Па·с/м.

Відповідь: $Q_v=5$, $Q_{\text{ст}}=0,73$.

Задача 5.4. Розрахувати смугу частот акустичного п'єзоперетворювача на рівні -3 дБ, якщо резонансна частота $f_p=1,2$ МГц, а добротність $Q=50$. Чи зміниться добротність п'єзоперетворювача з того ж матеріалу, але виготовленого на частоту 2,5 МГц? Як зміниться смуга частот на резонансній характеристиці?

Відповідь: добротність не зміниться, абсолютне значення смуги частот збільшиться в 2,08 рази.

Задача 5.5. Розрахувати відстань, з якої починається дальня зона поля випромінювання в сталі, якщо розміри перетворювача з ЦТС-19 складають $\varnothing 10 \times 2$ мм. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{ст}}=5900$ м/с, $C_{\text{цтс}}=3500$ м/с.

Відповідь: $r_d \approx 11,1$ мм.

Задача 5.6. Два однакових за діаметром прямих ультразвукових перетворювача випромінюють хвилі: перший – в сталь зі швидкістю ультразвуку $C_1=6 \cdot 10^3$ м/с, а другий – у воду зі швидкістю ультразвуку $C_2=1,5 \cdot 10^3$ м/с. При цьому глибини ближніх зон у них однакові. Яке співвідношення будуть мати частоти випромінювання f_1 та f_2 ?

Відповідь: $f_1/f_2=4$.

Задача 5.7. Радіус та товщина п'єзопластини ультразвукового перетворювача одночасно збільшились в 2 рази. Як при цьому зміниться глибина ближньої зони?

Відповідь: $r_{\text{бл2}}/r_{\text{бл1}}=2$.

Задача 5.8. Як зміниться положення ближньої зони поля випромінювання, якщо при незмінній товщині перетворювача перейти з випромінювання в сталь на випромінювання у воду, зменшивши при цьому діаметр перетворювача вдвічі? Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{ст}}=6 \cdot 10^3$ м/с, $C_{\text{в}}=1,5 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: не зміниться.

Задача 5.9. Розрахувати положення останнього мінімуму (нульове значення) тиску на акустичній осі дискового перетворювача з ЦТС-19 при випромінюванні у сталь. Розміри ПЕП $\varnothing 10 \times 0,7$ мм. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{ст}}=5900$ м/с, $C_{\text{цтс}}=3300$ м/с.

Відповідь: $r_{\text{min}}=3,75$ мм.

Задача 5.10. Визначити хвильовий розмір дискового п'єзоперетворювача із ЦТС-19, якщо його лінійні розміри $\varnothing 16 \times 0,6$ мм. Випромінювання відбувається у сталь. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{ст}}=6 \cdot 10^3$ м/с, $C_{\text{цтс}}=3,6 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $L=8$.

Задача 5.11. Випромінювання відбувається в сталь з середньою швидкістю поширення ультразвуку $C_{\text{ст}}=6 \cdot 10^3$ м/с при нормальному введенні коливань на частоті 1,22 МГц. При цьому розхил головної пелюстки ДН становить $2\theta_0=60^\circ$. Визначити діаметр дискового п'єзоперетворювача.

Відповідь: $D=12$ мм.

Задача 5.12. Розрахувати розміри дискового перетворювача з ЦТС-19, якщо випромінювання відбувається в сталь при нормальному введенні на частоті 5 МГц, а розхил головної пелюстки ДН становить $2\theta_0=20^\circ$. Швидкості ультразвуку в

середовищах: $C_{ст}=5,9 \cdot 10^3$ м/с, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $D=8,3$ мм, $h=0,33$ мм.

Задача 5.13. Визначити ширину акустичного пучка поля випромінювання круглого ПЕП діаметром $\varnothing 10$ мм в дальній зоні на глибині $H=100$ мм на рівні -6 дБ та -3 дБ. Робоча частота ПЕП $f=5$ МГц. Випромінювання відбувається в алюміній, в якому швидкість ультразвуку становить $C_{ал}=6,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $B_{07}=12,61$ мм, $B_{05}=17,71$ мм.

Задача 5.14. Визначити розхили головних пелюсток ($2\theta_0$) діаграм направленості прямокутного перетворювача із ЦТС-19 розмірами $16 \times 10 \times 0,33$ мм при випромінюванні в сталь в кожній із площин (вертикальній та горизонтальній). Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{ст}=6 \cdot 10^3$ м/с, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $2\theta_{0x}=8,6^\circ$, $2\theta_{0y}=13,8^\circ$.

Задача 5.15. Визначити кількість повних бокових пелюсток в будь-якій площині діаграми направленості квадратного випромінювача з ЦТС-19 розмірами $5 \times 5 \times 0,66$ мм. Випромінювання відбувається у воду. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{в}=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $n=7$.

Задача 5.16. Визначити розміри дискового перетворювача із ЦТС-19, що випромінює у воду на частоті 2,5 МГц і має в ДН тільки одну головну пелюстку. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{в}=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $D=0,73$ мм, $h=0,66$ мм.

Задача 5.17. Радіус та товщина п'єзопластини ультразвукового перетворювача одночасно збільшились в 2 рази. Як при цьому зміниться кут розхилу головної пелюстки θ_0 .

Відповідь: не зміниться.

Задача 5.18. Визначити відносну зміну акустичного тиску в дальній зоні поля випромінювання круглого ПЕП розмірами $\varnothing 12 \times 0,66$ мм для точки, що зміщена на 4° відносно акустичної осі. Матеріалом ОК є латунь із середньою швидкістю ультразвуку $C_{\text{лат}}=4500$ м/с. Швидкість ультразвуку в матеріалі ПЕП $C_{\text{цтс}}=3300$ м/с.

Відповідь: $R(\theta)=0,74$.

Задача 5.19. Нарисувати ДН у вертикальній та горизонтальній площинах випромінювача з ЦТС-19 розмірами $10 \times 4 \times 0,5$ мм при випромінюванні в сталь. Кут огляду θ взяти в межах від -90° до $+90^\circ$. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{цтс}}=3300$ м/с, $C_{\text{ст}}=5800$ м/с.

Відповідь: діаграму будувати з використанням формул (5.9) та (5.10).

Задача 5.20. Радіус акустичної лінзи рефрактора дорівнює 5 мм. Швидкість ультразвуку в матеріалі лінзи $C_{\text{л}}=4000$ м/с. Випромінювання відбувається у воду, де швидкість ультразвуку $C_{\text{в}}=1500$ м/с. Визначити фокусну відстань рефрактора.

Відповідь: $F=8$ мм.

Задача 5.21. Рефрактор, що призначений для фокусування ультразвуку у воді, має лінзу із кварцевого скла, радіус кривизни якої 1 см, а апертурний кут $\psi_{\text{max}}=30^\circ$. Розрахувати фокусну відстань рефрактора та визначити, на яких робочих частотах він спроможний фокусувати акустичний промінь. Швидкості УЗК в середовищах: $C_{\text{в}}=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $C_{\text{кв}}=6 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $F=13,3$ мм, $f > 451,1$ кГц.

Задача 5.22. Ультразвуковий концентратор сферичної форми, радіус кривизни якого $R=20$ мм, а кут розхилу $\psi=25^\circ$, випромінює у воду на частоті 2,5 МГц. Розрахувати коефіцієнт підсилення по тиску K_F в фокусі та діаметр фокальної плями d_r . Швидкість поширення УЗК у воді $C_{\text{в}}=1500$ м/с.

Відповідь: $K_F=9,34$, $d_r=1,73$ мм.

Задача 5.23. Ультразвуковий концентратор радіусом $R=15$ мм випромінює у воду на частоті 5 МГц. Кут розхилу концентратору $\psi=20^\circ$. Розрахувати поперечну (фронтальну) роздільну здатність. Швидкість поширення УЗК у воді $C_v=1500$ м/с.

Відповідь: $\Delta d=0,535$ мм.

Задача 5.24. Рефрактор з лінзою із оргскла призначений для фокусування ультразвуку в гліцерині на частоті $f=3$ МГц. Радіус кривизни рефрактора $R=20$ мм, радіус випромінюючої пластини $a=7$ мм. Розрахувати фокусну відстань, коефіцієнт підсилення по тиску у фокусі та діаметр фокальної плями. Швидкості УЗК в середовищах: $C_{орг}=2800$ м/с, $C_{гл}=1920$ м/с. Втратами на згасання та віддзеркалення знехтувати.

Відповідь: $F=63,6$ мм, $K_F=1,9$, $d_r=7,1$ мм.

Задача 5.25. Діаметр зіниці фокусувальної системи становить 8 мм. Акустичний промінь фокусується у воді на глибині 20 мм. Перетворювач працює на частоті 10 МГц. Швидкість поширення ультразвуку у воді 1500 м/с. Розрахувати глибину фокальної зони та діаметр променя в точці фокусування на рівні -6 дБ.

Відповідь: $\Delta z_{-6дБ}=6,56$ мм, $\Delta d_{-6дБ}=0,38$ мм.

Задача 5.26. Розрахувати кути, при яких виникають бокові одиничні максимуми в ДН лінійної антенної решітки, що має крок $d=2,5\lambda$.

Відповідь: $\pm 23,6^\circ$, $\pm 53,1^\circ$.

Задача 5.27. Період ультразвукової лінійної фазованої антенної решітки дорівнює $\lambda/2$ на частоті 5 МГц. Розрахувати часову затримку зондувальних імпульсів між сусідніми елементами решітки для відхилення акустичного променя на 30° від нормалі.

Відповідь: $\Delta\tau=0,05$ мкс.

Задача 5.28. Розрахувати кількість елементів активної групи лінійної комутованої матриці з періодом $d=\lambda/2$ для формування в дальній зоні головної пелюстки з кутом розхилу $\theta_0=5^\circ$.

Відповідь: $n=23$.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, в чому полягає прямий та зворотний п'єзоелектричний ефект.
2. Що характеризує коефіцієнт електро механічного зв'язку?
3. Опишіть конструкції основних типів ультразвукових перетворювачів.
4. Який із основних конструктивних елементів похилого або роздільно-суміщеного перетворювача відсутній в прямому перетворювачі?
5. Поясніть, які вимоги висуваються до призм похилих ПЕП?
6. Поясніть, з якою метою в ультразвукових перетворювачах застосовують демпфер?
7. Докладно поясніть, які фактори впливають на параметри акустичного поля.
8. Наведіть класифікацію перетворювачів за способом введення УЗК в ОК.
9. Яка з нижченаведених товщин п'єзопластини із ЦТС-19 відповідає найбільшій частоті: 0,5 мм, 0,3 мм, 1 мм, 0,1 мм?
10. Чому на високих частотах (понад 100 МГц) не використовуються п'єзокерамічні перетворювачі?
11. Поясніть характерні особливості ближньої та дальньої зон акустичного поля ПЕП.
12. Поясніть, яким чином передається енергія з ближньої зони в дальню, якщо вздовж акустичної осі існують точки, в яких акустичний тиск має нульове значення.
13. За якими ознаками визначають хвилю як сферичну в дальній зоні?
14. Чим відрізняються діаграми направленості випромінювання у випадку збудження перетворювача довгим гармонічним сигналом, коротким радіоімпульсом або аперіодичним сигналом?
15. Поясніть, що характеризує діаграма направленості ПЕП.

16. Чим відрізняється акустичне поле круглого та прямокутного ПЕП?
17. За яких умов перетворювач можна розглядати як точковий.
18. Опишіть основні типи фокусувальних систем.
19. Чим обмежується діаметр фокальної плями (коло Ейрі) концентратора, рефрактора?
20. Чим відрізняється фазовий фокус від геометричного?
21. Чому фокусування в дальній зоні неефективне?
22. Від чого залежить глибина фокальної зони?
23. У чому полягають відмінності між комутованими матрицями та фазованими антенними решітками?
24. Яким чином виконується відхилення та фокусування променя в розподілених перетворювачах?
25. Як пояснити явище збільшення кута розхилу головної пелюстки ДН ФАР θ_0 при збільшенні кута компенсації θ_k ?
26. У чому полягає суть динамічного фокусування і як воно здійснюється у фазованих решітках і комутованих матрицях?
27. Чи може ФАР, що була розрахована для біологічних об'єктів, бути використаною для інтроскопії сталевого ОК?

6. РОЗРАХУНОК АКУСТИЧНИХ ТРАКТІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

6.1. Акустичні тракти прямих перетворювачів

Акустичним трактом називають шлях ультразвукового сигналу від випромінювача до дефекту або відбивача і далі до приймача коливань (випромінювач – протектор – контактна рідина – об’єкт контролю – дефект – об’єкт контролю – контактна рідина – протектор – приймач). В акустичному тракті можуть виникати такі ефекти: ослаблення в протекторі, віддзеркалення, заломлення, трансформація на межі ОК і на дефекті, згасання (поглинання, розсіяння) під час поширення ультразвуку в ОК.

Аналіз акустичного тракту в основному зводиться до складання його схеми та розрахунку звукових полів випромінювання-прийому. Основним результатом розрахунку акустичного тракту є *коефіцієнт ослаблення акустичного тракту*:

$$K_{a.t.} = \frac{P_{\pi}}{P_{\nu}},$$

де P_{π} і P_{ν} – акустичні тиски відповідно в приймаючому і випромінюючому перетворювачах, що виникають в процесі випромінювання-прийому.

Коефіцієнт акустичного тракту – числова величина, що розкривається через формулу акустичного тракту. Коефіцієнт акустичного тракту враховує променеву картину, характеристики направленості випромінювання-прийому і структурну схему акустичного тракту (акустичні характеристики і розміри середовищ, що перетинаються акустичним променем).

На амплітуду прийнятого сигналу впливають різні фактори: форма дефекту, його розміри, орієнтація дефекту в ОК. Розрахувати акустичний тракт означає визначити амплітуду корисного сигналу залежно від форми, розміру дефекту, розміру перетворювача, глибини залягання дефекту, акустичних властивостей матеріалу і частоти коливань.

6.1.1. Моделі трактів методів віддзеркалення (суміщені п'єзоперетворювачі)

Природні дефекти у виробі можуть мати різну форму (об'ємні, площинні), величину, орієнтацію (горизонтальну, вертикальну, під довільним кутом) і акустичні властивості, які заздалегідь невідомі. Тому при аналізі методів віддзеркалення формули акустичного тракту виводять для моделей дефектів у вигляді порожніх відбивачів простої форми: тонкого диска, сфери, циліндра, тонкої смуги, площини.

Фізична реалізація деяких моделей дефектів технологічно є дуже складною, тому при експериментах і виробничому контролі моделі дефектів замінюють штучними відбивачами: диск – плоскодонним отвором, сферу – отвором зі сферичною вершиною та ін. (див. табл. 6.1).

Таблиця 6.1. Моделі дефектів та їх фізична реалізація

Модель відбивача	Фізична реалізація відбивача	Тип дефекту, який моделюється
Сфера 	Отвір із сферичною вершиною	Локальний об'ємний
Диск 	Плоскодонний отвір	Локальний площинний
Циліндр 	Бічний циліндричний отвір	Протяжний об'ємний
Смужка 	Пропил з плоским дном	Протяжний площинний

Амплітуди луно-сигналів від моделей дефектів і штучних відбивачів мало відрізняються, коли їх розміри більше довжини хвилі ультразвуку. В іншому

випадку амплітуди луно-сигналів можуть не збігатися. Найбільшого поширення знайшов штучний дефект типу плоскодонного отвору, який задовільно моделює невеликі розшарування та тріщини. Бічний циліндричний отвір імітує протяжні шлакові включення та ланцюжки пор. Протяжна площина відповідає донному сигналу, за яким зручно виконувати налаштування, а також імітує протяжні розшарування. Циліндричну увігнуту поверхню використовують в стандартних зразках для отримання максимального луно-сигналу і визначення точки введення перетворювача.

Хоча остаточні розрахункові співвідношення коефіцієнта ослаблення акустичного тракту залежать від багатьох факторів: типу і форми дефекту, його розміру і положення в характеристиці направленості випромінювання, – проте можна виділити 4 базові моделі акустичних трактів методів віддзеркалення (рис. 6.1).

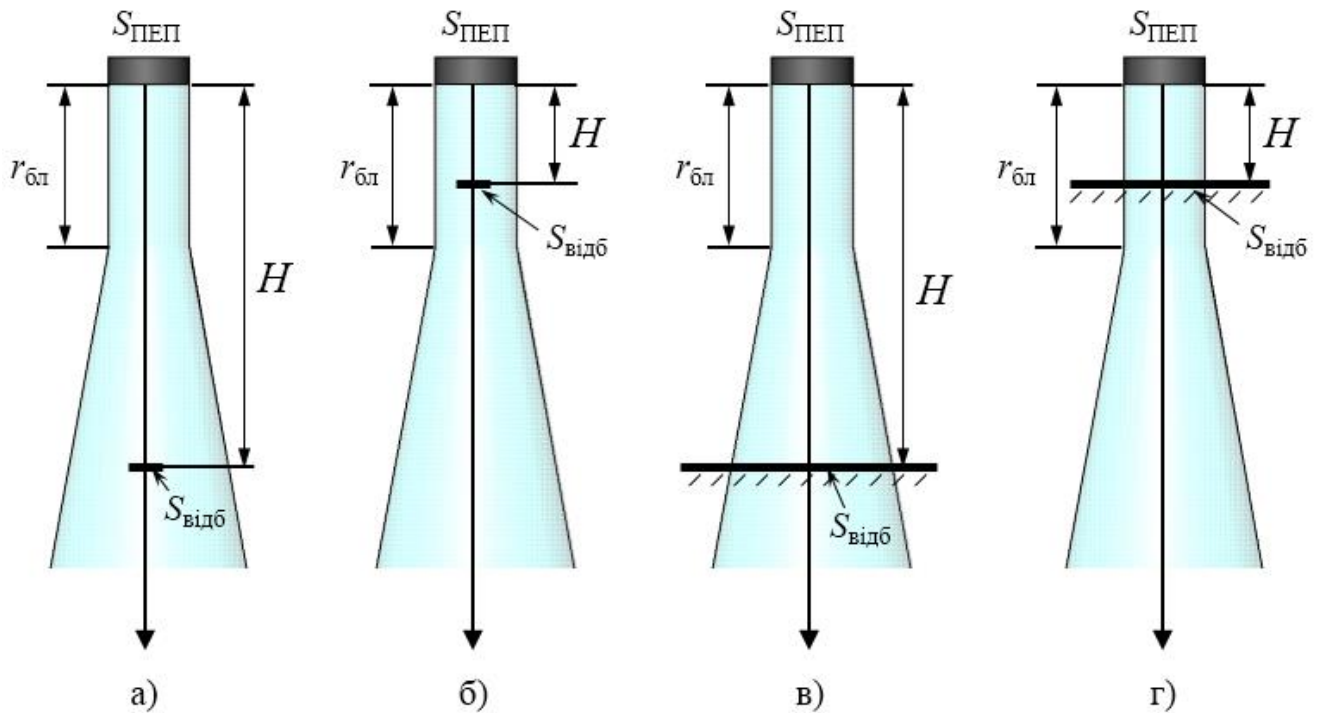


Рис. 6.1. Моделі для розрахунку акустичного тракту при нормальному введенні:

а) $r_{\text{бл}} < H$, $S_{\text{відб}} < S_{\text{пеп}}$; б) $r_{\text{бл}} > H$, $S_{\text{відб}} < S_{\text{пеп}}$; в) $r_{\text{бл}} < H$, $S_{\text{відб}} > S_{\text{пеп}}$; г) $r_{\text{бл}} > H$, $S_{\text{відб}} > S_{\text{пеп}}$, де $S_{\text{пеп}}$ – площа ПЕП, $S_{\text{відб}}$ – площа відбивача, $r_{\text{бл}}$ – глибина ближньої зони, H – глибина залягання відбивача

Таким чином, вибір базової моделі акустичного тракту залежить від зони, в якій проводиться контроль (ближня або дальня зона) і співвідношення площі

(геометричних характеристик) відбивача до площі ПЕП (площа відбивача або менша площі ПЕП, або значно більша).

В ультразвуковій дефектоскопії формули акустичного тракту отримані та добре досліджені для відбивачів простої геометричної форми. Щоб застосувати дані формули до дефектів (відбивачів) складнішої форми вводять поняття еквівалентного розміру дефекту.

Варто зазначити, що стабільний, добре відтворюваний зв'язок амплітуди луно-сигналу з відстанню до дефекту спостерігається при його прозвучуванні в дальній зоні акустичного поля перетворювача. У ближній зоні структура поля є дуже неоднорідною, тому для цієї зони коефіцієнти акустичних трактів виведені з урахуванням певних спрощень.

Спочатку розглянемо залежності коефіцієнтів акустичних трактів для дальньої зони. Нижченаведені формули акустичних трактів отримані шляхом вирішення задачі інтерференції поздовжніх хвиль при їх випромінюванні і віддзеркаленні від несучільностей різної форми. Вважається, що дефект знаходиться на акустичній осі ПЕП і орієнтований перпендикулярно до неї²⁷.

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є плоскодонний отвір у вигляді диску (рис. 6.2):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{д}} S_{\text{пеп}}}{\lambda^2 H^2} T_I R_p e^{-2H\delta_p}, \quad (6.1)$$

де $S_{\text{пеп}}$ – площа перетворювача, $S_{\text{д}}$ – площа диску, H – відстань від поверхні ПЕП до поверхні диску, λ – довжина хвилі в ОК, T_I – коефіцієнт проходження ультразвукового променя по інтенсивності через межу ПЕП-ОК, R_p – коефіцієнт віддзеркалення променя по акустичному тиску від поверхні диску, δ_p – коефіцієнт згасання поздовжньої хвилі в матеріалі ОК.

²⁷ Якщо дефект знаходиться не на акустичній осі, а зміщений відносно неї на певний кут, то в формулу для розрахунку акустичного тракту необхідно ввести множники, які враховують діаграму направленості ПЕП в режимі випромінювання-прийому $R^2(\theta)$ та залежність чутливості приймача від напрямку на відбивач $\chi(\theta)$. Це зауваження стосується тільки тих випадків, коли розраховується коефіцієнт акустичного тракту при дефектоскопії в дальній зоні акустичного поля. При цьому $R(\theta)=0..1$, $\chi(\theta)=0..1$. На акустичній осі $R(\theta)=1$.

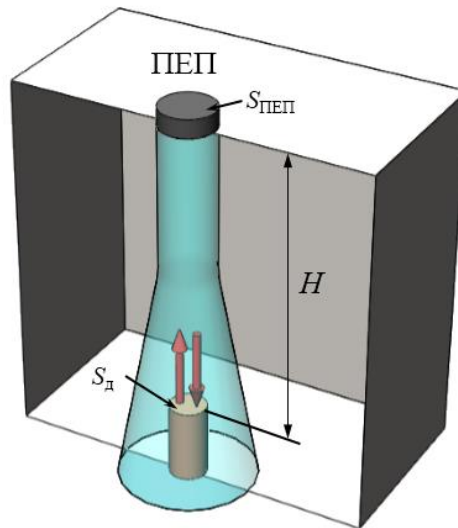


Рис. 6.2. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – плоскодонний дисковий отвір

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є сфера діаметром D (рис. 6.3):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}} D}{4\lambda H^2} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

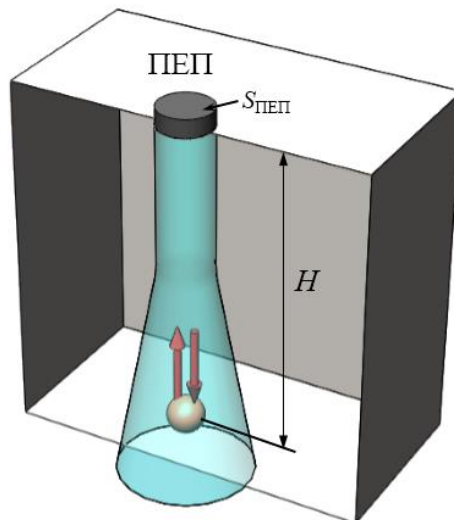


Рис. 6.3. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – сфера

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є циліндричний отвір, діаметр основи якого d , довжина l (рис. 6.4):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}} l}{4\lambda H^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

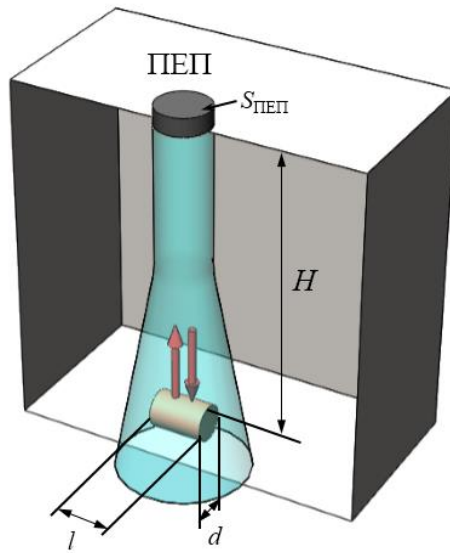


Рис. 6.4. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – циліндричний отвір малої протяжності

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є нескінченний циліндричний отвір, діаметр основи якого d (рис. 6.5):

$$K_{a.т.} = \frac{S_{\text{пеп}}}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8H^3}} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

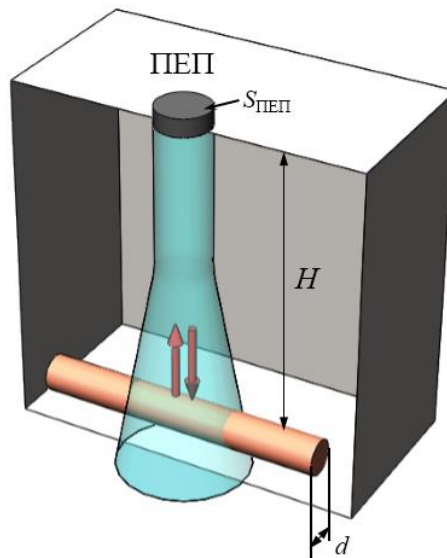


Рис. 6.5. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – циліндричний отвір нескінченної протяжності

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є нескінченна смуга шириною l (рис. 6.6):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}} l}{\sqrt{2(\lambda H)^3}} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

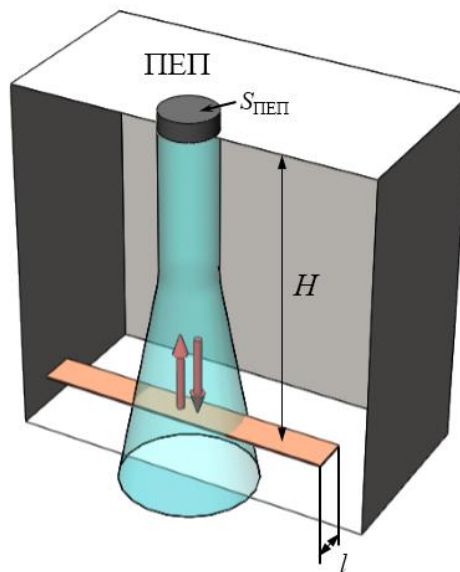


Рис. 6.6. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – смуга нескінченної довжини

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є донна поверхня (рис. 6.7):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}}}{2\lambda H} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

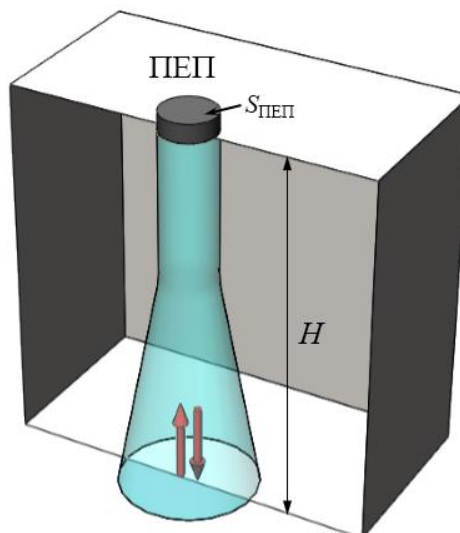


Рис. 6.7. Акустичний тракт прямого ПЕП в дальній зоні: відбивач – донна поверхня

Зауважимо, що у вищенаведених формулах акустичного тракту не враховується явище дифракції хвиль при випромінюванні, віддзеркаленні та прийманні. Ця обставина обмежує мінімальні розміри перетворювача та відбивача – вони повинні бути більшими $\lambda/2$.

Вищенаведені вирази є асимптотичними апроксимаціями, тобто вони отримані із умови, що відстань між ПЕП та відбивачем нескінченно велика в порівнянні з довжиною хвилі, розміром перетворювача і характерним розміром відбивача. Проте розрахунки за цими формулами мають достатню для практичних цілей точність.

Якщо розраховуються значення коефіцієнту акустичного тракту для відбивачів, що розташовані не на акустичній осі та орієнтовані не перпендикулярно акустичному променя, у вищенаведених формулах необхідно враховувати множники, що залежать від діаграми направленості і кута між акустичною віссю та напрямком на дефект з урахуванням його просторової орієнтації.

Відбивачі правильної геометричної форми з гладкою поверхнею, що розглянуті вище, називаються детермінованими відбивачами. Характеристики віддзеркаленого поля реального дефекту можна оцінити тільки з певною вірогідністю, що залежить від багатьох факторів. Тому в ультразвуковій дефектоскопії початкові розрахунки і налаштування проводять для детермінованих відбивачів, після чого корегують їх на основі ймовірнісних оцінок.

Тепер розглянемо залежності коефіцієнтів акустичних трактів для ближньої зони. Оскільки в цій зоні акустичного поля спостерігаються значні осциляції тиску як на осі перетворювача, так і поза її межами, то виведення формули коефіцієнту акустичного тракту є складною задачею навіть для відбивачів простої форми. Тому у даному випадку розглядають лише дві моделі акустичних трактів: коли відбивачами є плоскодонний отвір у вигляді диску або донна поверхня.

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є плоскодонний отвір у вигляді диску (рис. 6.8):

$$K_{a.т.} = 0,8 \frac{S_d}{\lambda H} T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

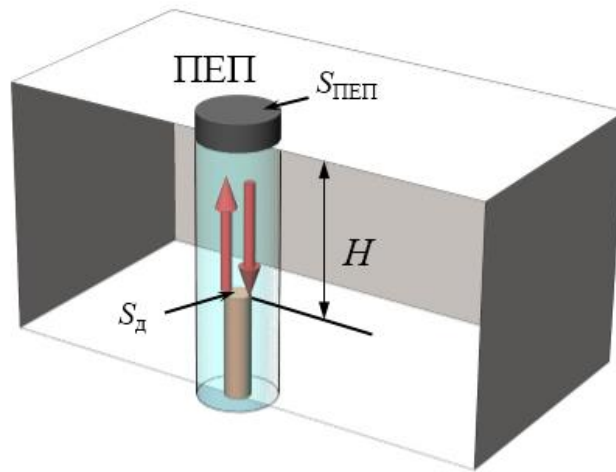


Рис. 6.8. Акустичний тракт прямого ПЕП в ближній зоні: відбивач – плоскодонний дисковий отвір

У цьому випадку також вважається, що дефект розташований на акустичній осі. Якщо дефект буде зміщеним відносно осі, але не виходитиме за межі трубки випромінювання, то необхідно використовувати множник, який враховує просторову неоднорідність акустичного поля в ближній зоні²⁸.

Коефіцієнт акустичного тракту для випадку, коли відбивачем є донна поверхня (рис. 6.9):

$$K_{\text{а.т.}} = 0,8 T_I R_p e^{-2H\delta_p}.$$

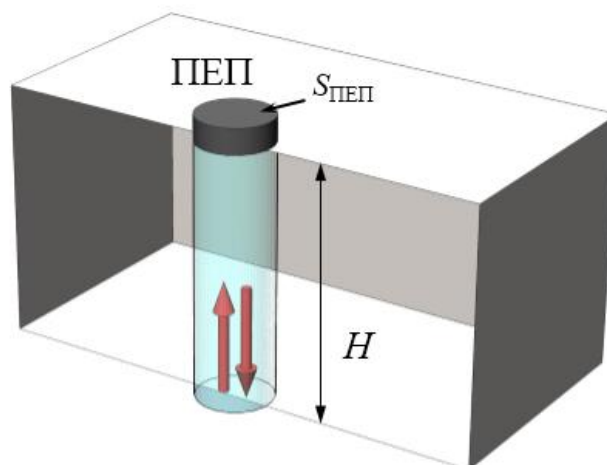


Рис. 6.9. Акустичний тракт прямого ПЕП в ближній зоні: відбивач – донна поверхня

²⁸ В даному випадку мова не йде про множник, який враховує характеристики ДН ПЕП в режимі випромінювання-прийому $R^2(\theta)$, адже розрахунки проводяться в ближній зоні, а ДН є характеристикою дальньої зони.

6.1.2. Моделі трактів методів проходження (роздільні п'єзоперетворювачі)

В даному розділі розглянемо декілька найбільш поширених та простих моделей трактів методів проходження. Для спрощення розрахунків оперуватимемо модульними значеннями акустичного тиску, а також вважатимемо, що дефект являє собою диск, який розташований на акустичній осі (тобто, $R(\theta)=1$) і перпендикулярний їй. При цьому припускається, що випромінювач та приймач повністю ідентичні як за геометричними характеристиками, так і фізико-механічними.

Якщо всі процеси випромінювання і приймання відбуваються в дальніх зонах (рис. 6.10), то коефіцієнт акустичного тракту розраховується за формулою:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}}}{\lambda_{\text{ок}} H} T_I e^{-H\delta_p} \left(1 - \frac{4S_d}{\lambda_{\text{ок}} H} (1 - T_{I_d}) \right), \quad (6.2)$$

де $S_{\text{пеп}}$ – площа випромінювача, S_d – площа дефекту, T_{I_d} – коефіцієнт прозорості дефекту, H – відстань між випромінювачем та приймачем.

Коефіцієнт прозорості T_{I_d} може приймати значення в межах від 0 до 1, причому для акустично непрозорого дефекту $T_{I_d}=0$, а для акустично прозорого $T_{I_d}=1$.

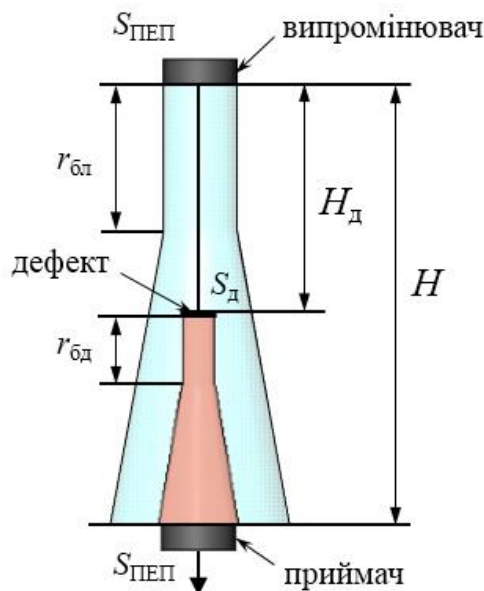


Рис. 6.10. Акустичний тракт методу проходження для випадку $H > r_{\text{бд}}$, $(H - H_d) > r_{\text{бд}}$, $S_d < S_{\text{пеп}}$:

$r_{\text{бд}}$ – ближня зона дефекту; H_d – глибина залягання дефекту

Формулу (6.2) в загальному випадку можна записати наступним чином:

$$K_{a.t.} = K_{a.t.0} \cdot (1 - K_T),$$

де $K_{a.t.0}$ – коефіцієнт «чистого» акустичного тракту (без дефектів), K_T – коефіцієнт тіні, в якому міститься вся амплітудна інформація про дефект (сукупна інформація про розмір і прозорість дефекту).

Коефіцієнт тіні виражається як:

$$K_T = \frac{4S_d}{\lambda_{ок}H} (1 - T_{I_d}).$$

Якщо дефект і приймач знаходяться в ближній зоні випромінювача, а приймач – в дальній зоні дефекту, як вторинного випромінювача (рис. 6.11), то коефіцієнт акустичного тракту у такому випадку розраховується за формулою:

$$K_{a.t.} = 0,8T_I e^{-H\delta_p} \left(1 - \frac{2S_d}{\lambda_{ок}H} (1 - T_{I_d}) \right).$$

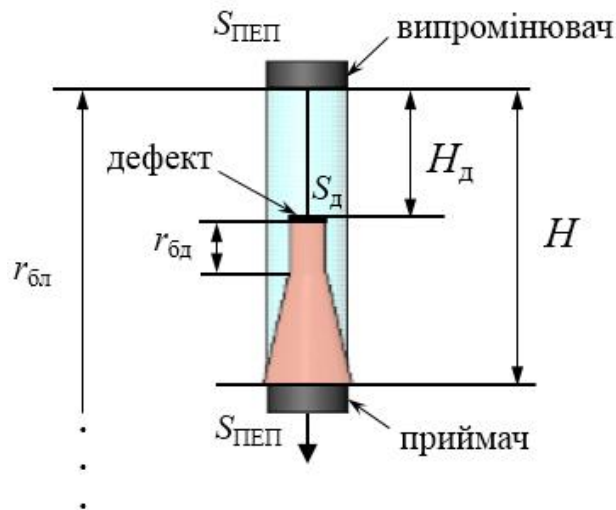


Рис. 6.11. Акустичний тракт методу проходження для випадку $H < r_{бл}$, $(H - H_d) > r_{бд}$, $H_d \approx H/2$, $S_d < S_{пеп}$

Якщо всі процеси випромінювання і приймання відбуваються в ближніх зонах як випромінювача, так і дефекту (рис. 6.12), то акустичний тракт у такому випадку розраховується за формулою:

$$K_{a.t.} = T_I e^{-H\delta_p} \left(1 - \frac{S_d}{2S_{пеп}} (1 - T_{I_d}) \right).$$

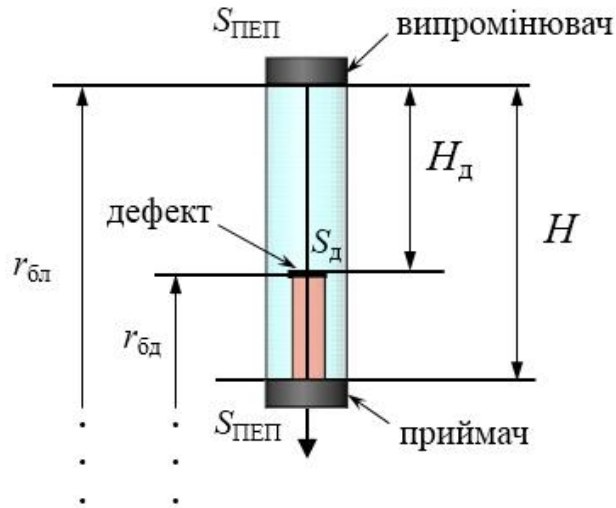


Рис. 6.12. Акустичний тракт методу проходження для випадку $H < r_{\text{бл}}$, $(H - H_d) < r_{\text{бд}}$, $S_d < S_{\text{пеп}}$

6.1.3. Моделі трактів з лінією затримки

Акустичною лінією затримки називається середовище, яке розташоване між ОК і перетворювачем. Наприклад, лінія затримки використовується при іммерсійному контролі, або тоді, коли необхідно контролювати підповерхневі дефекти (в цьому випадку мертва зона перетворювача буде «винесена» в лінію затримки), або при похилому введенні УЗК через призму, або при ультразвуковій мікроскопії та ін. Лінії затримки умовно можна розділити на «повільні» та «швидкі».

При іммерсійному контролі матеріалом лінії затримки є рідина, найчастіше це вода. Отже, при контролі твердого ОК швидкість звуку в лінії затримки буде меншою, ніж в самому ОК, тобто $C_{\text{лз}} < C_{\text{ок}}$. Така лінія затримки називається «повільною».

Для розрахунку акустичного тракту, в який входить лінія затримки, необхідно двошарову схему тракту замінити еквівалентною моделлю (рис. 6.13).

На підставі законів геометричної акустики можна розрахувати уявне положення випромінювача:

$$H_{\text{уяв}} = nH_{\text{лз}} = \frac{C_{\text{лз}}}{C_{\text{ок}}} H_{\text{лз}},$$

де n – показник заломлення.

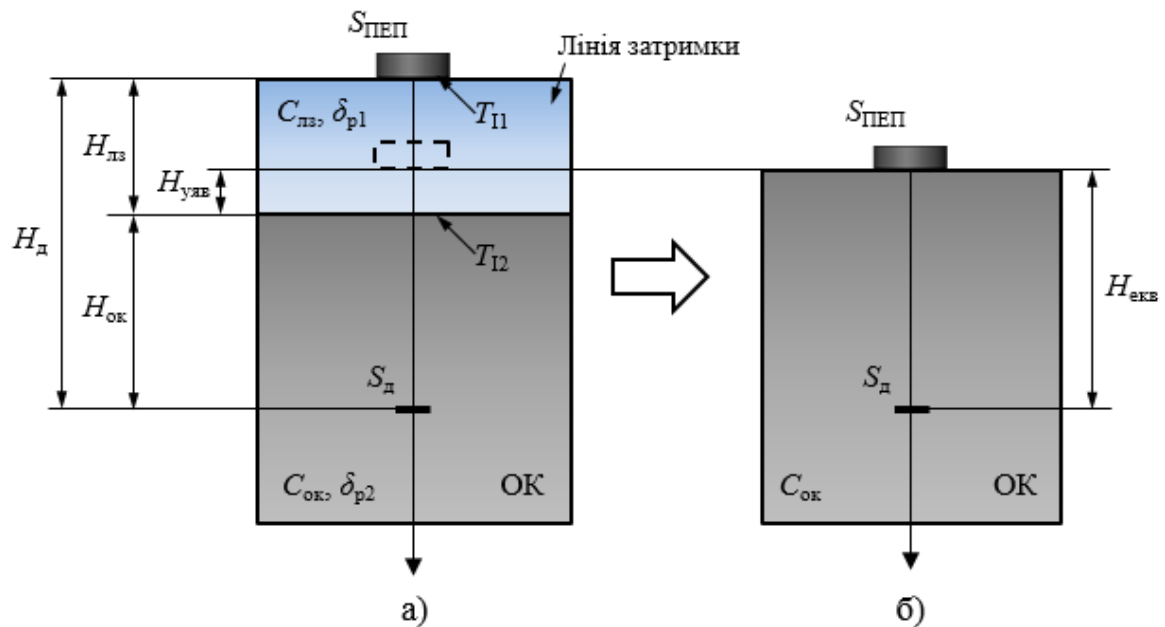


Рис. 6.13. Акустичний тракт з «повільною» лінією затримки: а) променева картина, б) еквівалентна модель

Використання еквівалентної моделі акустичного тракту полягає в тому, що променева картина включатиме тільки середовище ОК, що спрощує подальші розрахунки. Але треба враховувати, що глибина залягання дефекту в еквівалентному тракті буде визначатися як:

$$H_{\text{екв}} = H_{\text{ок}} + H_{\text{уяв}} = H_{\text{ок}} + \frac{C_{\text{лз}}}{C_{\text{ок}}} H_{\text{лз}}.$$

Після виконання необхідних заміन в променевій картині тракту можна скористатись будь-якою розрахунковою моделлю акустичних трактів, розглянутих в розділах 6.1.1 та 6.1.2. Але слід пам'ятати, що еквівалентна модель насамперед необхідна для визначення зони акустичного поля, в якій відбувається контроль²⁹. Методика використання еквівалентної моделі наступна:

- після виконання всіх еквівалентних перетворень розраховують глибину ближньої зони $r_{\text{бл}}$, для чого використовують параметри ОК;
- порівнюють отримане значення $r_{\text{бл}}$ з еквівалентною глибиною залягання дефекту (або донної поверхні) $H_{\text{екв}}$;

²⁹ Розрахунки, що стосуються інтервалів часу для вимірювання координат, фазових затримок тощо, виконують за реальною, а не еквівалентною моделлю.

- визначають зону, в якій проводиться контроль (ближня або дальня) і визначаються з формулою коефіцієнта акустичного тракту;
- для параметрів формули вибраного коефіцієнту акустичного тракту еквівалентні розміри використовуються тільки в складовій, яка визначає послаблення хвилі, обумовлене сферичним фронтом; при цьому коефіцієнти проходження враховуються для двох меж як у реальному тракті (а не для однієї як у еквівалентному), також параметри згасань вводяться фактичні для матеріалу лінії затримки та ОК.

Наприклад, для випадку імерсійного контролю дефекту у вигляді плоскодонного отвору за умови, що еквівалентна глибина залягання дефекту не перевищує глибину ближньої зони, формула коефіцієнту акустичного тракту матиме вигляд (див. рис. 6.13):

$$K_{a.т.} = 0,8 \frac{S_d}{\lambda H_{екв}} T_{I1} T_{I2} R_p e^{-2(H_{лз} \delta_{p1} + H_{ок} \delta_{p2})}.$$

Для «швидкої» лінії затримки характерне наступне співвідношення між швидкостями хвиль: $C_{лз} > C_{ок}$. У такому випадку розмір еквівалентного тракту буде більшим за реальний; всі інші припущення та розрахунки такі ж, як і для «повільної» лінії затримки.

6.1.4. Моделі трактів при контролі багат шарових структур

Якщо ОК є багат шаровою структурою (рис. 6.14), то у формулі коефіцієнта ослаблення акустичного тракту враховуються всі коефіцієнти проходження (через кожну межу), віддзеркалення і згасання. Наприклад, якщо плоскодонний відбивач малих розмірів знаходиться в дальній зоні, то в цьому випадку (див. розділ 6.1.1) загальна формула коефіцієнту ослаблення акустичного тракту матиме вигляд:

$$K_{a.т.} = \frac{S_d S_{пеп}}{\lambda_N^2 H_{екв}^2} \left(\prod_{i=1}^N T_{Ii} \right) R_p e^{-2 \sum_{i=1}^N H_i \delta_{pi}}.$$

де N – кількість шарів (або меж), T_{Ii} – коефіцієнт проходження i -ї межі, H_i – реальна товщина i -го шару, δ_{pi} – коефіцієнт згасання ультразвуку в i -му шарі, λ_N – довжина

хвилі в шарі, в якому знаходиться дефект (найчастіше це останній шар), $H_{\text{екв}}$ – еквівалентна довжина акустичного тракту, яка розраховується відносно того шару, в якому знаходиться дефект.

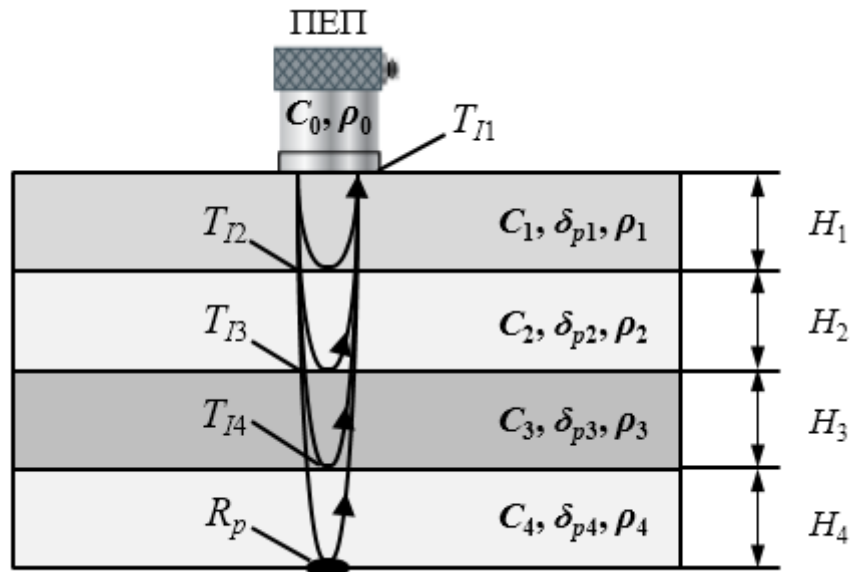


Рис. 6.14. Акустичний тракт при контролі багатошарових структур

Еквівалентна довжина акустичного тракту розраховується наступним чином:

$$H_{\text{екв}} = H_N + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{C_i}{C_N} H_i. \quad (6.3)$$

Тоді для вибору базової моделі акустичного тракту із описаних в попередніх розділах необхідно розрахувати значення ближньої зони для шару, відносно якого були виконані еквівалентні заміни і порівняти її з величиною $H_{\text{екв}}$.

6.2. Акустичні тракти похилих суміщених перетворювачів

В деяких випадках для контролю заданих ділянок ОК необхідною умовою є введення ультразвукових хвиль під кутом до його поверхні. З цією метою використовують похилі перетворювачі. В ОК залежно від кута падіння можуть збуджуватись всі типи ультразвукових хвиль – поздовжні, поперечні (зсувні), поверхневі, головні та ін. (рис. 6.15). Для виявлення дефектів різною мірою використовують всі типи хвиль, проте поперечні хвилі, що мають меншу довжину,

дають змогу краще виявляти дефекти малих розмірів у напрямку нормалі до поверхні введення і близько розташовані до цієї поверхні. Тому кут призми для таких перетворювачів вибирають більшим за перший критичний, що забезпечує відсутність у виробі позовжніх хвиль.

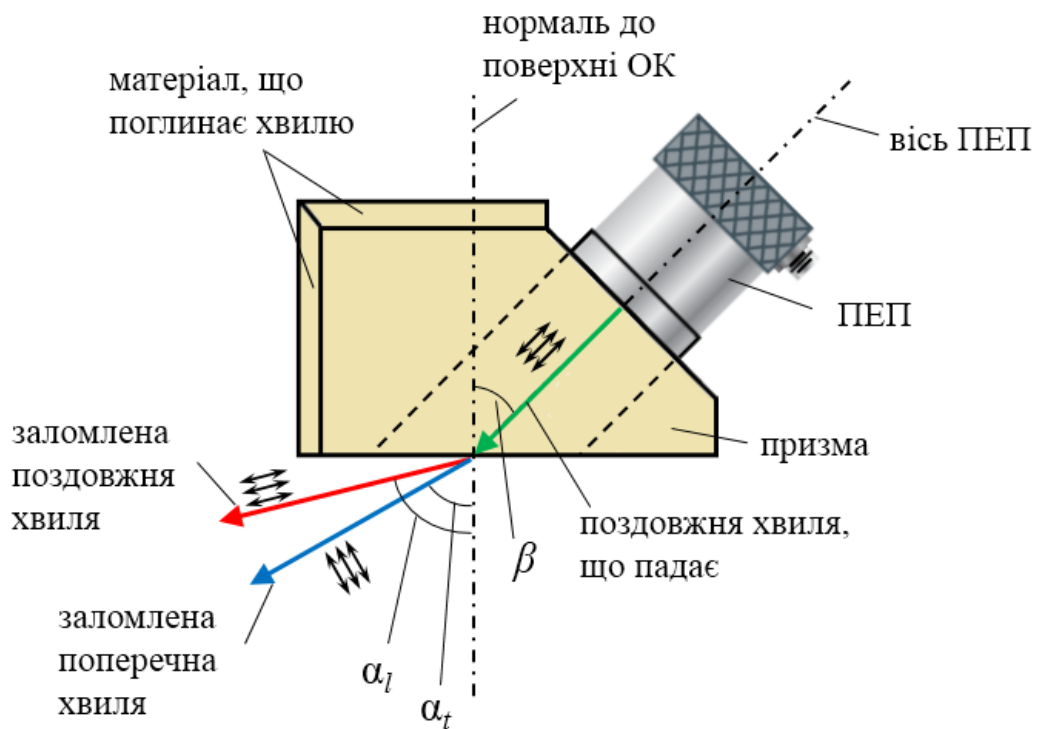


Рис. 6.15. Схематичне зображення похилого ультразвукового датчика

При похилому введенні ультразвукового променя, в результаті якого відбувається його заломлення, для розрахунку акустичного тракту визначають положення і розмір уявного випромінювача. При цьому акустичну вісь перетворювача випрямляють, а середовища падіння і заломлення променя замінюють одним середовищем (рис. 6.16).

Уявний випромінювач менше дійсного в m разів:

$$m = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha},$$

Акустичне поле круглої пластини в площині падіння і в площині, перпендикулярній акустичній осі, має різну структуру і різну амплітуду (у перетині для дійсного джерела поле являє собою коло, для уявного джерела – еліпс).

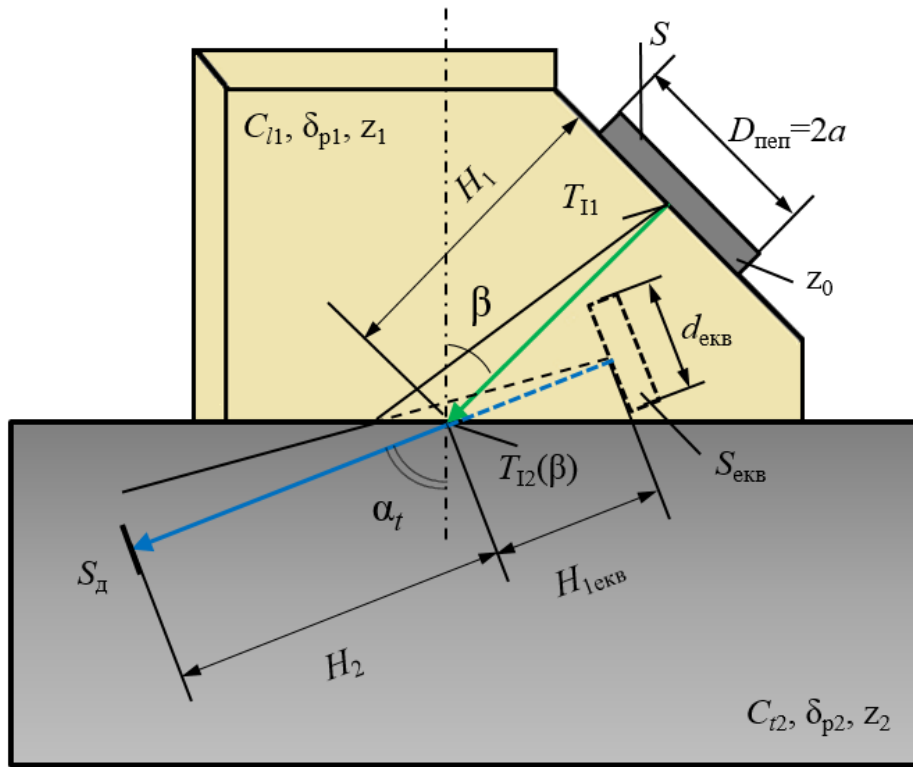


Рис. 6.16. Схематичне зображення акустичного тракту у випадку похилого введення УЗК (з трансформацією хвилі)

Відповідно до схеми акустичного тракту і променевої картини виконують еквівалентні заміни:

$$d_{\text{екв}} = d_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} ;$$

$$H_{1\text{екв}} = H_1 n \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = H_1 \frac{C_{l1}}{C_{t2}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} .$$

Величина H_1 визначається конструктивними характеристиками похилого перетворювача. Величина H_2 залежить від глибини залягання відбивача.

Тоді загальна відстань, яку проходить ультразвукова хвиля від випромінювача до відбивача з урахуванням еквівалентних змін для похилого ПЕП:

$$H_{\text{заг}} = H_2 + H_{1\text{екв}} .$$

Якщо дефект знаходиться на акустичній осі похилого перетворювача, то можна застосовувати формули для розрахунку коефіцієнту акустичного тракту із розділу 6.1.1, але з деякими змінами: $S_{\text{екв}}$ – площа уявного випромінювача, λ – довжина поздовжньої/поперечної хвилі в ОК, H – загальний шлях, який визначається з урахуванням еквівалентного шляху променя в призмі $H_{1\text{екв}}$.

Для прямокутного перетворювача з довжиною сторін в додатковій площині L_1 та площині падіння L_2 площа уявного випромінювача розраховуватиметься як:

$$S_{\text{екв}} = L_1 L_{2\text{екв}},$$

$$L_{2\text{екв}} = L_2 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}.$$

Для круглого перетворювача діаметром $d_{\text{пеп}}$ площа уявного випромінювача (у формі еліпсу) розраховуватиметься як:

$$S_{\text{екв}} = \pi \frac{d_{\text{екв}}}{2} \frac{d_{\text{пеп}}}{2} = \pi \frac{d_{\text{пеп}}^2}{4} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = S_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}.$$

Найчастіше похилі ПЕП використовуються для введення в ОК поперечних хвиль. Цей факт враховано в наведених нижче формулах для розрахунку коефіцієнтів акустичних трактів тим чином, що довжина хвилі і коефіцієнт згасання в ОК за замовчуванням визначаються для поперечної хвилі (очевидно, що при введенні під кутом поздовжніх хвиль в ОК ці формули також застосовні, лише треба використовувати відповідні довжину хвилі і коефіцієнт згасання).

Якщо відбивачем є тонкий диск, що знаходиться в дальній зоні поля випромінювача на його акустичній осі і поверхня якого розташована перпендикулярно цій осі, то коефіцієнт акустичного тракту для луно-імпульсного методу за умови введення поперечної хвилі можна записати в наступному вигляді (див. рис. 6.16 та рис. 6.17):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{д}} S_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{\lambda_{t2}^2 (H_2 + H_{1\text{екв}})^2} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})},$$

де $S_{\text{д}}$ – площа відбивача, $S_{\text{пеп}}$ – площа випромінювача, α – кут введення променя в ОК, β – кут падіння променя на межу призма-ОК, H_2 – шлях променя від поверхні ОК до відбивача, H_1 – шлях променя в призмі, λ_{t2} – довжина поперечної хвилі в ОК, T_{I1} – коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі ПЕП-призма, $T_{I2}(\beta)$ – коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі призма-ОК, R_p – коефіцієнт віддзеркалення по тиску на межі ОК-дефект, δ_{p1} – коефіцієнт згасання звуку по тиску поздовжньої хвилі в призмі, δ_{p2} – коефіцієнт згасання звуку по тиску поперечної хвилі в ОК.

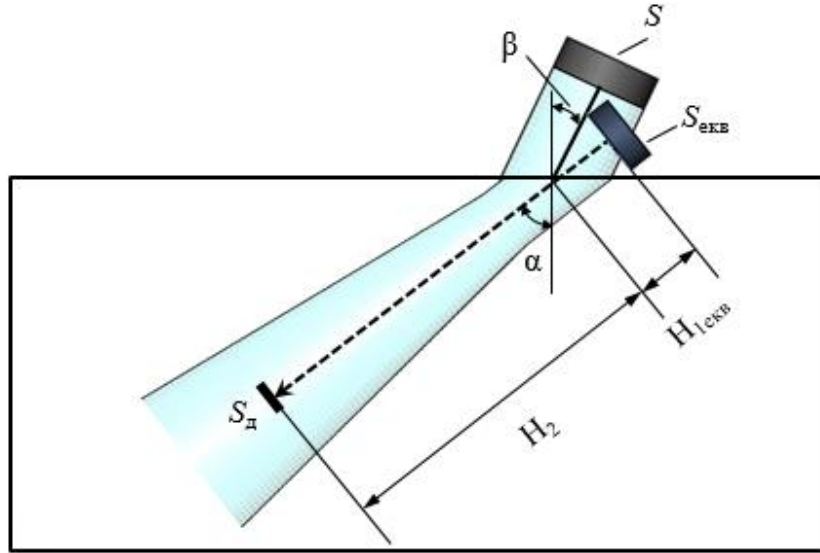


Рис. 6.17. Акустичний тракт похилого ПЕП в дальній зоні

Формули для розрахунку коефіцієнтів акустичних трактів для інших типів відбивачів за умови введення поперечної хвилі:

- сфера:

$$K_{a.t.} = \frac{DS_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{4\lambda_{t2}(H_2 + H_{1\text{екв}})^2} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1\delta_{p1} + H_2\delta_{p2})};$$

- циліндричний отвір довжиною l , діаметром d :

$$K_{a.t.} = \frac{lS_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{4\lambda_{t2}(H_2 + H_{1\text{екв}})^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda_{t2}}} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1\delta_{p1} + H_2\delta_{p2})};$$

- нескінченний циліндричний отвір діаметром d :

$$K_{a.t.} = \frac{S_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{\lambda_{t2}} \sqrt{\frac{d}{8(H_2 + H_{1\text{екв}})^3}} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1\delta_{p1} + H_2\delta_{p2})};$$

- нескінченна смуга шириною l :

$$K_{a.t.} = \frac{lS_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{\sqrt{2}(\lambda_{t2}(H_2 + H_{1\text{екв}}))^3} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1\delta_{p1} + H_2\delta_{p2})};$$

- дефект нескінченних розмірів (донна поверхня):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{2\lambda_{t2}(H_2 + H_{\text{екв}})} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p \cdot e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})}.$$

Значення $T_{I2}(\beta)$ береться із довідникової літератури. Цей коефіцієнт визначається експериментально для межі між заданими середовищами. Наприклад, для визначення коефіцієнту $T_{I2}(\beta)$ на межі оргскло-сталь можна скористатись графіком на рис. 3.4.

Якщо відбивач розташований не на акустичній осі, а його площина орієнтована не перпендикулярно осі променя, то в вищенаведені формули необхідно ввести ще один множник, який враховуватиме ДН уявного перетворювача, а при розрахунках коефіцієнту віддзеркалення R_p необхідно враховувати кут падіння променя на дефект.

На відміну від трактів прямих ПЕП в даному розділі взагалі не розглядаються коефіцієнти акустичних трактів похилих ПЕП в ближній зоні, адже, як зазначалося вище, ближня зона таких перетворювачів винесена в призму.

При контролі похилими перетворювачами добре виявляються дефекти типу тріщин, що орієнтовані перпендикулярно до донної поверхні. Це пов'язано з подвійним віддзеркаленням від поверхні виробу та дефекту, коли промені повертаються до того ж перетворювача, що працює як приймач (кутовий ефект).

В розрахунках акустичних трактів похилих ПЕП виділяють наступні кутові відбивачі: зарубка, свердління, риска, вертикальний отвір, двогранний кут, напівциліндр.

Коефіцієнт акустичного тракту при контролі похилим перетворювачем для кутового відбивача у вигляді зарубки (рис. 6.18):

$$K_{\text{а.т.}} = G \frac{S_{\text{д}} S_{\text{екв}}}{\lambda^2 (H_2 + H_{\text{екв}})^2} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p(\varphi) e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})}.$$

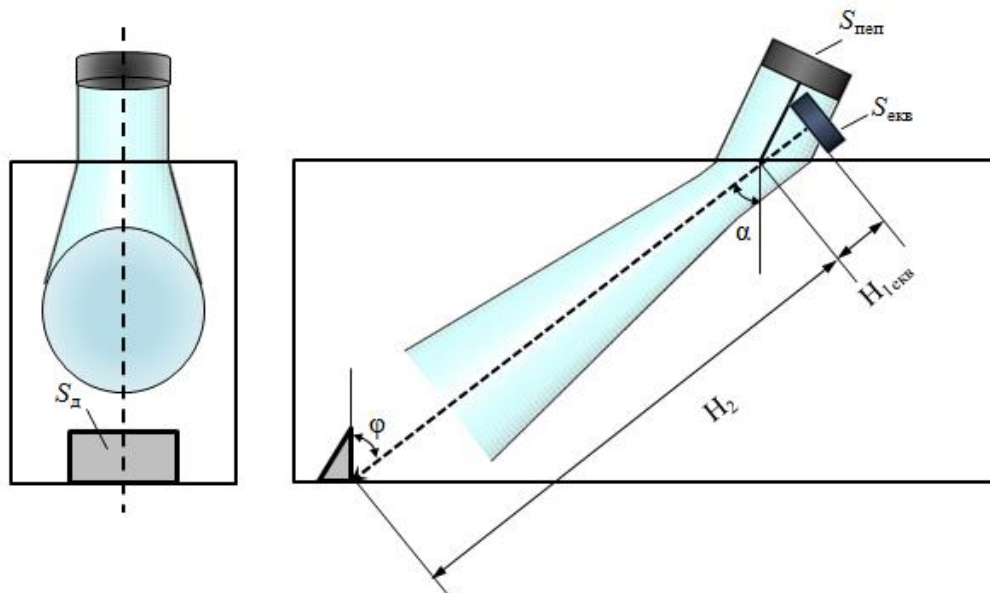


Рис. 6.18. Акустичний тракт похилого ПЕП: кутовий відбивач – зарубка

Коефіцієнт акустичного тракту при контролі похилим перетворювачем для кутового відбивача у вигляді свердління (рис. 6.19):

$$K_{a.т.} = G \frac{S_{екв} l}{2(H_2 + H_{1екв})^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda^3 \sin \varphi}} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p(\varphi) e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})}.$$

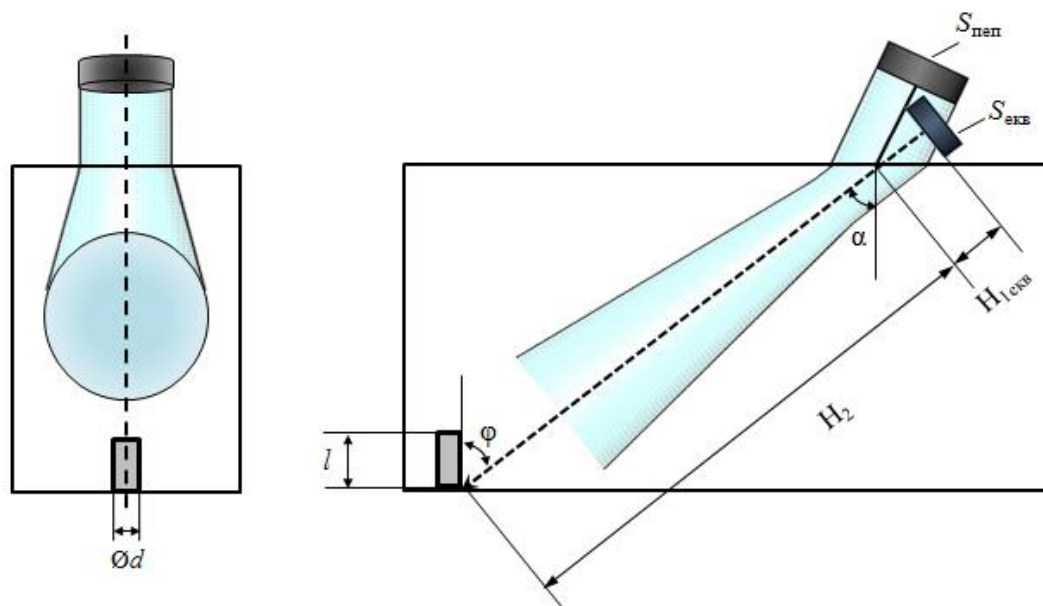


Рис. 6.19. Акустичний тракт похилого ПЕП: кутовий відбивач – свердління

Коефіцієнт акустичного тракту при контролі похилим перетворювачем для кутового відбивача у вигляді риски (рис. 6.20):

$$K_{a.т.} = G \frac{S_{\text{екв}} l}{\sqrt{2(\lambda(H_2 + H_{\text{екв}}))^3}} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p(\varphi) e^{-2(H_1 \delta_{p1} + H_2 \delta_{p2})}.$$

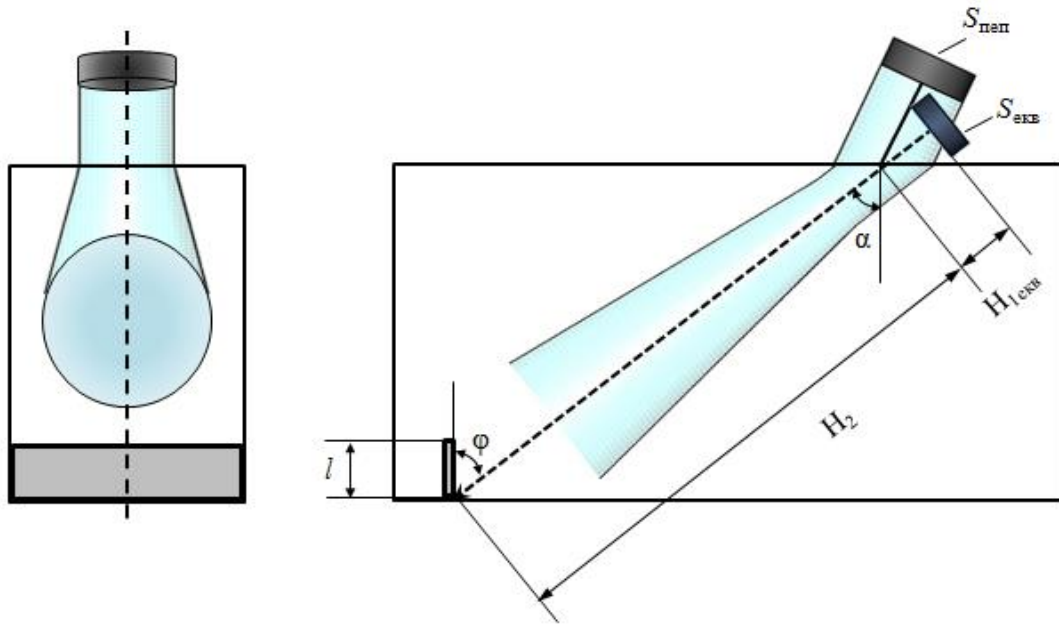


Рис. 6.20. Акустичний тракт похилого ПЕП: кутовий відбивач – риска

Коефіцієнт G враховує геометрію віддзеркалення, явище не дзеркального відбиття та трансформації хвиль. Коефіцієнт G залежить від співвідношення глибини відбивача до довжини хвилі l/λ і кута падіння на поверхню φ . Для виробів з плоскопаралельними поверхнями за умови, що дефект орієнтований перпендикулярно поверхні, $\varphi = \alpha$ – кут введення. Графіки для вибору коефіцієнту G можна знайти у спеціалізованій літературі.

Похилі перетворювачі використовуються також для створення поверхневих хвиль (або хвиль Релея). Розглянемо дві моделі акустичних трактів луно-методу із застосуванням поверхневих хвиль (рис. 6.21).

Для першої моделі характерні наступні умови: тріщина глибиною, що перевищує $1,5\lambda_R$, та завширшки $2b$ (причому $2b < 2a$ – діаметр ПЕП) розташована перпендикулярно акустичній осі датчика в дальній зоні поля випромінювання, тобто $L > 3r_{\text{бл}}$. У такому випадку коефіцієнт акустичного тракту може бути виражений наступним чином:

$$K_{a.т.} \approx \pi \frac{ab}{L\lambda_R} T_{I1} T_{I2}(\beta) R_p e^{-2(H_1 \delta_{p1} + L_2 \delta_{p2})},$$

згасання звуку в ОК, межі поділу, розміри і характер дефектів та ін.), при якому коефіцієнт акустичного тракту досягає максимального значення і при цьому не погіршується основна характеристика пристрою: похибка вимірювання або достовірність контролю.

Електроакустичний тракт – це частина електричної схеми, що включає електричну сторону перетворювача, де відбувається електромеханічне (пряме або зворотне) перетворення. Електроакустичний тракт визначає здебільшого резонансну (робочу) частоту випромінювання, форму зондувального імпульсу і коефіцієнт перетворення електричної енергії в акустичну та навпаки.

Розраховані значення коефіцієнту акустичного тракту дають змогу приблизно оцінити напруги випроміненого та прийнятого сигналів, які задовольняють заданим вимогам. Напруга прийнятого суміщеним перетворювачем луно-сигналу визначається як:

$$U_{\Pi} = U_{\text{в}} \cdot K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{пп}} , \quad (6.4)$$

де $U_{\text{в}}$ – напруга випромінювання, $K_{\text{а.т.}}$ – коефіцієнт акустичного тракту, $K_{\text{пп}}$ – коефіцієнт подвійного перетворення.

Коефіцієнт $K_{\text{пп}}$ близький по величині до коефіцієнту електромеханічного зв'язку п'єзоперетворювача, але на відміну від нього, окрім оцінки п'єзоелектричних властивостей п'єзоматеріалу, залежить ще від форми і розмірів перетворювача, частоти, демпфування (як механічного, так і електричного) та ін. Для п'єзоперетворювача ЦТС-19 коефіцієнт подвійного перетворення знаходиться в межах $K_{\text{пп}}=0,1 \dots 0,3$.

При амплітудному способі детектування сигналів важливою задачею є забезпечення умов виявлення сигналу на фоні завад. Для цього повинна виконуватись умова:

$$U_{\text{ппmin}} \geq nU_{\text{з}} ,$$

де $U_{\text{ппmin}}$ – мінімальна прийнята напруга ПЕП, $U_{\text{з}}$ – максимальне значення напруги завад, n – ціле число.

6.4. Приклади розв'язку задач

Приклад 6.1. Визначити коефіцієнт послаблення акустичного тракту для луно-методу дефектоскопії сталевго ОК, якщо дисковий перетворювач з ЦТС-19 має розміри $\varnothing 15 \times 0,66$ мм, а дефект, який являє собою плоскодонний отвір діаметром $d=4$ мм, знаходиться на акустичній осі перетворювача на глибині $H=100$ мм. Характеристики середовищ: $C_{ст}=6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст}=8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=7 \cdot 10^3$ кг/м³. Коефіцієнт згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача становить $\delta_p=1$ Нп/м.

Розв'язок:

Для вибору формули акустичного тракту, за якою виконуватиметься розрахунок, спочатку необхідно визначити, в якій зоні акустичного поля перетворювача залягає дефект.

Спочатку розрахуємо робочу частоту ПЕП за формулою (5.1):

$$f = \frac{C_{цтс}}{2h} = 2,5 \text{ МГц.}$$

Розрахуємо довжину хвилі в середовищі за формулою (2.1):

$$\lambda_{ст} = \frac{C_{ст}}{f} = 2,4 \text{ мм.}$$

Розрахуємо глибину ближньої зони за формулою (5.3)

$$r_{бл} = \frac{a^2}{\lambda_{ст}} = \frac{7,5^2}{2,4} = 23,4 \text{ мм.}$$

Враховуючи, що $H > 3r_{бл}$, можна стверджувати, що відбивач залягає в дальній зоні. У такому випадку для розрахунку коефіцієнту акустичного тракту використаємо формулу (6.1), оскільки за умовою задачі дефект є плоскодонним отвором.

Розраховуємо площу ПЕП:

$$S_{пеп} = \pi \left(\frac{d_{пеп}}{2} \right)^2 = 176,7 \text{ мм}^2.$$

Розраховуємо площу відбивача:

$$S_d = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 12,6 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт проходження ультразвукового променя по інтенсивності через межу ПЕП-ОК розрахуємо за формулою (3.6):

$$T_I = \frac{4 \cdot z_{ст} \cdot z_{цтс}}{(z_{ст} + z_{цтс})^2} \approx 0,88,$$

де $z = \rho C$.

Враховуючи, що межа віддзеркалення сигналу від плоскодонного отвору є м'якою (отвір заповнений повітрям), можемо записати $R_p \approx -1$ (знак «мінус» вказує на втрату фази віддзеркаленого сигналу; в розрахунках коефіцієнт R_p беремо по модулю).

В результаті коефіцієнт акустичного тракту становитиме:

$$K_{a.t.} = \frac{S_d S_{пеп}}{\lambda_{ст}^2 H^2} T_I R_p e^{-2H\delta_p} = \frac{176,7 \cdot 12,6}{2,4^2 \cdot 100^2} \cdot 0,88 \cdot e^{-2 \cdot 100 \cdot 0,001} = 0,0278.$$

Відповідь: $K_{a.t.} = 0,0278$.

Приклад 6.2. Контроль ведеться тіньовим методом. Розрахувати коефіцієнт ослаблення наскрізного сигналу, якщо сталевий об'єкт має товщину $H = 120$ мм і прозвучується випромінювачем розмірами $\varnothing 12 \times 0,33$ мм (приймач має такі ж розміри). Дефект діаметром $d_d = 2$ мм знаходиться на глибині $H_d = 100$ мм і є акустично непрозорим. Характеристики середовищ: $C_{ст} = 5,9 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст} = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс} = 3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс} = 7,4 \cdot 10^3$ кг/м³. Коефіцієнт згасання в сталі на робочій частоті перетворювача $\delta_p = 5$ Нп/м.

Розв'язок:

Спочатку визначимося з розрахунковою моделлю для коефіцієнту акустичного тракту.

Довжина хвилі в ОК з урахуванням формул (2.1) та (5.1):

$$\lambda_{ст} = \frac{C_{ст} \cdot 2h}{C_{цтс}} = 1,18 \text{ мм},$$

де h – товщина ПЕП.

Розраховуємо розмір ближньої зони для випромінювача:

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{6^2}{1,18} = 30,5 \text{ мм},$$

та дефекту (як вторинного випромінювача):

$$r_{\text{блд}} = \frac{\left(\frac{d_{\text{д}}}{2}\right)^2}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{1^2}{1,18} = 0,85 \text{ мм}.$$

Враховуючи, що $3r_{\text{бл}} < H_{\text{д}}$ і $3r_{\text{блд}} < (H - H_{\text{д}})$, можна стверджувати, що всі процеси випромінювання і приймання відбуваються в дальніх зонах. Акустичний тракт у такому випадку розраховується за формулою (6.2).

За умовою задачі дефект є акустично непрозорим, а отже $T_{\text{Id}} = 0$.

Розраховуємо площі випромінювача та дефекту:

$$S_{\text{пеп}} = \pi a^2 = 113,1 \text{ мм}^2.$$

$$S_{\text{д}} = \pi \frac{d_{\text{д}}^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Розраховуємо коефіцієнт проходження по інтенсивності T_I за формулою (3.6):

$$T_I = \frac{4z_{\text{ст}} \cdot z_{\text{цтс}}}{(z_{\text{ст}} + z_{\text{цтс}})^2} = \frac{4\rho_{\text{ст}} \cdot C_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{цтс}} \cdot C_{\text{цтс}}}{(\rho_{\text{ст}} \cdot C_{\text{ст}} + \rho_{\text{цтс}} \cdot C_{\text{цтс}})^2} \approx 0,91.$$

Тоді

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{пеп}}}{\lambda_{\text{ст}} H} T_I e^{-H\delta_p} \left(1 - \frac{4S_{\text{д}}}{\lambda_{\text{ст}} H} (1 - T_{\text{Id}}) \right) = \frac{113,1}{1,18 \cdot 120} \cdot 0,91 \cdot e^{-0,125} \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot 3,14}{1,18 \cdot 120} (1 - 0) \right) = 0,36.$$

Відповідь: $K_{\text{а.т.}} = 0,36$.

Приклад 6.3. Розрахувати коефіцієнт акустичного тракту для випадку луно-імпульсного контролю м'яких тканин людини. Променева картина акустичного тракту наведена на рис. 6.22. Вважати, що межі поділу між різними шарами є чіткими та плоскопаралельними.

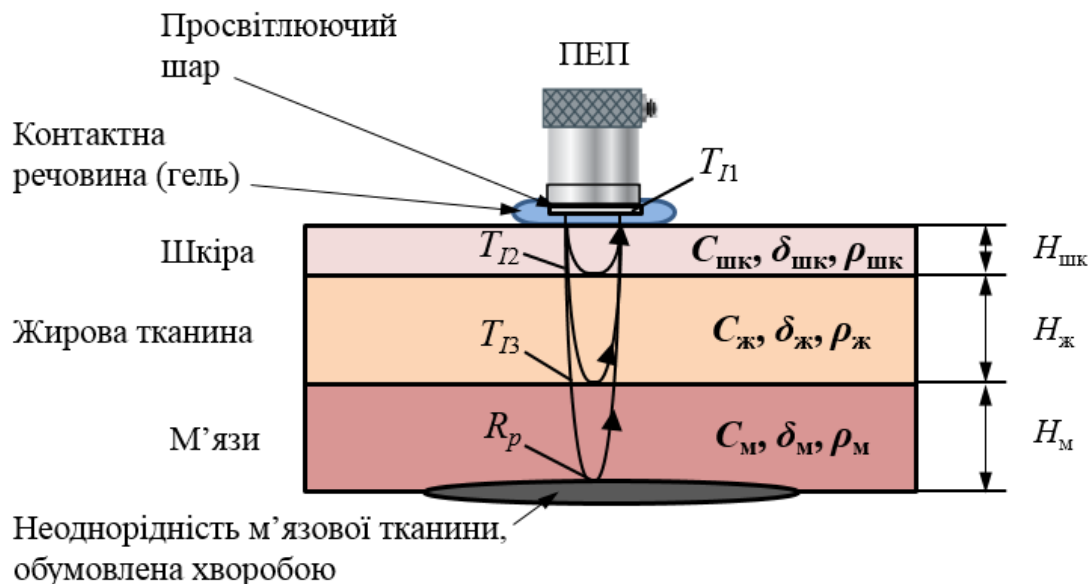


Рис. 6.22. Променева картина акустичного тракту (до прикладу 6.3)

Основні характеристики біологічних тканин, в яких поширюється ультразвукова хвиля, наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Характеристики біологічних тканин (до прикладу 6.3)

Біологічна тканина	Швидкість поздовжньої хвилі, м/с	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт згасання на частоті 1 МГц, дБ/см	Товщина шару, мм
Шкіра	1700	1065	3	3
Жирова тканина	1400	950	0,6	10
М'язи	1600	1070	1,2	14

Несфокусований п'єзоперетворювач з ЦТС-19 діаметром $2a=6$ мм випромінює коливання частотою $f=5$ МГц. Врахувати, що між перетворювачем та поверхнею введення УЗК використовується просвітлюючий шар. Відбивачем є неоднорідність м'язової тканини значної площі (що перевищує площу ПЕП), яка обумовлює коефіцієнт віддзеркалення акустичної хвилі по тиску $R_p=10\%$.

Розв'язок:

У даному випадку ОК є багатошаровою структурою, а отже при використанні формули для розрахунку коефіцієнту акустичного тракту необхідно буде враховувати впливи, обумовлені кожним середовищем.

Згідно умови, між ПЕП та ОК використовується просвітлюючий шар. У такому випадку коефіцієнт T_{11} не розраховується, а приймається приблизно рівним 1 (див. розділ 3.2). Очевидно, що між ПЕП та ОК також буде шар контактної речовини, проте його імпеданс підбирається приблизно рівним імпедансу шкіри, а отже він практично не впливатиме на коефіцієнт проходження. Також вважатимемо, що шар контактної речовини при притисканні ПЕП до шкіри менше довжини хвилі (а, отже, і набагато менше товщини всіх інших шарів біологічних тканин), тому в силу його малості він не буде враховуватись у кінцевій формулі коефіцієнту акустичного тракту.

Спочатку визначимо, в якій зоні акустичного поля перетворювача залягає відбивач. Враховуючи, що досліджувана структура багатошарова, виконаємо приведення акустичного тракту до одношарового відносно м'язової тканини. Розраховуємо еквівалентну глибину залягання відбивача, використовуючи формулу (6.3):

$$H_{\text{екв}} = \frac{C_{\text{шк}}}{C_{\text{м}}} H_{\text{шк}} + \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{м}}} H_{\text{ж}} + H_{\text{м}} = \frac{1700}{1600} \cdot 3 + \frac{1400}{1600} \cdot 10 + 14 \approx 26 \text{ мм.}$$

Розраховуємо глибину ближньої зони для еквівалентного тракту за формулою (5.3):

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{м}}} = \frac{f \cdot a^2}{C_{\text{м}}} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 3^2 \cdot 10^{-6}}{1600} \approx 28,1 \text{ мм.}$$

Враховуючи, що $r_{\text{бл}} > H_{\text{екв}}$, можна стверджувати, що контроль проводиться у ближній зоні.

За умовою задачі площа відбивача є значною, а отже можна припустити, що вона буде більшою за площу акустичного променя, який падає на відбивач (враховуючи, що контроль проводиться в ближній зоні, то діаметр акустичного променя в трубці випромінювання приблизно дорівнюватиме діаметру

випромінювача, тобто, 6 мм). Тоді коефіцієнт акустичного тракту в ближній зоні для такого типу відбивача з урахуванням еквівалентних змін матиме вигляд:

$$K_{a.t.} = 0,8 \cdot T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot R_p \cdot e^{-2(\delta_{шк}H_{шк} + \delta_{ж}H_{ж} + \delta_{м}H_{м})}$$

Розрахуємо коефіцієнти проходження по інтенсивності через межі шкіра-жир та жир-м'язи за формулою (3.6):

$$T_{I2} = \frac{4z_{шк} \cdot z_{ж}}{(z_{шк} + z_{ж})^2} = \frac{4\rho_{шк} \cdot C_{шк} \cdot \rho_{ж} \cdot C_{ж}}{(\rho_{шк} \cdot C_{шк} + \rho_{ж} \cdot C_{ж})^2} = \frac{4 \cdot 1065 \cdot 1700 \cdot 950 \cdot 1400}{(1065 \cdot 1700 + 950 \cdot 1400)^2} \approx 0,977.$$

$$T_{I3} = \frac{4z_{ж} \cdot z_{м}}{(z_{ж} + z_{м})^2} = \frac{4\rho_{ж} \cdot C_{ж} \cdot \rho_{м} \cdot C_{м}}{(\rho_{ж} \cdot C_{ж} + \rho_{м} \cdot C_{м})^2} = \frac{4 \cdot 950 \cdot 1400 \cdot 1070 \cdot 1600}{(950 \cdot 1400 + 1070 \cdot 1600)^2} \approx 0,984.$$

За умовою задачі для кожного середовища дані коефіцієнти згасання в дБ/см на частоті 1 МГц. Для підстановки в формулу коефіцієнта акустичного тракту, по-перше, коефіцієнти згасання необхідно перевести в Нп/мм (або Нп/м), по-друге, треба перерахувати їх значення для робочої частоти $f_p=5$ МГц. Як було зазначено в розділі 4.2, для більшості біологічних тканин коефіцієнт згасання майже лінійно залежить від частоти, тому для розрахунку його значення на робочій частоті при відомому значенні δ^T на тестовій частоті f_T можна використати просту пропорцію:

$$\delta_{шк} = \delta_{шк}^T \frac{f_p}{f_T} = 3 \frac{5}{1} = 15 \text{ дБ/см} \approx 0,17 \text{ Нп/мм}.$$

$$\delta_{ж} = \delta_{ж}^T \frac{f_p}{f_T} = 0,6 \frac{5}{1} = 3 \text{ дБ/см} \approx 0,035 \text{ Нп/мм}.$$

$$\delta_{м} = \delta_{м}^T \frac{f_p}{f_T} = 1,2 \frac{5}{1} = 6 \text{ дБ/см} \approx 0,07 \text{ Нп/мм}.$$

Розраховуємо значення коефіцієнту акустичного тракту:

$$K_{a.t.} = 0,8 \cdot T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot R_p \cdot e^{-2(\delta_{шк}H_{шк} + \delta_{ж}H_{ж} + \delta_{м}H_{м})} = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,977 \cdot 0,984 \cdot 0,1 \cdot \exp(-2(0,17 \cdot 3 + 0,035 \cdot 10 + 0,07 \cdot 14)) = 0,0019$$

Відповідь: $K_{a.t.}=1,9 \cdot 10^{-3}$.

Приклад 6.4. Визначити електричну напругу прийнятого дефектоскопом сигналу $U_{п}$, якщо сигнал випромінювання дорівнює $U_{в}=10$ В, коефіцієнт подвійного перетворення $K_{пп}=0,15$, а коефіцієнт послаблення акустичного тракту $K_{a.t.}=0,002$.

Розв'язок:

Для розрахунку напруги прийнятого сигналу використаємо формулу (6.4):

$$U_{\text{п}} = U_{\text{в}} \cdot K_{\text{шп}} \cdot K_{\text{а.т.}} = 10 \cdot 0,15 \cdot 0,002 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Відповідь: $U_{\text{п}} = 3 \text{ мВ.}$

6.5. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 6.1. Визначити, в якій зоні випромінювання знаходиться дефект, розташований на глибині 15 мм в сталевому ОК, якщо розміри дискового перетворювача із ЦТС-19 становлять $\varnothing 16 \times 0,66$ мм, а швидкості ультразвуку в середовищах: в сталі $C_{\text{ст}} = 6 \cdot 10^3$ м/с, в ЦТС-19 $C_{\text{цтс}} = 3,3 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: в ближній зоні.

Задача 6.2. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту ультразвукового товщиноміра при вимірюванні товщини сталевого зразка розміром 70 мм, яка перевищує довжину ближньої зони. Перетворювач з ЦТС-19 розмірами $\varnothing 10 \times 0,33$ мм має безпосередній контакт з ОК. Характеристики середовищ: $C_{\text{ст}} = 6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{ст}} = 8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{цтс}} = 3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{цтс}} = 7 \cdot 10^3$ кг/м³. Згасанням знехтувати.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 0,41$.

Задача 6.3. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту ультразвукового товщиноміра при вимірюванні товщини ОК розміром 10 мм, яка значно менше ближньої зони. Перетворювач з ЦТС-19 розмірами $\varnothing 10 \times 0,33$ мм має безпосередній контакт з ОК. Характеристики середовищ: $C_{\text{ок}} = 6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{ок}} = 8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{цтс}} = 3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{цтс}} = 7 \cdot 10^3$ кг/м³. Коефіцієнт згасання ультразвуку в ОК на частоті 2,5 МГц становить $\delta_p = 1,5$ Нп/м. Вважати, що в межах частот від 1 МГц до 6 МГц залежність коефіцієнту згасання від частоти практично лінійна.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 0,66$.

Задача 6.4. Визначити коефіцієнт послаблення акустичного тракту для луно-методу дефектоскопії сталевго ОК, якщо дисковий перетворювач з ЦТС-19 має розміри $\varnothing 20 \times 0,66$ мм, а відбивач, який являє собою плоскодонний отвір діаметром $d=3$ мм, знаходиться на акустичній осі перетворювача на глибині $H=20$ мм. Характеристики середовищ: $C_{ст}=6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст}=8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=7 \cdot 10^3$ кг/м³. Згасанням знехтувати.

Відповідь: $K_{ат} \approx 0,1$.

Задача 6.5. В сталевому ОК проводиться пошук дефектів з використанням п'єзоелектричного перетворювача з ЦТС-19 розмірами $\varnothing 12 \times 0,66$ мм. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту для випадку виявлення дефекту у вигляді сфери діаметром $D=3$ мм. Дефект знаходиться на глибині $5r_{бл}$ і зміщений відносно акустичної осі на 7° (рис. 6.23). Чутливість приймача в межах зміни кута напрямку на дефект від -10° до $+10^\circ$ прийняти рівною 1. Вважати, що коефіцієнт віддзеркалення акустичної хвилі по тиску від дефекту становить 30%. Характеристики середовищ: $C_{ст}=5,8 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{ст}=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{цтс}=3,3 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{цтс}=7,2 \cdot 10^3$ кг/м³. Коефіцієнт згасання ультразвуку по інтенсивності в сталі на робочій частоті перетворювача становить $\delta_I=20$ дБ/м.

Відповідь: $K_{ат} \approx 3,8 \cdot 10^{-4}$.

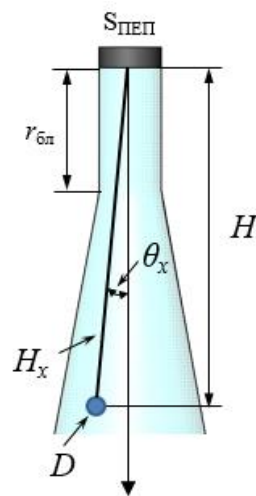


Рис. 6.23. Геометричні побудови до задачі 6.5

Задача 6.6. Пошук дефектів в алюмінієвому ОК проводиться з використанням іммерсійного способу ультразвукового контролю. Хвилі вводяться нормально до поверхні ОК через шар води, товщина якого становить 20 мм. Діаметр випромінюючої пластини перетворювача 10 мм, робоча частота 5 МГц. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту, якщо в ОК на глибині 60 мм від його поверхні знайдено відбивач, який являє собою довгу тонку смугу шириною 4 мм. Вісь відбивача перетинає акустичну вісь ПЕП і перпендикулярна їй. Характеристики середовищ: $C_{\text{цтс}}=3350$ м/с, $C_{\text{ал}}=6200$ м/с, $C_{\text{в}}=1500$ м/с, $\rho_{\text{цтс}}=7400$ кг/м³, $\rho_{\text{ал}}=2700$ кг/м³, $\rho_{\text{в}}=1000$ кг/м³. Коефіцієнти згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача: у воді $\delta_{\text{в}}=0,04$ Нп/м, в алюмінії $\delta_{\text{ал}}=0,8$ Нп/м.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 18,4 \cdot 10^{-3}$.

Задача 6.7. В ОК із титанового сплаву проводиться пошук дефектів за допомогою перетворювача, у якого випромінююча пластина має розміри $\varnothing 10 \times 0,5$ мм. Хвилі вводяться нормально до поверхні ОК через лінію затримки з оргскла товщиною 6 мм. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту для випадку виявлення дефекту, що має ефективний діаметр 2 мм та знаходиться на акустичній осі перетворювача на глибині 10 мм від поверхні ОК. Коефіцієнт віддзеркалення по акустичному тиску від дефекту становить 20%. Характеристики середовищ: $C_{\text{цтс}}=3400$ м/с, $C_{\text{тит}}=6100$ м/с, $C_{\text{орг}}=2650$ м/с, $\rho_{\text{цтс}}=7400$ кг/м³, $\rho_{\text{тит}}=4600$ кг/м³, $\rho_{\text{орг}}=1200$ кг/м³. Коефіцієнти згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача: в оргсклі $\delta_{\text{орг}}=25$ Нп/м, в титановому сплаві $\delta_{\text{тит}}=1,8$ Нп/м.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 2,36 \cdot 10^{-3}$.

Задача 6.8. Контроль сталевго ОК ведеться тіньовим методом. Розрахувати послаблення сигналу, що обумовлене дефектом діаметром 3 мм, який знаходиться по глибині рівно посередині між випромінювачем та приймачем (при цьому відстань між перетворювачами дорівнює $0,9r_{\text{бл}}$). Дефект є акустично прозорим на 25%. Характеристики випромінювача/приймача: діаметр 1 см, робоча частота 2,5 МГц. Характеристики середовищ: $C_{\text{ст}}=5,92 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_{\text{ст}}=7,87 \cdot 10^3$ кг/м³, $C_{\text{цтс}}=3,37 \cdot 10^3$ м/с,

$\rho_{\text{цтс}}=7,38 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Коефіцієнт згасання в сталі на робочій частоті ПЕП становить $\delta_p=3,2 \text{ Нп/м}$.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 0,37$.

Задача 6.9. Контроль сталевоб'єкту товщиною 15 мм проводиться тінювим методом з використанням двох ідентичних перетворювачів (один із яких є випромінювачем, а інший – приймачем) із ЦТС-19 розмірами $\varnothing 16 \times 0,33 \text{ мм}$. Визначити коефіцієнт затінення, якщо на глибині 9 мм виявлено акустично непрозорий дефект діаметром 6 мм. Швидкості ультразвуку в середовищах: $C_{\text{ст}}=5,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $C_{\text{цтс}}=3,3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Відповідь: $K_{\text{т}}=0,07$.

Задача 6.10. Пошук дефектів проводиться з використанням похилого перетворювача, за допомогою якого в сталевий ОК вводять поперечні хвилі. Призма перетворювача виготовлена з оргскла та має кут $\beta=35^\circ$. Шлях променя в призмі становить 15 мм, розміри п'єзоелементу $\varnothing 12 \times 0,66 \text{ мм}$. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту, якщо виявлено плоский відбивач діаметром 2 мм, що перпендикулярний акустичній осі і знаходиться на відстані 50 мм вздовж цієї осі, якщо відраховувати від точки введення променя в ОК. Коефіцієнт віддзеркалення від дефекту по акустичному тиску приблизно дорівнює 70%. Коефіцієнт Пуассона для сталі взяти рівним $\nu=0,23$. Вважати, що товщина шару контактної рідини між призмою та поверхнею ОК дорівнює нулю. Швидкості поздовжніх хвиль в середовищах: $C_{\text{цтс}}=3300 \text{ м/с}$, $C_{\text{ст}}=5980 \text{ м/с}$, $C_{\text{орг}}=2620 \text{ м/с}$. Густини середовищ: $\rho_{\text{цтс}}=7400 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{ст}}=7820 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{орг}}=1200 \text{ кг/м}^3$. Коефіцієнти згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача: поздовжніх хвиль в оргсклі $\delta_{\text{орг}}=20 \text{ Нп/м}$, поперечних хвиль в сталі $\delta_{\text{ст}}=6,2 \text{ Нп/м}$.

Відповідь: $K_{\text{ат}} \approx 9,95 \cdot 10^{-4}$.

Задача 6.11. При контролі похилим перетворювачем, за допомогою якого вводяться поперечні хвилі в сталевий ОК, в дальній зоні поля випромінювання

виявлено кутовий відбивач у вигляді свердління. Розрахувати коефіцієнт послаблення акустичного тракту, якщо кут введення променя становить 60° , шлях променя в призмі із оргскла 10 мм, шлях променя вздовж акустичної осі в ОК до дефекту 70 мм, діаметр ПЕ 15 мм, робоча частота 4 МГц, діаметр свердління 2 мм, висота свердління 8 мм. Коефіцієнт G , який враховує геометрію віддзеркалення, явище не дзеркального відбиття та трансформації хвиль, взяти рівним 0,5. Коефіцієнт віддзеркалення від кутового відбивача $R_p(\varphi)$ взяти рівним 0,15. Вважати, що товщина шару контактної рідини між призмою та поверхнею ОК дорівнює нулю. Швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі перетворювача $C_{лцс}=3300$ м/с, поздовжньої хвилі в матеріалі призми $C_{лорг}=2620$ м/с, поперечної хвилі в матеріалі ОК $C_{лст}=3220$ м/с. Густини середовищ: $\rho_{лцс}=7400$ кг/м³, $\rho_{орг}=1200$ кг/м³. Коефіцієнти згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача: поздовжніх хвиль в оргсклі $\delta_{орг}=30$ Нп/м, поперечних хвиль в сталі $\delta_{ст}=7,5$ Нп/м.

Відповідь: $K_{ат} \approx 2,4 \cdot 10^{-4}$.

Задача 6.12. Розрахувати коефіцієнт ослаблення акустичного тракту при луно-імпульсному методі контролю поверхневих дефектів в сталі хвилями Релея. Відбивач (щілина) шириною 2 мм знаходиться на відстані 200 мм від датчика на його акустичній осі. Призма датчика виготовлена з оргскла і має кут $\beta=60^\circ$; шлях променя в призмі становить 20 мм; розміри ПЕ $\varnothing 15 \times 0,66$ мм. Швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі ПЕ $C_{лцс}=3300$ м/с, в призмі $C_{лорг}=2620$ м/с, в ОК $C_{лст}=5800$ м/с. Густини середовищ: $\rho_{лцс}=7400$ кг/м³, $\rho_{орг}=1200$ кг/м³. Коефіцієнт Пуассона для сталевих об'єктів $\nu=0,24$. Коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі оргскло-сталь при трансформації хвилі взяти рівним 0,1. Коефіцієнти згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача: поздовжніх хвиль в оргсклі $\delta_{орг}=33$ Нп/м, поверхневих хвиль в сталі $\delta_{ст}=9$ Нп/м.

Відповідь: $K_{ат} \approx 2,75 \cdot 10^{-5}$.

Задача 6.13. Визначити коефіцієнт послаблення акустичного тракту, якщо

електрична напруга сигналу випромінювання складає 40 В, напруга прийнятого перетворювачем сигналу $8 \cdot 10^{-3}$ В, коефіцієнт подвійного перетворення 0,1.

Відповідь: $K_{ат} \approx 2 \cdot 10^{-3}$.

Задача 6.14. Визначити напругу випромінювання, при якій забезпечується для заданих умов контролю співвідношення амплітуди мінімального прийнятого сигналу до амплітуди завад 16 дБ. При цьому $U_3 = 100$ мкВ, коефіцієнт ослаблення акустичного тракту $K_{ат} = 7 \cdot 10^{-4}$, коефіцієнт подвійного перетворення $K_{пп} = 0,25$.

Відповідь: $U_в \approx 3,6$ В.

Задача 6.15. Визначити площу плоскостонного отвору, для якого коефіцієнт акустичного тракту становить $K_{ат} = 8,4 \cdot 10^{-2}$. Прозвучування проводиться в сталі на глибині 2 см прямим перетворювачем з ЦТС-19 розмірами $10 \times 10 \times 0,5$ мм. Характеристики середовищ: $C_{цтс} = 3800$ м/с, $C_{ст} = 5920$ м/с, $\rho_{цтс} = 7200$ кг/м³, $\rho_{ст} = 7780$ кг/м³. Згасанням знехтувати.

Відповідь: $S_d \approx 3,5$ мм².

Задача 6.16. Чи можливо виявити плоскостонний відбивач, який знаходиться в сталевому зразку на глибині 5 см, прийнятий сигнал від якого становив би $U_{п} = 10^{-4}$ В при напрузі випроміненого сигналу $U_в = 20$ В? Розміри випромінювача з ЦТС-19 $\varnothing 10 \times 0,7$ мм. Коефіцієнт подвійного перетворення $K_{пп} = 0,2$. Характеристики середовищ: $C_{цтс} = 3400$ м/с, $C_{ст} = 5900$ м/с, $\rho_{цтс} = 7500$ кг/м³, $\rho_{ст} = 7900$ кг/м³. Врахувати, що між ПЕП та ОК використовується просвітлюючий шар. Згасанням знехтувати.

Відповідь: при зазначених в задачі умовах виявити дефект неможливо.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке акустичний тракт?
2. Поясніть відмінності між чотирма базовими моделями акустичних трактів методів віддзеркалення.

3. Які припущення та спрощення покладені в основу розрахунків коефіцієнтів акустичних трактів?
4. Що таке акустична лінія затримки? З якою метою вона використовується?
5. В чому відмінність між «швидкою» та «повільною» лініями затримки?
6. Яким чином розраховується коефіцієнт акустичного тракту для багат шарових структур?
7. Поясніть поняття «уявний випромінювач», яке вводиться при розрахунку акустичних трактів при похилому введенні ультразвукового променя в ОК.
8. Які ефекти необхідно враховувати при використанні похилих перетворювачів?
9. Що таке електроакустичний тракт?

7. АКУСТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ

Акустичні методи НК ділять на дві великі групи: активні і пасивні (рис. 7.1). Активні методи засновані на випромінюванні і прийманні пружних хвиль, пасивні – тільки на прийманні хвиль, джерелом яких служить сам ОК (наприклад, утворення тріщини супроводжується виникненням акустичних коливань, що виявляються акустико-емісійним методом).

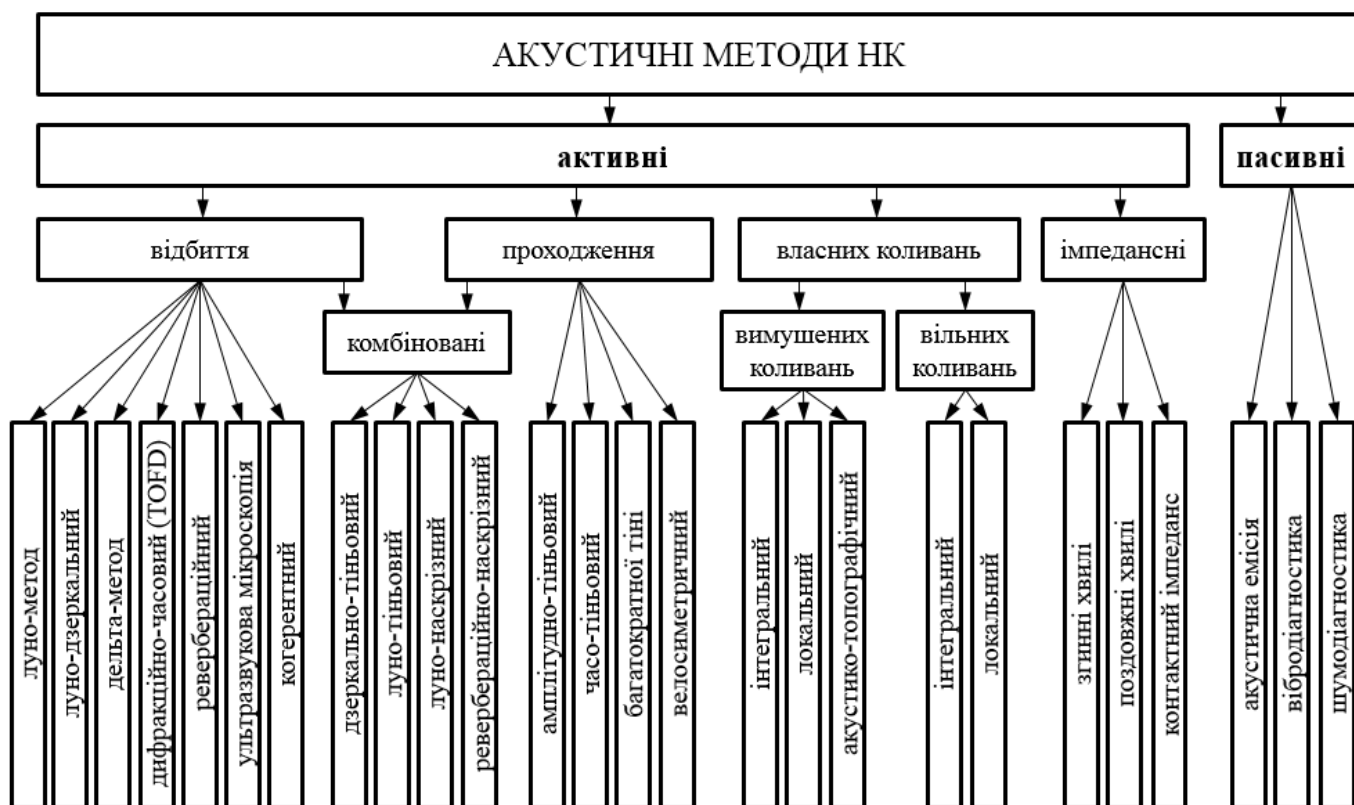


Рис. 7.1. Класифікація акустичних методів НК

Активні методи поділяють на методи віддзеркалення, проходження, комбіновані (які використовують як віддзеркалення, так і проходження), власних коливань та імпедансні. Методи віддзеркалення засновані на аналізі віддзеркалення імпульсів пружних хвиль від неоднорідностей або меж ОК, методи проходження – на впливі параметрів ОК на характеристики хвиль, що пройшли через нього. Комбіновані методи використовують вплив параметрів ОК як на віддзеркалення, так і на проходження пружних хвиль. В методах власних коливань про властивості

ОК судять за параметрами його вільних або вимушених коливань (їх частотах і величині втрат). В імпедансних методах інформативним параметром служить механічний імпеданс ОК в зоні його контакту з перетворювачем.

Пасивні методи НК класифікують за характером сигналів, що аналізуються.

7.1. Методи ультразвукової товщинометрії

Під час експлуатації та ремонту обладнання часто виникає необхідність визначити товщину його стінок, виміряти розміри окремих деталей, визначити товщину біметалевих наплавлень, виміряти залишкову товщину стінки виробу, схильного до зносу внаслідок особливостей технологічного процесу та експлуатації. Для вирішення цих та багатьох інших задач застосовують методи ультразвукової товщинометрії, що дають змогу досліджувати товщину і цілісність матеріалів за допомогою ультразвукових хвиль.

Вимірювання товщини ОК проводять найчастіше луно-імпульсним ультразвуковим методом. Визначення товщини здійснюється на основі результатів вимірювання інтервалу часу між зондувальним імпульсом та віддзеркаленим від задньої стінки виробу луно-сигналом. При цьому датчик може мати як суміщену конструкцію, так і роздільно-суміщену.

Перед початком вимірювань за допомогою візуального огляду конструкції необхідно переконатися в якості підготовленої поверхні і відсутності видимих дефектів з метою визначення можливості проведення вимірювань. Поверхня ОК повинна бути рівною, очищеною від пилу, забруднень, бризок металу, захисного шару, що відшаровується, та інших недоліків, які впливають на процес вимірювання. Шорсткість підготовленої поверхні повинна бути не гірше $R_z 40$ мкм.

Товщина визначається за наступною формулою при луно-імпульсному методі:

$$H = \frac{CT}{2}, \quad (7.1)$$

де C – швидкість поширення ультразвукових хвиль у виробі, T – часовий інтервал між випроміненим (зондувальним) імпульсом та прийнятим імпульсом (від дна ОК).

При використанні в товщиномірах перетворювача, підключеного за роздільно-суміщеною схемою, швидкість також може бути розрахована за формулою (7.1). Проте у даному випадку формула (7.1) буде давати наближений результат, оскільки хвилі у виробі матимуть V-подібний шлях, а довжина такого шляху завжди більша, ніж подвоєне значення товщини.

Вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміра – це непряме вимірювання, адже як було зазначено вище, сам прилад вимірює часову затримку між зондувальним та першим донним сигналом. До того ж, найчастіше вимірювання проводиться між стартовим синхроімпульсом, який запускає процес збудження ПЕП, та першим донним сигналом. Недоліком такого підходу до вимірювання часової затримки, що пропорційна товщині виробу, є досить значна похибка, обумовлена неможливістю точно врахувати вплив контактної рідини між ПЕП та ОК на результат вимірювання товщини. Щоб позбутися цієї похибки вимірювання виконують не між стартовим синхроімпульсом та першим донним луно-сигналом, а між сусідніми донними сигналами (за умови достатньої реверберації ультразвукових сигналів між поверхнями ОК), наприклад, між першим та другим донними сигналами (рис. 7.2).

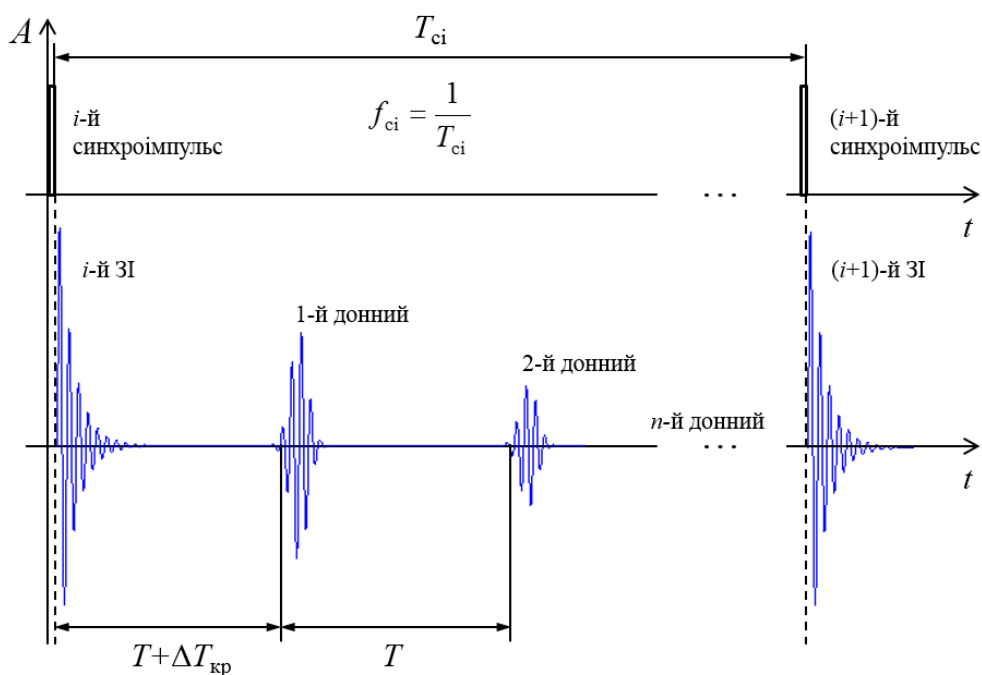


Рис. 7.2. Часова діаграма роботи луно-імпульсного ультразвукового товщиноміра:
 $\Delta T_{кр}$ – час проходження хвилі через шар контактної рідини, T_{ci} – період синхроімпульсів

При високочастотному ультразвуковому контролі електричні імпульси зазвичай збуджуються ударним генератором. Форма імпульсу, що генерується ПЕП, наближено описується обвідною, що зменшується за експоненціальним законом, та високочастотним гармонійним заповненням з частотою, яка визначається резонансними властивостями ПЕП. Проте в процесі перетворення електричних коливань в ультразвукові і навпаки, поширення в ОК, проходження та віддзеркалення від різних меж форма імпульсу спотворюється і стає близькою до дзвоноподібної, яку можна описати за допомогою наступної формули:

$$a = A \cdot \exp(-\gamma^2 \omega^2 (t - t_0)^2) \cdot \sin(\omega(t - t_0) + \varphi),$$

де A – максимум амплітуди, t_0 – час, що відповідає максимуму амплітуди, γ – показник тривалості імпульсу, φ – початкова фаза коливання.

Інколи замість γ використовують число n коливань із амплітудами, що перевищують 0,1 (20 дБ) від максимального значення:

$$n = 0,483 / \gamma.$$

На сьогоднішній день існують різні способи та методи вимірювання часу поширення ультразвуку в ОК, кожен з яких має свої переваги і недоліки, а також характеризується властивою йому граничною похибкою. Нижче наведена загальна класифікація методів вимірювання часу поширення ультразвуку:

- методи, засновані на прив'язці часових маркерів до амплітудних характеристик сигналу: метод фіксації перетину сигналу заданого порогового рівня (прив'язка до переднього фронту імпульсу); метод перетину нуля; метод слідкуючого порога; метод центру ваги імпульсу;
- методи, засновані на прив'язці до фазових характеристик сигналу: вимірювання різниці фаз у випадку неперервного збудження; метод нахилу фази у випадку імпульсних сигналів;
- методи, засновані на візуальному спостереженні луно-імпульсів на екрані осцилографа: накладення імпульсів; перекриття луно-імпульсів;
- метод автоциркуляції імпульсів;
- кореляційні методи.

Пороговий метод, при якому проміжок часу фіксується у момент перетину сигналами заданого порогового рівня, є найбільш простим. Прив'язка до переднього фронту імпульсу здійснюється за допомогою порогового пристрою, який спрацьовує при досягненні вхідним сигналом певного рівня (рівня дискримінації). В результаті генерується логічний імпульс, який фіксує момент появи сигналу, і, відповідно, момент реєстрації події приладом. Зрозуміло, що імпульси більшої амплітуди перетинатимуть рівень дискримінації раніше, ніж імпульси меншої амплітуди (рис. 7.3). Часова невизначеність при використанні прив'язки до переднього фронту у першу чергу залежить від динамічного діапазону вхідних імпульсів, тому рівень дискримінації намагаються встановити якомога нижче, але вище рівня шумів.

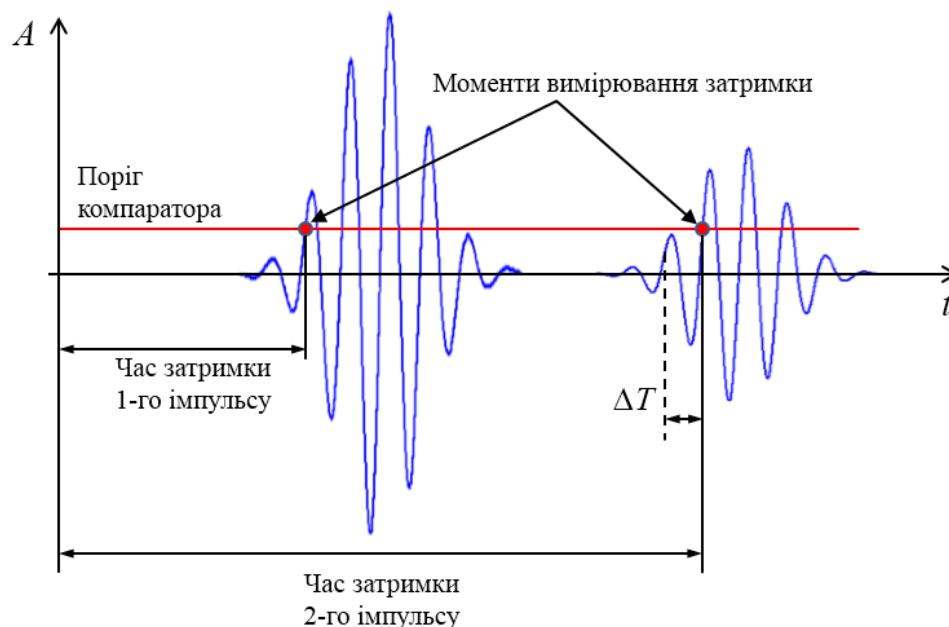


Рис. 7.3. Вимірювання часової затримки з використанням порогового рівня:
 ΔT – похибка вимірювання, обумовлена малою амплітудою прийнятого сигналу
 (вимірювання відбувається не по першому додатному півперіоду, а по другому)

Щоб зменшити похибку, обумовлену різною амплітудою прийнятих сигналів в залежності від пройденого шляху, у товщиномірах використовують схему автоматичного регулювання підсилення, основна задача якої вивести амплітуду сигналів з будь-якої глибини на однаковий рівень.

Для вимірювання часової затримки також використовується **метод перетину нуля** (zero-crossing method, crossover timing method). Ідея методу полягає в тому, що

як тільки прийнятий імпульс перевищує пороговий рівень, прилад фіксує цей момент, проте саме вимірювання затримки проводиться в момент першого переходу через нульове значення після моменту виявлення сигналу (рис. 7.4). Головна перевага цього методу вимірювань полягає в тому, що знайдений час затримки не залежить від амплітуди сигналу. Якщо сигнал перевищив пороговий рівень, вимірювання відбувається автоматично. Таким чином, пристрої, що використовують цей спосіб часової прив'язки, можуть працювати в істотно ширшому динамічному діапазоні, ніж при використанні прив'язки до переднього фронту. Основним чинником, що визначає часову невизначеність методу перетину нуля, є шуми.

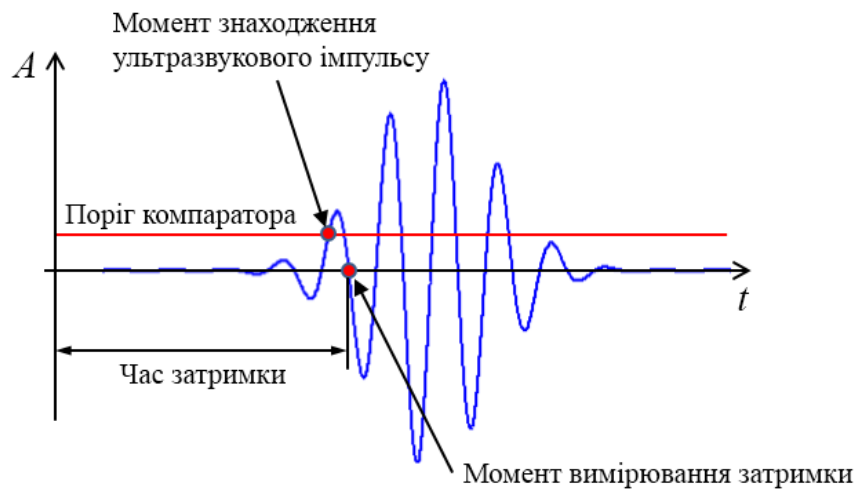


Рис. 7.4. Вимірювання часової затримки методом перетину нуля

Той факт, що час затримки вимірюється не у момент перетину імпульсом порогового рівня, а через певну частину періоду при перетині нуля, призводить до появи систематичної похибки. Проте цієї похибки позбавляються під час операції установки нуля датчика.

Для заданої форми імпульсу, що надходить на схему часової прив'язки, існує оптимальний для точності часової прив'язки рівень дискримінації, коли крутизна фронту імпульсу максимальна (це відбувається, коли сигнал досягає певної частини амплітуди). Цей рівень різний для імпульсів різної амплітуди. Таким чином, якщо для кожного імпульсу встановлювати свій поріг, можна досягти оптимальних результатів. Ця ідея лежить в основі **методу слідкуючого порогу** (constant-fraction timing). Насправді ж змінюється не поріг, а прив'язка здійснюється до нуля певним

чином сформованого біполярного імпульсу. Вхідний сигнал із амплітудою U_c паралельно подається на два вимірювальних плеча. В одному він затримується на час t_d , а в іншому інвертується і послаблюється в N ($N < 1$) разів. Потім ці сигнали додаються. У результаті формується біполярний сигнал, перетин нуля яким служить для отримання часової мітки. Коефіцієнт ослаблення N визначає частку амплітуди, оптимальну для вимірювання часової затримки. Час затримки вибирається з наступного співвідношення:

$$t_d > t_r(1 - N),$$

де t_r – час наростання фронту вхідного сигналу.

Час перетину нуля сформованим біполярним сигналом визначається як:

$$t_{cft} = t_d + Nt_r.$$

Вибір того чи іншого методу вимірювання часової затримки впливає на формування загальної похибки вимірювання товщини. Загалом, важливою вимогою до товщиномірів є висока точність вимірювання, яка визначається величинами похибок, що виникають в процесі контролю. Класифікація похибок вимірювань може здійснюватися за різними класифікаційними ознаками, наприклад:

- за джерелами виникнення (інструментальні, методичні та суб'єктивні похибки);
- за характером прояву або зміни від вимірювання до вимірювання (випадкові, систематичні та грубі);
- за значущістю (значущі, нехтово малі);
- за причинами, що пов'язані з режимом вимірювання (статичні і динамічні);
- за рівнем наявної інформації (визначені і невизначені);
- за формами вираження (абсолютні, відносні та приведені похибки);
- за формами використовуваних оцінок (середньоквадратичне значення, довірчі границі похибки тощо).

Випадкова складова похибки при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини змінюється випадковим чином. Зазвичай вона є наслідком одночасної дії багатьох незалежних чинників, кожний з яких окремо мало впливає на результат вимірювання. Випадкові похибки не можуть бути виключені з результату

вимірювання, але теорія ймовірності та математична статистика дають змогу оцінити результат вимірювання при наявності випадкових похибок.

Систематична похибка – складова похибки вимірювання, що залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. За характером прояву систематичні похибки поділяються на постійні та змінні. Змінні в свою чергу можуть бути прогресуючими, періодичними і мінливими за складним законом. Для виключення систематичної похибки найбільшого поширення в практиці вимірювань отримав метод поправок. Очевидно, що повне виключення систематичних похибок практично неможливо, якась частина похибок залишається неусунутими, тому виникає потреба визначати межі довірчого інтервалу невиключених залишків систематичної похибки (або невиключеної систематичної похибки).

Невиключена систематична похибка – складова похибки результату вимірювань, обумовлена похибками обчислення і введення поправок на вплив систематичних похибок або систематичною похибкою, поправка на дію якої не введена внаслідок певних причин, наприклад, її малості.

Похибка вимірювань ультразвукового товщиноміра в кожному конкретному випадку визначається багатьма чинниками. Похибки вимірювання товщини можна розділити на дві групи: основна похибка товщиноміра та додаткові похибки.

Основна похибка товщиноміра ΔH_s містить в собі в загальному випадку як систематичні, так і випадкові складові. Вона обумовлюється похибкою формування вимірювального інтервалу (тобто, залежить від обраного методу вимірювання часової затримки) та похибкою аналого-цифрового перетворення. Також складовою основної похибки є похибка, обумовлена наближеними розрахунками (за характером прояву її можна віднести до систематичної). Абсолютне значення основної похибки вказується в паспортних даних на товщиномір як індивідуальна метрологічна характеристика, але треба враховувати, що розраховується це значення для певного матеріалу (найчастіше для сталі) з відомою швидкістю ультразвуку.

Якщо для засобів вимірювання в якості вихідних даних використовуються індивідуальні метрологічні характеристики, такі як найбільша за абсолютною величиною межа допустимого значення основної похибки, і немає підстав вважати, що закон розподілу цієї похибки є несиметричним або полімодальним, то допускається для розрахунків СКВ даної похибки використовувати наступний вираз:

$$\sigma_{\text{осн}} = \frac{\Delta_{\text{осн}}}{\sqrt{3}}, \quad (7.2)$$

де $\sigma_{\text{осн}}$ – межа допустимого СКВ основної похибки, $\Delta_{\text{осн}}$ – найбільше можливе за абсолютною величиною значення основної похибки.

Формула (7.2) характеризує СКВ рівномірного закону розподілу за умови, що значення похибки із однаковою ймовірністю можуть знаходитись в межах від $-\Delta_{\text{осн}}$ до $+\Delta_{\text{осн}}$ (рис. 7.5)

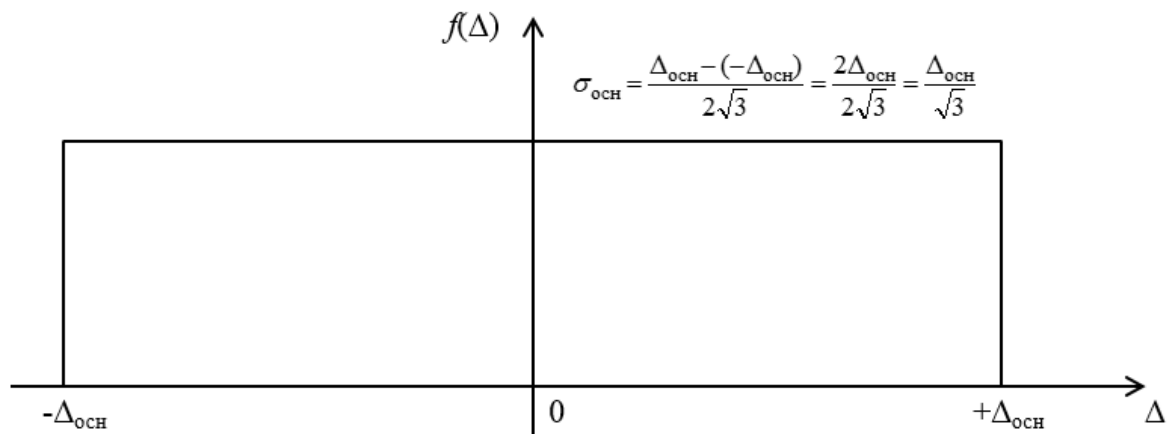


Рис. 7.5. Крива щільності ймовірності симетричного рівномірного закону розподілу

Додатковою похибкою вимірювання називають зміну загальної похибки, обумовлену відхиленням однієї із величин, що впливають на результат, від її нормативного значення або виходом її за межі нормальної області значень. Додаткова похибка може бути викликана зміною відразу декількох чинників. Розглянемо докладніше додаткові похибки вимірювання товщини.

Як зазначалось вище, ультразвукові товщиноміри вимірюють час поширення ультразвуку в ОК, після чого для луно-імпульсного методу за формулою (7.1) розраховується товщина ОК. Причому величина швидкості C у формулі (7.1)

визначається найчастіше під час калібрування приладу на еталонному зразку або за табличними даними для певного типу матеріалу, після чого записується в пам'ять приладу. У такому випадку результат вимірювання товщини на реальному зразку залежить як від точності вимірювання часу поширення ультразвуку, так і від відповідності записаного в пам'ять приладу значення швидкості реальному значенню швидкості конкретного зразка. Таким чином, при вимірюванні товщини ОК після проведеного попереднього калібрування приладу на еталонному зразку виникатиме складова похибки за рахунок варіації швидкості ультразвуку в ОК по відношенню до швидкості ультразвуку в еталоні:

$$H = \frac{C_{\text{ок}} T}{2} = \frac{(C_{\text{ет}} \pm \Delta C) T}{2} = \frac{C_{\text{ет}} T}{2} \pm \frac{\Delta C T}{2},$$

де $C_{\text{ет}}$ – швидкість, записана в пам'яті товщиноміра, $C_{\text{ок}}$ – реальна швидкість ультразвуку в ОК, ΔC – різниця між швидкістю в еталоні та реальною швидкістю ультразвуку в ОК.

Отже, абсолютне значення похибки, що обумовлена невідповідністю швидкості в еталоні до швидкості ОК, визначатиметься як:

$$\Delta H_C = \pm H \frac{\Delta C}{C_{\text{ет}}}.$$

Похибка ΔH_C є систематичною. Вона може бути виключена за рахунок підбору еталонного зразка з ідентичними характеристиками по відношенню до ОК.

Також необхідно враховувати, що до появи похибки може призводити зміна швидкості ультразвуку в самому ОК залежно від температури, при якій виконуються вимірювання товщини (див. **Додаток Ж**). Ця похибка визначається як:

$$\Delta H_T = \pm H \frac{\Delta C(T, ^\circ\text{C})}{C_{\text{ок}}},$$

де $\Delta C(T, ^\circ\text{C})$ – зміна швидкості, обумовлена зміною температури.

Похибка ΔH_T є систематичною. При вимірюванні в нормальних умовах похибку ΔH_T можна не враховувати. З іншого боку її можна компенсувати програмно, якщо відома залежність швидкості ультразвуку від температури для заданого матеріалу.

Якщо між ПЕП та ОК розташовується шар контактної рідини товщиною $h_{кр}$ (рис. 7.6), то він створює додаткову затримку ультразвукових хвиль $\Delta t_{кр}$. Затримка визначається подвійним проходженням хвиль через шар рідини (один раз при випромінюванні зондувального імпульсу, другий – при прийманні донного луно-сигналу):

$$\Delta t_{кр} = 2 \frac{h_{кр}}{C_{кр}},$$

де $C_{кр}$ – швидкість звуку в контактній рідині.

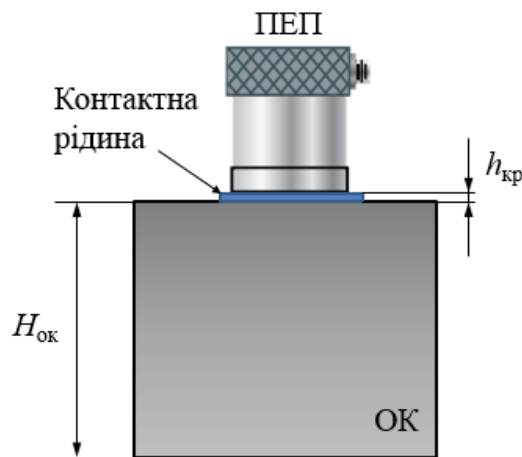


Рис. 7.6. Вплив шару контактної рідини на формування похибки

Похибка, обумовлена шаром контактної рідини, визначається як:

$$\Delta H_{кр} = 2h_{кр} \frac{C_{ок}}{C_{кр}}.$$

Очевидно, що для отримання високої точності вимірювань потрібно зменшувати товщину шару контактної рідини. В реальних умовах повному витискуванню рідини з-під ПЕП перешкоджає капілярний ефект. Навіть при ретельній шліфовці зразків і робочого торця ПЕП шар контактної рідини, який все ж залишається, створює похибку близько 0,02-0,04 мм.

Похибка $\Delta H_{кр}$ може стати систематичною за умови стабілізації $h_{кр}$, у такому випадку її можна легко компенсувати за рахунок введення відповідних поправок під час калібрування приладу. Однак при проведенні ручного сканування сила притискання датчика до поверхні ОК (що безпосередньо впливає на товщину контактного шару) обумовлюється виключно оператором, а отже не може бути

сталою. До того ж товщина контактної рідини обумовлюватиметься в'язкістю та капілярними властивостями використовуваної для забезпечення акустичного контакту речовини. В різних точках вимірювання на поверхні ОК в різні моменти часу виникатимуть різні товщини шару контактної рідини; та навіть в одній і тій же точці на поверхні ОК при багатократному вимірюванні в різні моменти часу неможливо забезпечити стабільність товщини шару контактної рідини в режимі ручного контролю. У такому випадку можна стверджувати, що похибка $\Delta H_{кр}$ за джерелом виникнення при ручному контролі є суб'єктивною і носить випадковий характер. В першому наближенні можна припустити, що закон розподілу даної похибки відповідатиме рівномірному.

Інтервал зміни даної похибки лежить у межах від 0 (повна відсутність контактної рідини) до значення $\Delta H_{кр\max}$, яке залежить від максимальної товщини контактної рідини $h_{кр\max}$ для заданих умов контролю. Величину $h_{кр\max}$ можна визначити з умови:

$$h_{кр\max} < \frac{\lambda_{кр}}{2}, \quad (7.3)$$

де $\lambda_{кр}$ — довжина хвилі в шарі контактної рідини.

Умова (7.3) вибрана з наступних міркувань: спосіб введення УЗК в ОК при товщині контактної рідини, яка співмірна із довжиною хвилі, вже не буде контактним, а стане так званим щільним.

Додаткова похибка від проміжного шару між ПЕП і виробом типова при вимірюваннях через шар фарби. Потрібно зазначити, що швидкість ультразвуку в лаках і фарбах більша, ніж в рідинах (орієнтовно 2200-3500 м/с), тому тонкий шар покриття менше позначається на вимірюваннях, ніж у випадку з рідинами.

Якість зачистки поверхні введення ультразвуку також обумовлює похибку. При проходженні ультразвукових хвиль через шорстку поверхню, яка залита контактною рідиною, частина хвиль безпосередньо проходить у матеріал виробу, а частина пробігає прошарок контактної рідини (рис. 7.7). Хвилі затримуються на деякий сумарний час $\Delta t_{ш}$. Прилад вимірює товщину з додатковою похибкою $\Delta H_{ш}$. Величина похибки залежить не тільки від висоти піків шорсткості, але і від форми

шорсткості, і від її типу – регулярна або стохастична шорсткість. Регулярна шорстка поверхня виходить після фрезерної або токарної обробки, а стохастична поверхня – після зачистки шкуркою або шліфувальним каменем.

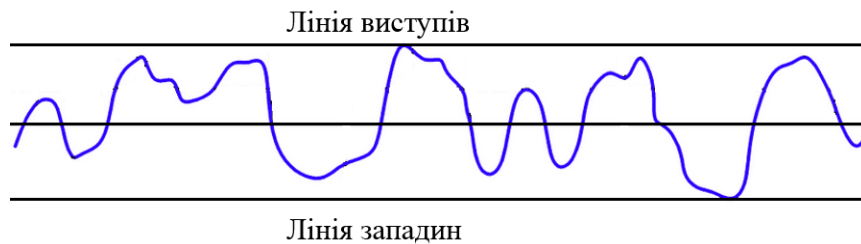


Рис. 7.7. Узагальнений вигляд профілю шорсткої поверхні

Наближено похибку від шорсткості поверхні введення можна розрахувати як:

$$\Delta H_{\text{ш}} = \frac{Rz}{2} \cdot \frac{C_{\text{ок}}}{C_{\text{кр}}},$$

де Rz – шорсткість поверхні введення ультразвуку.

Донна поверхня, від якої відбивається хвиля, також може бути шорсткою (або пошкодженою корозією), що теж обумовлює появу похибки. Якщо вважати, що донна поверхня суха, то похибка визначатиметься величиною шорсткості:

$$\Delta H_{Rz} = Rz,$$

де Rz – шорсткість донної поверхні (або поверхні віддзеркалення ультразвуку)³⁰.

Вважатимемо, що похибки $\Delta H_{\text{ш}}$ та ΔH_{Rz} є випадковими, закон розподілу яких в першому наближенні відповідає рівномірному³¹.

Наступна похибка виникає у випадку, коли поверхні виробу не є плоскопаралельними, тобто поверхні введення та віддзеркалення ультразвуку розташовані під невеликим кутом φ (рис. 7.8). В даному випадку під реальною товщиною виробу H матимемо на увазі розмір виробу в місці проведення

³⁰ При шорсткості поверхні введення не гірше 40 мкм та збільшенні шорсткості поверхні віддзеркалення:

- з Rz 40 мкм до Rz 160 мкм рекомендується використовувати в якості вихідної величини значення $\pm 0,1$ мм;

- з Rz 160 мкм до Rz 320 мкм рекомендується використовувати в якості вихідної величини значення $\pm 0,2$ мм;

³¹ Сам же закон розподілу висот нерівностей шорсткої поверхні може бути або нормальним, або експоненційним, або трапецеподібним (з окремими випадками рівномірного та трикутного (Сімпсона) розподілів), або степеневим.

вимірювань, тобто під перетворювачем. Основний пучок ультразвукових хвиль ПЕП падає на донну поверхню в околі точки А. Оскільки поверхні не паралельні, основний пучок хвиль відбивається вбік і не потрапляє назад на перетворювач. Луно-сигнал від непаралельної донної поверхні формується променями, що падають на неї перпендикулярно (в околі точки В), тобто бічними променями ПЕП. Таким чином, прилад виміряє і покаже величину H_ϕ . Тому що $H_\phi < H$, похибка вимірювань буде від'ємною, тобто прилад буде показувати меншу величину, ніж H .

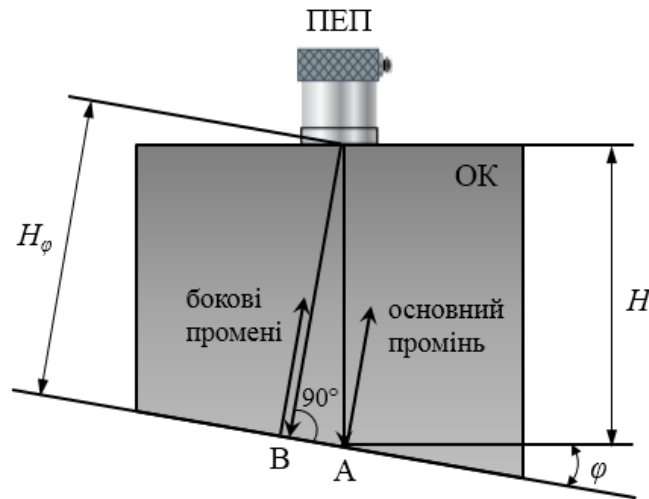


Рис. 7.8. Формування похибки при вимірювання товщини виробу з неплоскопаралельними поверхнями

Похибка, обумовлена непаралельністю поверхонь виробу, розраховується як:

$$\Delta H_\phi = H - H_\phi = \frac{H_\phi}{\cos \phi} - H_\phi = H_\phi \cdot \frac{1 - \cos \phi}{\cos \phi}.$$

Типові ПЕП мають ширину ДН близько 5-10°, тому що при більших кутах спостерігається різке зменшення інтенсивності ультразвукових хвиль. Тому достовірне вимірювання товщини виробів з непаралельними стінками можливо при кутах нахилу ϕ в межах 5-10°.

Похибка ΔH_ϕ є систематичною. У реальних умовах контролю врахувати її неможливо. При контролі об'єктів з плоскопаралельними стінками похибка ΔH_ϕ взагалі не враховується.

Ще одна складова додаткової похибки вимірювання товщини ΔH_r виникає у випадку, коли поверхня введення є криволінійною (наприклад, опуклою). Ця

похибка характерна при контролі товщини стінок труб. Тому що робочий торець ПЕП плоский, а поверхня труби циліндрична, то між ПЕП і трубою виникатиме нерівномірний зазор (рис. 7.9). Для забезпечення акустичного контакту зазор заповнюється контактною рідиною, а отже з'являється похибка від цього прошарку. З іншого боку у випадку контролю труби хвилі відбиваються теж від циліндричної поверхні (внутрішньої стінки труби). Опукла циліндрична поверхня розсіює ультразвуковий пучок, зменшуючи амплітуду луно-сигналу. Якщо товщина стінки невелика, позначається інтерференція хвиль в ближньому полі перетворювача. Перелічені складові похибки зростають зі зменшенням діаметра труби і зі зменшенням товщини стінки. Величина даної похибки вимірювань може досягати 1-2 мм.

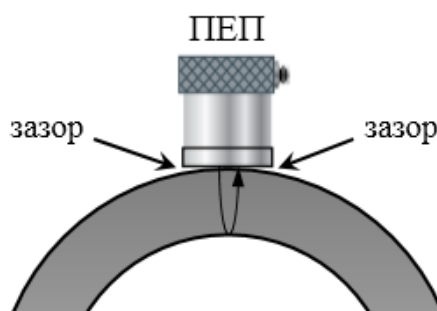


Рис. 7.9. Вимірювання товщини на криволінійних поверхнях

Загалом похибка ΔH_r є випадковою. Але якщо перетворювач встановлювати на трубу однакою чином та фіксувати, то загальна похибка ΔH_r стане систематичною. Для фіксації плоских ПЕП на трубі часто використовують спеціальну оправку, яка охоплює перетворювач і позиціонує його на поверхні труби. Очевидно, що дану похибку можна практично виключити, якщо виконувати налаштування приладу за зразком, виготовленим з такого ж типорозміру труби. При контролі об'єктів з плоскопаралельними стінками похибка ΔH_r взагалі не враховується.

На результат вимірювання товщини також впливає похибка, обумовлена дискретністю відліку цифрового індикатора ΔH_d . Ця похибка є випадковою і розподілена за рівномірним законом, причому її значення лежать в інтервалі $[-\Delta H_d/2; \Delta H_d/2]$.

Таким чином, в загальному випадку результат вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміра із урахуванням всіх похибок може бути представлений в наступному вигляді:

$$H_{\text{вим}} = H_0 + \Delta H_{\text{сист}} \pm \Delta H_{\text{вип}},$$

де $H_{\text{вим}}$ – виміряна товщина ОК (показання товщиноміра), H_0 – дійсна товщина виробу, $\Delta H_{\text{сист}}$ – загальна систематична похибка (може бути як додатною, так і від’ємною – у формулі це не показано), $\Delta H_{\text{вип}}$ – максимальна межа загальної випадкової похибки вимірювання, що характеризується своїм СКВ.

Систематичні похибки можуть бути повністю усунені при правильному налаштуванні (калібруванні) приладу до початку вимірювання товщини або за допомогою введення поправок, або під час самого процесу вимірювання з урахуванням їх функціональних залежностей. У такому випадку вплив систематичних похибок можна не враховувати.

Тоді загальна похибка вимірювання буде визначатись тільки випадковими похибками та невиключеними систематичними похибками, які розглядаються як випадкові величини.

СКВ загальної похибки вимірювання розраховують за формулою:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{i\text{вип}}^2 + \sum_{j=1}^m \sigma_{j\text{нсп}}^2},$$

де $\sigma_{i\text{вип}}$ – СКВ i -ї випадкової похибки (сюди входить як основна похибка, так і додаткові), $\sigma_{j\text{нсп}}$ – СКВ j -ї невиключеної систематичної похибки.

Тому що всі джерела похибок мають різну природу, то всі вхідні величини можна вважати некорельованими (незалежними). Згідно центральної граничної теореми теорії ймовірностей сума великої кількості незалежних випадкових величин, кожна з яких не домінує над іншими, підкоряється нормальному (гаусовому) розподілу ймовірностей. Тобто, можна припустити, що загальна похибка вимірювання товщини розподілена за нормальним законом. У такому випадку можемо розрахувати довірчі межі загальної похибки вимірювання товщини (або розширену невизначеність):

$$\Delta_{\Sigma} = k \cdot \sigma_{\Sigma},$$

де k – коефіцієнт охоплення (див. табл. 7.1).

*Таблиця 7.1. Залежність коефіцієнту охоплення k від вірогідності P
для нормального закону розподілу*

P	0,683	0,866	0,890	0,955	0,972	0,984	0,988	0,990	0,997
k	1,0	1,5	1,6	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	3,0

Так, наприклад, якщо необхідно розрахувати довірчі межі загальної похибки для вірогідності $P=0,955$ (або 95,5 %), то необхідно вибрати коефіцієнт $k=2$.

В результаті невідома товщина визначатиметься як (за умови, що всі систематичні похибки виключені):

$$H_x = H_{\text{вим}} \pm \Delta_{\Sigma}.$$

Насправді аналітичний розрахунок сумарної похибки луно-імпульсного товщиноміра через різноманіття її джерел, а також через суперечливі і часом взаємовиключні засоби її зменшення, вкрай утруднений. Тому реальну похибку товщиномірів оцінюють експериментально на стандартних зразках товщини, кривизни, клиноподібності і шорсткості, що спеціально атестовані повіреними механічними і оптичними приладами.

7.2. Методи ультразвукової дефектоскопії

Ультразвукова дефектоскопія – група методів дефектоскопії, в яких використовують проникаючу здатність пружних хвиль ультразвукового діапазону частот. Ультразвукова дефектоскопія – один з найбільш універсальних способів неруйнівного контролю, що дає змогу виявляти поверхневі і глибинні дефекти (тріщини, раковини, розшарування тощо) в металевих і неметалевих матеріалах, визначати зони корозії металів та ін.

Методи ультразвукової дефектоскопії використовують хвилі малої амплітуди. Це розділ лінійної акустики, де акустичний тиск пропорційний деформації. Коливання з великими амплітудами або інтенсивностями, де така пропорційність відсутня, відноситься до нелінійної акустики.

Методи ультразвукової дефектоскопії засновані на реєстрації віддзеркалених від дефектів акустичних коливань і подальшого аналізу їх амплітуди, часу приходу, форми та інших характеристик за допомогою спеціалізованого обладнання. Віддзеркалення ультразвукової хвилі від дефекту може бути двох основних типів: *дифузне* або *дзеркальне*. Якщо нерівності поверхні віддзеркалення будуть багато менші довжини хвилі в ОК, то хвиля відбиватиметься під тим же кутом, що і падає. Така поверхня називається дзеркальною. Якщо нерівності поверхні віддзеркалення співмірні з довжиною хвилі, то віддзеркалення буде дифузним, при якому віддзеркалена хвиля розсіюється в різні сторони під різними кутами. Це обумовлює той факт, що при падінні ультразвукового променя під деяким кутом до межі поділу середовищ інтенсивність хвилі, віддзеркаленої у напрямку до перетворювача, буде тим більшою, чим більші нерівності поверхні віддзеркалення (рис. 7.10).

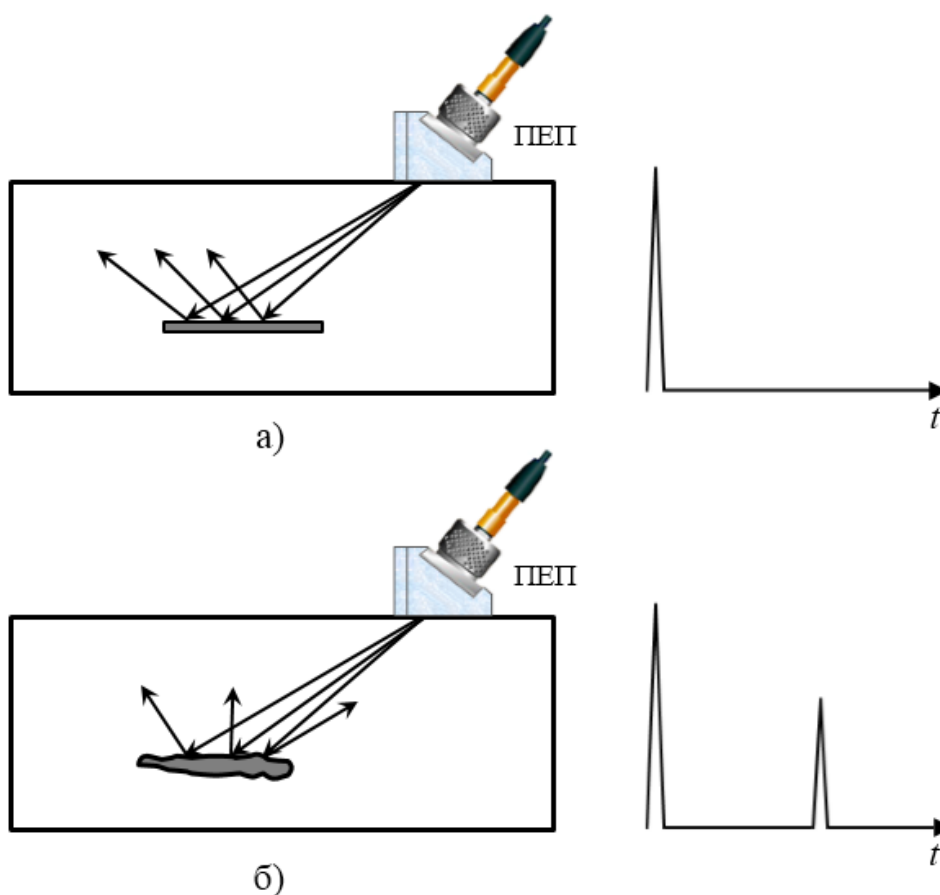


Рис. 7.10. Віддзеркалення променя від дефекту: а) дзеркальне; б) дифузне

Дифузне віддзеркалення здебільшого виникає на об'ємних дефектах типу пор та шлаків. Дзеркальне відбиття дають площинні плоскі дефекти типу розшарувань, тріщин, непроварів у зварних швах. Об'ємні дефекти задовільно виявляються суміщеним перетворювачем незалежно від напрямку падіння ультразвукової хвилі. Від площинних дефектів великі луно-сигнали спостерігають тільки за сприятливих (дзеркальних) умов відбиття.

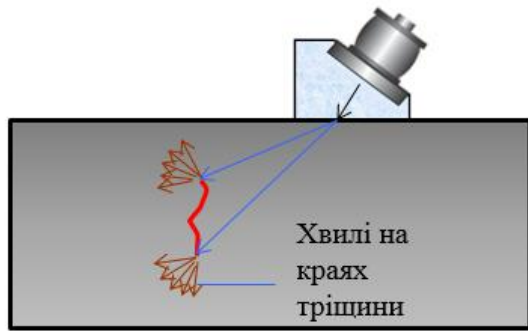
На взаємодію ультразвукової хвилі з дефектом впливає явище дифракції. В ультразвуковій дефектоскопії виділяють чотири типи такої взаємодії (рис. 7.11):

1. Дифракція першого типу виникає при взаємодії ультразвукової хвилі з гострими краями тріщин. У цьому випадку край тріщини стає вторинним випромінювачем (тобто, працює як точкове джерело) і збуджує сферичну хвилю. Внаслідок цього тріщина, навіть якщо вона несприятливо орієнтована по відношенню до променя, при достатній чутливості може бути виявлена під час ультразвукового контролю.

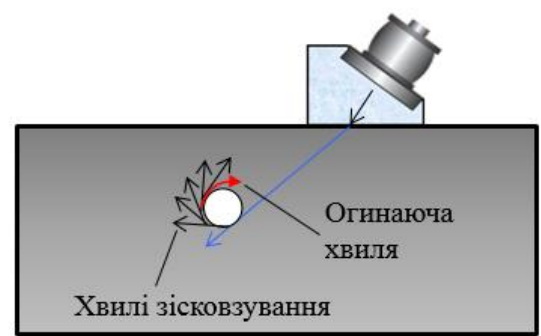
2. Другий тип дифракції має місце в тих зонах ОК, де ультразвукові промені дотикаються гладких поверхонь. У цьому випадку формуються хвилі, що огинають поверхні тіл (наприклад, круглі отвори), які в свою чергу породжують дифракційні хвилі зісковзування.

3. Третім типом дифракції називають явища, що виникають при падінні хвиль на межу поділу двох середовищ або на вільну межу середовища під першим, другим або третім критичними кутами. При цьому утворюються головні хвилі, які в свою чергу породжують сімейство дифракційних бічних хвиль в обох середовищах.

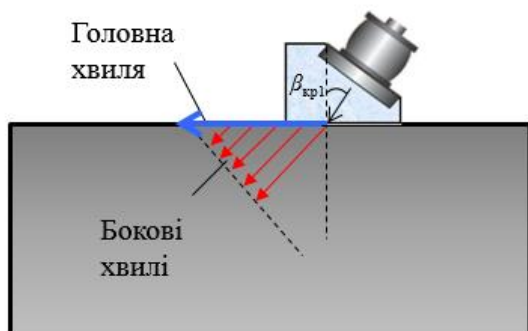
4. Четвертий тип дифракції виникає у тих випадках, коли в середовищі ОК є шари з різними швидкостями ультразвукової хвилі. При похилому падінні хвилі на межі поділу таких шарів промені відхиляються від прямолінійного напрямку поширення. Це явище відоме під назвою рефракції. Цей тип дифракції знайшов практичне застосування для вимірювання товщини поверхнево-загартованих шарів металу, наприклад, у валках холодної прокатки, де в поверхневому шарі має місце зміна швидкості ультразвуку залежно від глибини шару.



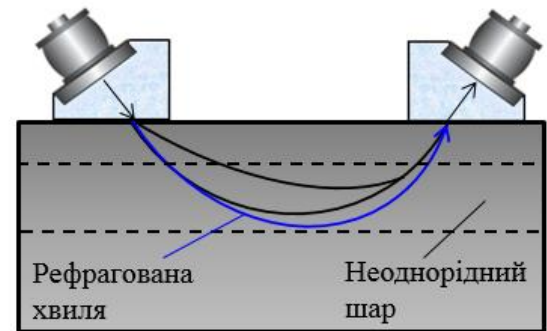
а)



б)



в)



г)

Рис. 7.11. Типи дифракції: а) дифракція першого типу; б) дифракція другого типу; в) дифракція третього типу; г) дифракція четвертого типу

Під час ідентифікації дефектів зазвичай використовують наступний набір вимірюваних характеристик:

- 1) координати дефекту;
- 2) амплітуда луно-сигналу, що пропорційна розміру дефекту в площині, перпендикулярній осі ультразвукового пучка;
- 3) умовна протяжність, що обумовлена довжиною зони переміщення перетворювача, в межах якої фіксується луно-сигнал від виявленого дефекту;
- 4) умовна висота, що обумовлена різницею глибин, вимірюваних в крайніх положеннях перетворювача (вимірюють тільки при контролі похилим перетворювачем). Крайніми положеннями перетворювача при цьому є положення, що відповідають появі і зникненню луно-сигналу від дефекту на розгортці дефектоскопа;

5) кількість дефектів, що припадають на одиницю довжини;

6) умовна найменша відстань між дефектами, що вимірюється довжиною зони, в межах якої не фіксуються луно-сигнали від виявлених дефектів.

Під час проведення ультразвукової дефектоскопії хвилі можуть випромінюватися і поширюватися у неперервному режимі, у вигляді коливань різної тривалості і шпаруватості та у вигляді коротких імпульсів.

Для пошуку дефектів в ОК найчастіше використовується луно-імпульсний метод дефектоскопії, який заснований на прозвучуванні виробу короткими імпульсами ультразвукових коливань і реєстрації луно-сигналів, що віддзеркалюються від дефектів (рис. 7.12). Випромінюваний імпульс 1 називається зондувальним. Імпульс 2, віддзеркалений від протилежної поверхні виробу, називають донним. За наявності у виробі дефекту з'являється проміжний імпульс 3, розташований між зондувальним та донним імпульсами.

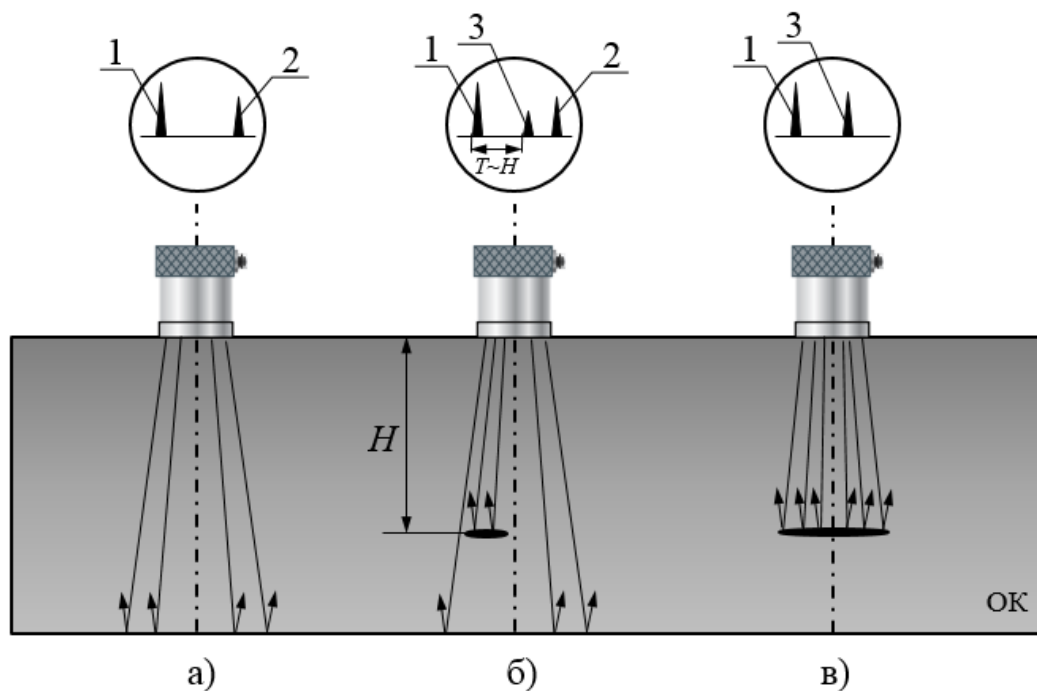


Рис. 7.12. Схема прозвучування луно-імпульсним методом:

- а) формування донного імпульсу; б) формування імпульсу від дефекту;
в) «затінений» донний імпульс

По розташуванню імпульсу від дефекту на лінії розгортки екрану дефектоскопу і його амплітуді судять про глибину залягання дефекту та його

розміри. Оскільки поява імпульсу уздовж розгортки пропорційна пройденому ультразвуком часу T , то відстань до дефекту H , тобто глибина його залягання, розраховується за формулою (7.1).

Ультразвукова дефектоскопія здійснюється як за допомогою поздовжніх хвиль (при нормальному введенні³²), так і за допомогою поперечних, поверхневих або нормальних хвиль (при похилому введенні).

При ультразвуковому контролі похилим перетворювачем місцезнаходження дефекту у виробі визначають дві координати: глибина H залягання дефекту і відстань L від центру випромінювання перетворювача до дефекту уздовж поверхні виробу (рис. 7.13).

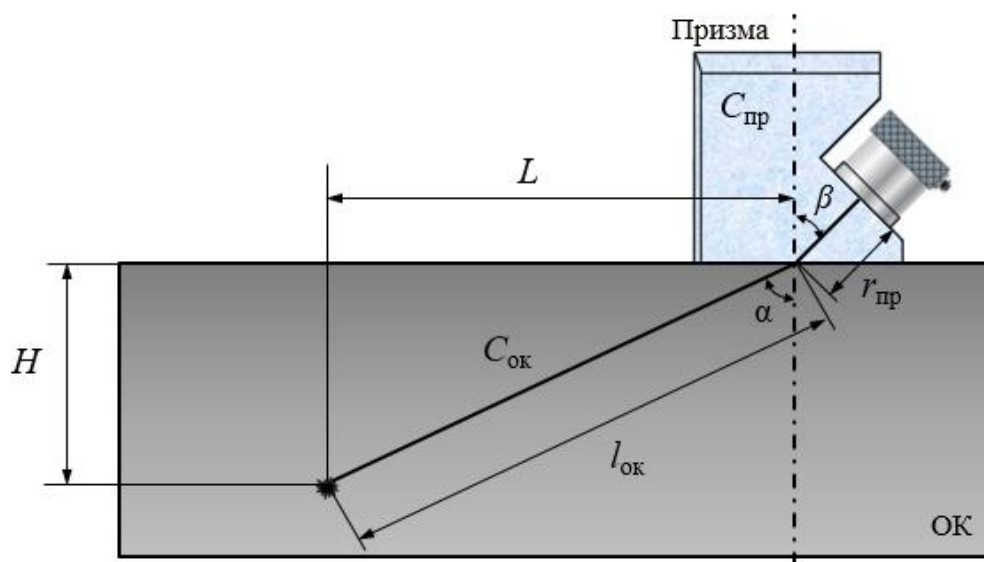


Рис. 7.13. Променева картина при похилому введенні ультразвуку

Глибиномір дефектоскопу дає змогу вимірювати загальний часовий інтервал T між зондувальним імпульсом і луно-сигналом від дефекту. При відомих швидкостях ультразвуку у виробі і призмі та відомому куті введення по виміряному часу T можна визначити H та L .

Для похилого перетворювача (див. рис. 7.13) H та L розраховуються як:

³² Можливі також варіанти, коли нормально вводяться поперечні хвилі, проте для цього необхідно розробити спеціальну конструкцію перетворювача, який би включав як мінімум дві призми (одна, наприклад, з оргскла, а інша – з матеріалу, подібного або близького по акустичним характеристикам до матеріалу ОК), на межі між якими відбувалася б трансформація хвиль.

$$H = \frac{(T - T_{\text{пр}}) \cdot C_{\text{ок}}}{2} \cdot \cos \alpha = \frac{(T - \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}) \cdot C_{\text{ок}}}{2} \cdot \cos \alpha ,$$

$$L = \frac{(T - T_{\text{пр}}) \cdot C_{\text{ок}}}{2} \cdot \sin \alpha = \frac{(T - \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}) \cdot C_{\text{ок}}}{2} \cdot \sin \alpha ,$$

де $T_{\text{пр}}$ – час проходження сигналу в призмі, $r_{\text{пр}}$ – геометрична довжина акустичної затримки (призми); α – кут введення; $C_{\text{пр}}$ – швидкість поширення повздовжніх хвиль в призмі; $C_{\text{ок}}$ – швидкість поширення хвиль у виробі (або поздовжніх, або поперечних в залежності від кута введення).

Якщо використовується прямий перетворювач із лінією затримки (рис. 7.14), то глибина залягання дефекту розраховується як:

$$H = (T - T_{\text{пр}}) \frac{C_{\text{лок}}}{2} = \left(T - \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}} \right) \cdot \frac{C_{\text{лок}}}{2} ,$$

де $T_{\text{пр}}$ – час проходження ультразвуку через акустичну затримку в прямому і зворотному напрямках (при випромінюванні і прийманні), $C_{\text{лок}}$ – швидкість поширення поздовжніх хвиль у виробі.

Очевидно, що при використанні прямого перетворювача параметр L дорівнює нулю.

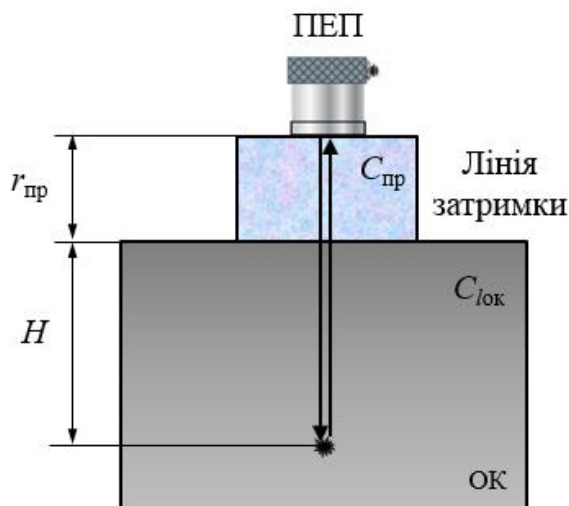


Рис. 7.14. Променева картина при нормальному введенні через лінію затримки

Про розміри дефектів судять по амплітуді віддзеркаленого сигналу. В ультразвуковій дефектоскопії користуються відносним методом визначення амплітуди, який полягає в порівнянні луно-сигналу від дефекту з опорним сигналом, отриманим тим же перетворювачем від відбивача відомої величини і геометричної форми.

Як уніфіковану одиницю вимірювання величини дефекту використовують еквівалентну площу дефекту (еквівалентний діаметр). Еквівалентну площу $S_{\text{декв}}$ дефекту вимірюють площею дна плоскодонного отвору, розташованого на тій же глибині, що і дефект, який дає ту ж саму амплітуду сигналу, що і дефект.

Під час роботи в луно-імпульсному режимі після випромінювання перетворювач приймає луно від відбивача через проміжок часу, рівний подвоєному часу пробігу до відбивача. Вважається, що електрична напруга, виміряна як висота луно-сигналу, пропорційна площі, на яку впала хвиля, і звуковому тиску. Якби на рис. 7.15а випромінювана хвиля в її плоскій частині поверталася б назад від дуже великого відбивача (відповідного діаметру самого випромінювача), то вона приходила б практично повністю, тобто висота луно-сигналу склала б A_0 . Проте від відбивача меншої площі (рис. 7.15б) повертається тільки хвиля, відповідна цій меншій площі, яка і дасть луно-сигнал заввишки A_d . Відношення амплітуд обох цих луно-сигналів очевидно відповідає відношенню площ відбивача і випромінювача:

$$\frac{A_d}{A_0} = \frac{S_d}{S_{\text{пеп}}}.$$

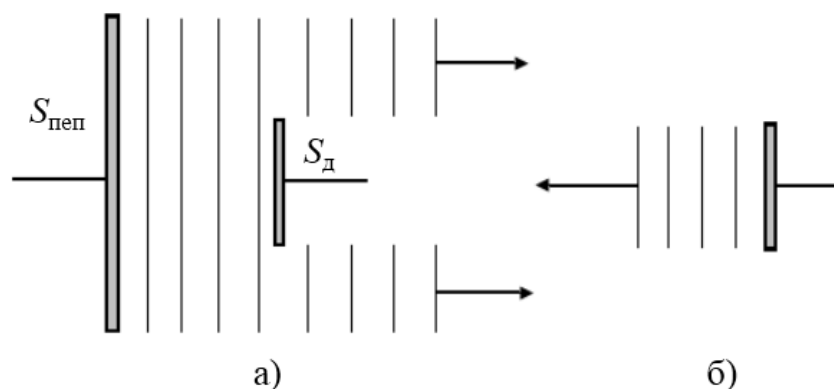


Рис. 7.15. Поширення та віддзеркалення хвилі: а) плоский відбивач в полі плоскої хвилі; б) одна віддзеркалена плоска хвиля

Луно-сигнал A_0 є важливим віддзеркаленим сигналом, з яким проводиться порівняння. На практиці його отримують як луну від задньої стінки бездефектної пластини з того ж матеріалу, що і зразок, де оцінюється луно-сигнал від дефекту. Площа перетворювача $S_{\text{пеп}}$ відома. Отже, якщо виміряти відношення луно-сигналу від відбивача і від задньої стінки, наприклад у вольтах, або висоту піків, що послідовно з'являються на екрані, то буде відома і площа відбивача (дефекту) S_d .

Застосовують два способи вимірювання еквівалентної площі дефектів: за допомогою випробувальних зразків та по АВД-діаграмі (сімейству безрозмірних кривих «Амплітуда - Відстань - Діаметр»). Перший спосіб вимагає великої кількості зразків з широким набором плоскодонних відбивачів по діаметру і глибині залягання, виготовлених з того ж матеріалу, що і ОК.

Важливо пам'ятати, що амплітуда прийнятого сигналу при проведенні ультразвукової дефектоскопії залежить не тільки від розмірів (ефективної площі) дефекту, але й від глибини його залягання. Таким чином, по амплітуді прийнятого сигналу неможливо однозначно сказати, чим вона обумовлена – згасанням хвилі при проходженні певної відстані або розмірами дефекту. У такому випадку виникає невизначеність. Щоби уникнути цієї невизначеності в ультразвукових дефектоскопах використовують схему часового регулювання чутливості (англ. time gain compensation (TGC)), яка дає змогу в загальному випадку компенсувати залежність амплітуди сигналу від відстані (часу).

Під час налаштування ЧРЧ спочатку в пам'ять дефектоскопа за правилами, що визначаються інструкцією з експлуатації даного типу приладу, вводять луно-сигнали від відбивачів, за якими проводять налаштування ЧРЧ. Потім за програмою, закладеною в дефектоскоп, прилад вирівнює чутливість в інтервалі відстаней від самого ближнього до найдальшого відбивача. Для полегшення налаштування і більшої наочності в сучасних дефектоскопах крива, що показує закон зміни ЧРЧ, може бути виведена на дисплей.

До основних параметрів луно-імпульсного методу ультразвукової дефектоскопії можна віднести наступні:

- довжина хвилі λ ;

- кут введення α ;
- глибина мертвої зони $h_{\text{мз}}$;
- фронтальна роздільна здатність (ширина θ кутового захоплення);
- роздільна здатність по глибині (дальності);
- чутливість.

Ці параметри методу визначаються наступними параметрами засобу контролю:

- робоча частота f_0 ;
- кут призми (падіння променя) β ;
- тривалість зондувального імпульсу τ_z і ревербераційних шумів $\tau_{\text{ш}}$;
- тип і розміри перетворювача;
- рівень налаштувань чутливості дефектоскопа за еталонним відбивачем.

При суміщеній схемі на вхід електронного тракту дефектоскопу крім луно-сигналу від виявлених дефектів надходить зондувальний імпульс. Якщо дефект у зоні під поверхнею розташований так, що луно-сигнал від нього повертається раніше, ніж завершиться випромінювання зондувального імпульсу, то дефект не буде виявлений (рис. 7.16). Зону під поверхнею, на якій встановлено перетворювач, і дефекти в якій не можуть бути виявлені луно-методом, називають **приповерхневою мертвою зоною** (або просто мертвою зоною). Глибина приповерхневої мертвої зони залежить від тривалості зондувального імпульсу $\tau_{\text{імп}}$, часу ревербераційних шумів $\tau_{\text{ш}}$, коефіцієнта підсилення електронного тракту після впливу зондувального імпульсу, а також від конструкції перетворювача. Глибина мертвої зони визначається з умови:

- для прямого перетворювача:

$$h_{\text{мз}} = \frac{C_{\text{ок}}(\tau_{\text{імп}} + \tau_{\text{ш}})}{2}. \quad (7.4)$$

- для похилого перетворювача:

$$h_{\text{мз}} = \frac{C_{\text{ок}}(\tau_{\text{імп}} + \tau_{\text{ш}} - 2T_{\text{пр}})}{2} \cos \alpha,$$

де $C_{\text{ок}}$ – швидкість поздовжньої хвилі у випадку використання прямого ПЕП (для похилого ПЕП може бути або швидкістю поздовжньої, або поперечної хвилі в

залежності від кута введення), $T_{\text{пр}}$ – час поширення хвилі в призмі, α – кут введення ультразвуку в ОК.

При $(\tau_{\text{імп}} + \tau_{\text{ш}}) < 2T_{\text{пр}}$, що має місце на практиці, мертва зона при роботі призматичних перетворювачів могла б бути відсутньою, якби ультразвукові коливання після багаторазових перевіддзеркалень у призмі повністю поглиналися і не поверталися на п'єзоперетворювач. Луно-сигнали, що з'являються після багаторазового віддзеркалення зондувального імпульсу в призмі датчика, роблять неможливою реєстрацію луно-сигналів від дефектів, розташованих близько від поверхні, створюючи тим самим мертво зону величиною в декілька міліметрів.

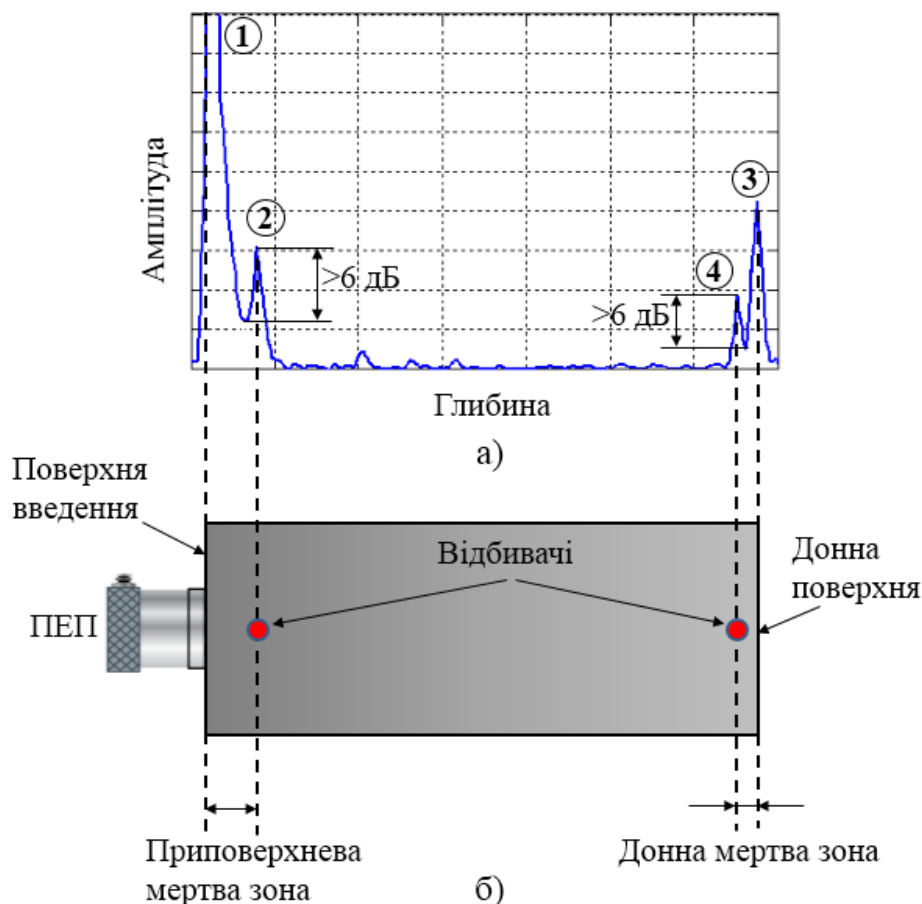


Рис. 7.16. Пояснення понять «приповерхневої» та «донної» мертвих зон: а) розподіл амплітуд прийнятих сигналів; б) положення відбивачів: 1 – зондувальний імпульс, 2 – луно-імпульс від підповерхневого дефекту, 3 – донний луно-імпульс, 4 – луно-імпульс від придонного дефекту

Окрім приповерхневої мертвої зони, яка обумовлена випромінюванням зондувального імпульсу ПЕП і не дає змоги виявляти підповерхневі дефекти, існує

також так звана **донна мертва зона**, яка являє собою мінімальну відстань між донною поверхнею та відбивачем заданого типу і розміру, що впевнено виявляється на фоні луно-сигналу від донної поверхні (див. рис. 7.16). Вважається, що впевнене роздільне виявлення двох сигналів досягається в тому випадку, коли вони розділяються «провалом» висотою не менше -6 дБ від амплітуди меншого з цих сигналів.

Одним з найважливіших параметрів луно-імпульсного методу ультразвукової дефектоскопії є роздільна здатність, як поперечна (фронтальна), так і поздовжня.

Під **фронтальною роздільною здатністю** розуміють мінімальну відстань Δl між двома однаковими за величиною точковими дефектами, що роздільно виявляються та залягають в ОК на однаковій глибині (рис. 7.17). Розрахунок значення фронтальної роздільної здатності залежить від зони акустичного поля ПЕП.

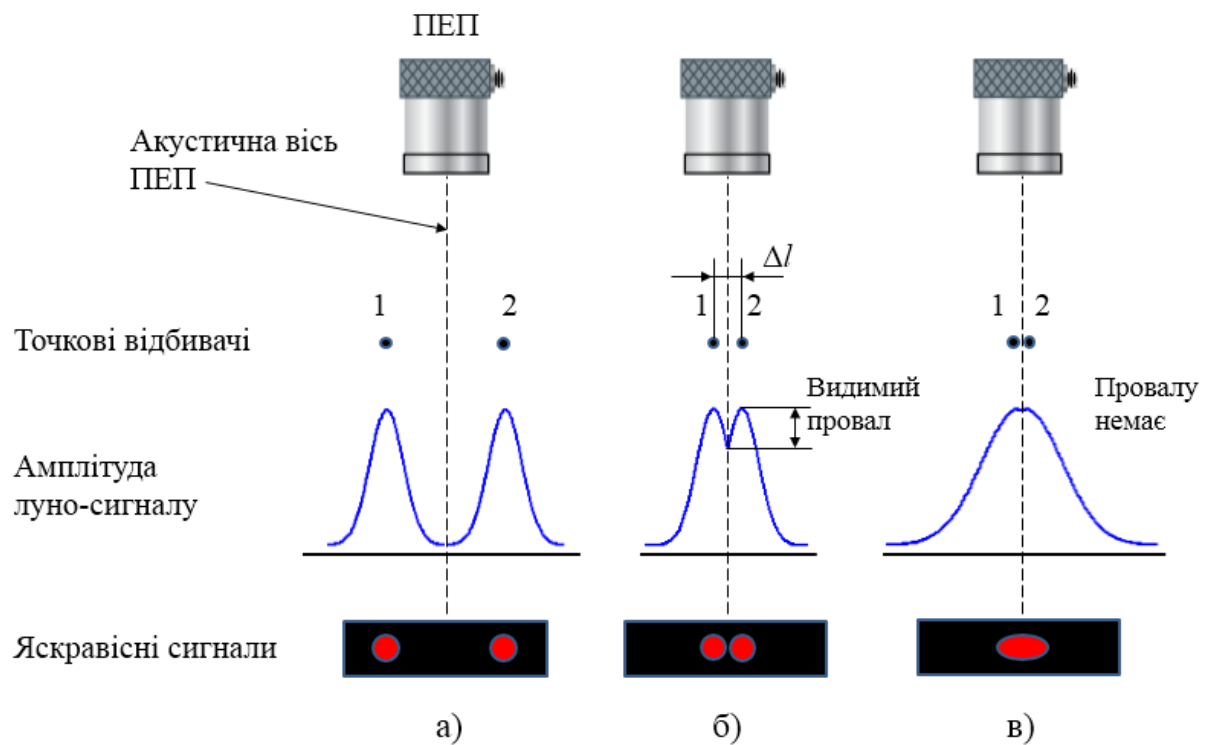


Рис. 7.17. Поперечне розрізнення двох точкових відбивачів: а) гарне розрізнення; б) граничне розрізнення; в) розрізнення відсутнє

Якщо перетворювач дисковий, то в ближній зоні промінь не виходить за межі циліндричної поверхні, яку називають трубкою випромінювання. Розміри перетину

трубки випромінювання співпадають з розмірами перетворювача. Проте розрізненню дефектів заважають інтерференційні максимуми і мінімуми поля перетворювача. Тому надійне розрізнення дефектів відбудеться, якщо відстань між ними більша, ніж діаметр перетворювача:

$$\Delta l \geq 2a .$$

Найвища фронтальна роздільна здатність площинного монолітного перетворювача в межах ближньої зони знаходиться на глибині $H \approx r_{\text{бл}}$ і становить біля 80% від діаметра перетворювача. Це пов'язано з тим, що на цій відстані виникає незначне природне фокусування акустичного променя.

Для розрахунку фронтальної роздільної здатності в дальній зоні застосовується інша формула. Якщо використовувати критерій, заснований на розрізненні двох точок, акустичний тиск між якими на 3дБ менше максимального (рис. 7.18), то фронтальна роздільна здатність в дальній зоні поля випромінювання ПЕП може бути визначена як:

$$\Delta l = 2H \cdot \text{tg}(\theta_{0,7}) \approx 2H \cdot \sin(\theta_{0,7}) , \quad (7.5)$$

де $\theta_{0,7}$ – кут розхилу основної пелюстки на рівні -3дБ, H – глибина залягання відбивача.

В формулі (7.5) зроблена заміна функції тангенс на синус з урахуванням того, що $\theta_{0,7} \rightarrow 0$. Враховуючи формулу (5.5) запишемо умову для круглого ПЕП, за якої відбувається роздільне виявлення дефектів в дальній зоні³³:

$$\Delta l \geq 2H \cdot \sin(\theta_{0,7}) = 2H \cdot 0,5 \frac{\lambda}{2a} = \frac{H\lambda}{2a} . \quad (7.6)$$

Відомо (див. розділ 5.2), що роздільна здатність поля випромінювання на рівні -3 дБ еквівалентна роздільній здатності поля випромінювання-прийому, але на рівні -6 дБ.

³³ Варто зауважити, що загальний вигляд формули для розрахунку фронтальної роздільної здатності в дальній зоні в різних літературних джерелах співпадає, проте коефіцієнт пропорційності становить від 0,8 до 2,0. Також треба враховувати, на якому рівні та для якого поля (випромінювання або випромінювання-прийому) розраховується роздільна здатність в тих чи інших літературних джерелах (очевидно, що на рівні -6 дБ коефіцієнт пропорційності буде інакшим, ніж на рівні -3 дБ). У підручнику для розрахунку фронтальної роздільної здатності як для круглого, так і для прямокутного ПЕП використовуватиметься формула (7.6) із коефіцієнтом пропорційності, що дорівнює 1.

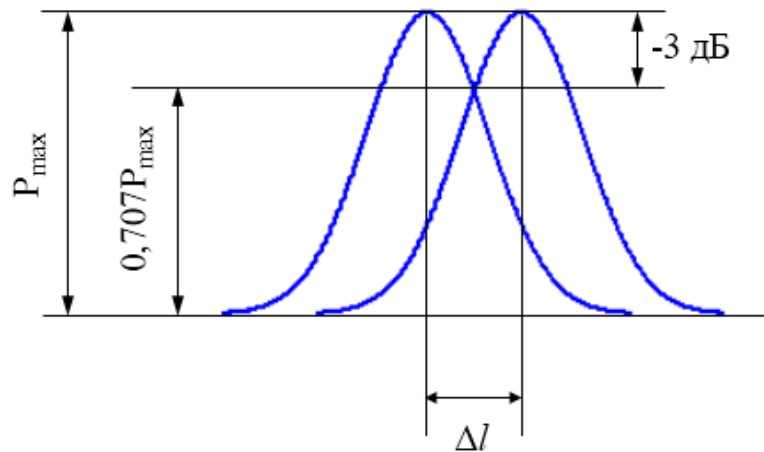


Рис. 7.18. До розрахунку фронтальної роздільної здатності поля випромінювання

Поздовжньою роздільною здатністю (по глибині) називається мінімальна відстань між дефектами, що розташовуються на різних глибинах вздовж акустичної осі, при якій можливо чітко розрізнити і зареєструвати віддзеркалені від них імпульси.

Перш ніж пояснити, яким чином розраховується поздовжня роздільна здатність, необхідно розглянути основні характеристики ультразвукових радіоімпульсів, що приймаються ПЕП (рис. 7.19):

- 1) Розмах імпульсу V_{pp} – максимальна напруга між найбільшими додатним і від’ємним півперіодами радіоімпульсу;
- 2) Тривалість імпульсу $\Delta\tau_{-20дБ}$ – показує тривалість імпульсу на рівні -20 дБ з урахуванням додатної та від’ємної його частин;
- 3) Кількість піків в сигналі – число півперіодів, які перевищують за амплітудою заданий рівень (наприклад, -20 дБ) в додатній та від’ємній частинах сигналу;
- 4) Кількість періодів в сигналі – дорівнює кількості піків, розділених на 2;
- 5) Показник згасання імпульсу k_A – співвідношення між максимальним півперіодом і наступним півперіодом тієї ж полярності.

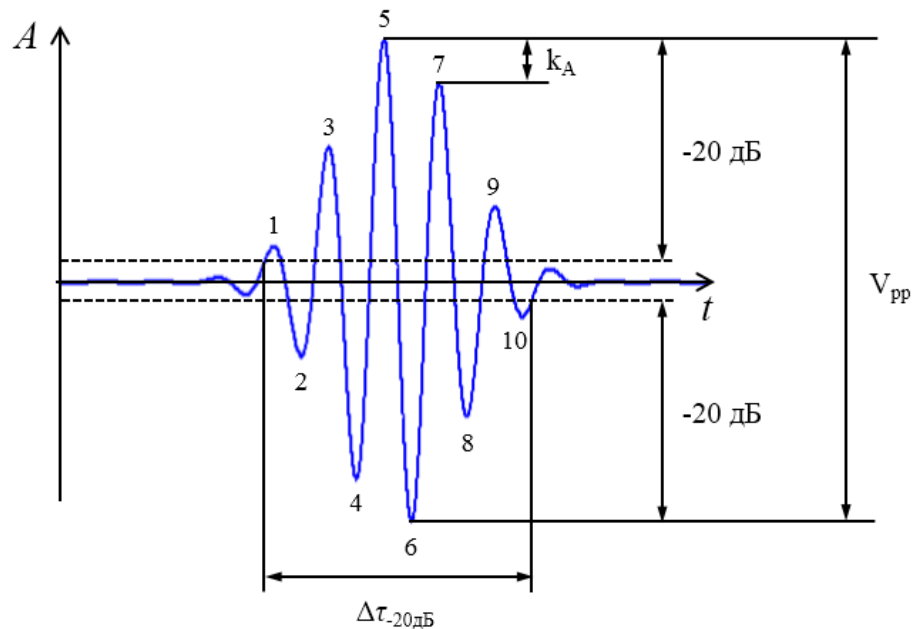


Рис. 7.19. Характеристики ультразвукового радіоімпульсу (цифрами позначені піки сигналу)

Форма і тривалість імпульсу безпосередньо впливає на поздовжню (променеву) роздільну здатність (рис. 7.20). Променева роздільна здатність оцінюється для нерухомого положення датчика і розраховується за такою формулою:

$$\Delta r = \frac{C_{\text{ок}} \cdot \Delta \tau_{-20\text{дБ}}}{2}. \quad (7.7)$$

Променева роздільна здатність не залежить від зони акустичного поля (на відміну від фронтальної).

Досить часто в спеціалізованій літературі зустрічається наступна формула для розрахунку променевої роздільної здатності:

$$\Delta r \approx 1,5\lambda_{\text{ок}}.$$

Її можна трактувати як окремий випадок формули (7.7) у припущенні, що сигнал на рівні -20 дБ містить 3 періоди коливань.

$$\text{Тобто } \Delta r = \frac{C_{\text{ок}} \cdot \Delta \tau_{-20\text{дБ}}}{2} \approx \frac{C_{\text{ок}} \cdot 3T}{2} = \frac{3C_{\text{ок}}}{2f} = 1,5\lambda_{\text{ок}}.$$

Покращити променеву роздільну здатність можна шляхом зменшення тривалості зондувального імпульсу (до того ж стане меншою і мертва зона). З іншого боку, чим довше зондувальний імпульс, тим потужніші коливання, що

випромінюються, і тим глибше можна озвучити контрольований виріб. Тому вибір тривалості зондувального імпульсу – рішення компромісне.

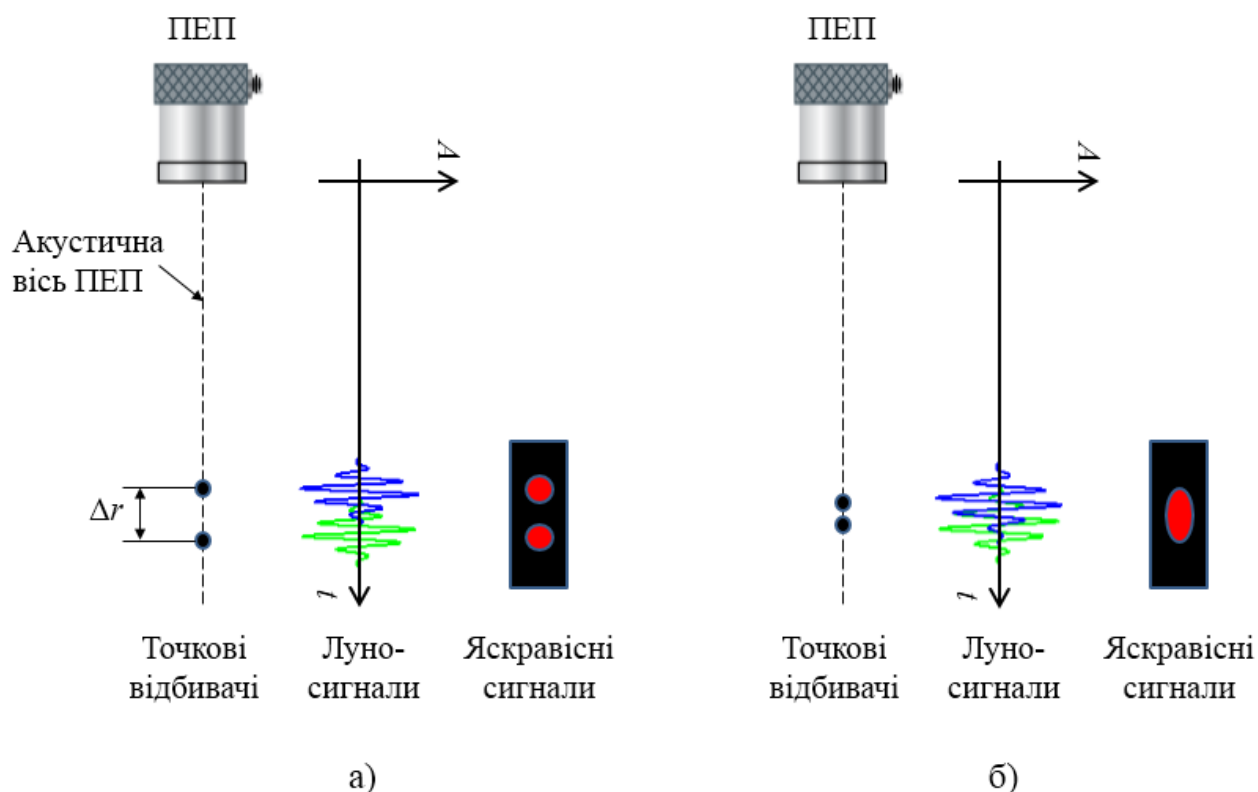


Рис. 7.20. Променева роздільна здатність: а) граничне розрізнення двох точкових відбивачів; б) розрізнення відсутнє

Важливим параметром ультразвукової дефектоскопії є також чутливість. **Чутливістю** називають здатність виявляти і спостерігати малі корисні сигнали, віддзеркалені від елементів структури ОК, на фоні завад.

Кількісно чутливість визначається величиною мінімального корисного сигналу, який може бути виділений на фоні шумів. Чутливість ультразвукового приладу залежить від характеристик вхідних ланцюгів і від якості датчика (ефективності перетворення УЗК в електричні і навпаки). Особливо важлива чутливість приладу при роботі на великих глибинах, де рівень корисних сигналів знижується внаслідок загасання в ОК. Тому чутливість визначає максимальну робочу глибину роботи приладу, тобто глибину, на якій ще забезпечується рівень корисних сигналів, достатній для їх спостереження.

Найчастіше результат ультразвукової дефектоскопії відображається на екрані приладу у вигляді А- та В-розгортки. Розгортка типу А (А-скан, A-scan presentation,

A-scan) є найпростішим типом розгортки, що використовується в ультразвукових дефектоскопах. А-скан є формою подання прийнятих сигналів, що віддзеркалились від дефектів (неоднорідностей) ОК, в прямокутних (декартових) координатах на дисплеї, при якій амплітуда досліджуваного сигналу відкладається по осі ординат Y, а час (або глибина) – по осі абсцис X. В назві розгортки літера «А» – це скорочення від amplitude (амплітуда).

В-скан (B-scan presentation, B-scan) – подання результатів ультразвукового контролю у вигляді поперечного перерізу ОК, перпендикулярного поверхні введення і паралельного напрямку прозвучування. Для оцінки амплітуди луно-сигналів найчастіше пов'язують цю амплітуду з яскравістю або кольором зображення³⁴. Кожна точка на В-скані яскравіше або темніше відповідно до інтенсивності луно-імпульсу від певної ділянки ОК. В-скан зазвичай являє собою об'єднання А-сканів, модульованих яскравістю.

В задачах дефектоскопії, особливо при введенні УЗК під кутом або через імерсійне середовище, важливим питанням є врахування температурної залежності швидкості ультразвуку для точного калібрування апаратури. У **Додатку Ж** наведені залежності швидкості ультразвуку від температури для деяких матеріалів. Врахування температурної залежності дає змогу розраховувати реальні кути введення хвиль в ОК при заданих кутах призми у заданому температурному діапазоні контролю.

7.3. Дифракційно-часовий метод

Дифракційно-часовий метод (Time of Flight Diffraction, TOFD) заснований на виявленні дифракційних хвиль, що виникають на краях тріщин при їх прозвучуванні ультразвуковими хвилями. Реалізація методу TOFD передбачає використання двох похилих сильнодемпфованих перетворювачів з малим діаметром п'єзопластини та широкою діаграмою направленості, що працюють в роздільному режимі (рис. 7.21).

³⁴ Скорочення «В» в назві В-скан з одного боку означає brightness (яскравість), що свідчить про спосіб відображення даних на екрані, а з іншого – може розшифровуватись як bimodal, що означає двомадальний, дворівневий.

Один з перетворювачів збуджує під певним кутом поздовжню хвилю в ОК, а інший приймає випромінені дефектами дифракційні хвилі в широкому діапазоні кутів.

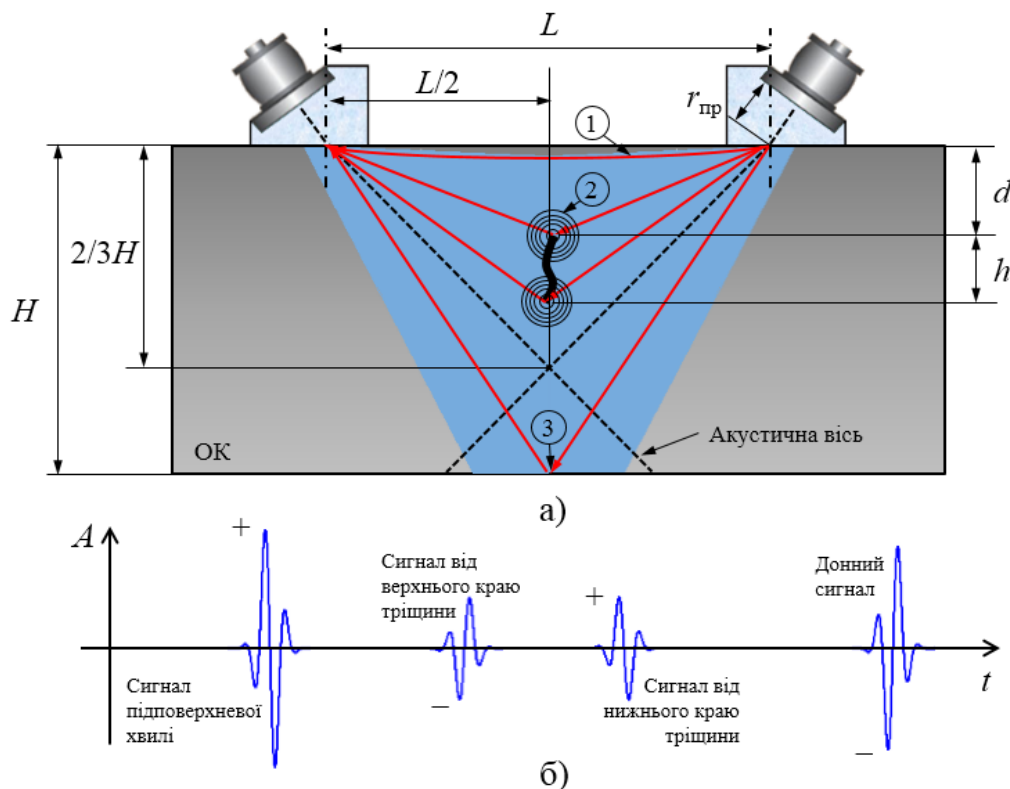


Рис. 7.21. Метод TOFD: а) схема прозвучування: 1 – підповерхнева хвиля, 2 – дифракція хвилі на краю тріщини, 3 – віддзеркалення від задньої стінки; б) полярність сигналів, що реєструються

Під час контролю методом TOFD реєструють наступні основні сигнали:

1. Сигнал, обумовлений поздовжньою підповерхневою хвилею. Підповерхневі хвилі поширюються уздовж поверхні виробу по найкоротшому шляху від випромінюючого перетворювача до приймаючого. Швидкість підповерхневої хвилі практично дорівнює швидкості поздовжньої.

2. Дифрагований сигнал, обумовлений розсіянням хвиль на краях тріщини. При цьому генеруються як поздовжні, так і поперечні хвилі зі сферичним фронтом, але в методі TOFD зазвичай використовують поздовжні. Сигнали від верхнього і нижнього кінців тріщини мають протилежні фази (див. рис. 7.21б).

3. Донний сигнал, обумовлений поздовжньою хвилею, що відбилася дзеркально від донної поверхні.

Якщо припустити, що дефект розташований приблизно посередині між перетворювачами, його висоту (h) і глибину залягання верхнього краю (d) можна розрахувати за наступними формулами:

$$t_1 = \frac{L}{C_l} + \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}};$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{(L/2)^2 + d^2}}{C_l} + \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}};$$

$$t_3 = \frac{2\sqrt{(L/2)^2 + (d+h)^2}}{C_l} + \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}};$$

$$t_4 = \frac{2\sqrt{(L/2)^2 + H^2}}{C_l} + \frac{2r_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}},$$

де t_1 – час поширення підповерхневої хвилі, t_2, t_3 – час поширення хвиль, що дифрагують на верхньому та нижньому краях тріщини відповідно, t_4 – час поширення хвилі, що відбилась від донної поверхні ОК, C_l – швидкість поширення поздовжньої хвилі в ОК, L – відстань між осями датчиків, H – товщина ОК, $r_{\text{пр}}$ – шлях поширення променя в призмі датчика, $C_{\text{пр}}$ – швидкість поширення ультразвуку в призмі.

Технологія TOFD в наш час стає стандартом в енергетичній та нафтохімічній галузях промисловості. Основними напрямками використання методу TOFD є швидкий контроль кільцевих і поздовжніх зварних швів на наявність різних внутрішніх дефектів. Метод передбачає використання координатних пристроїв (або сканерів), які фіксують положення датчиків під час їх руху уздовж шва. Це дає змогу відображати результати контролю на екрані дефектоскопу у вигляді розгортки типу В.

До переваг методу TOFD можна віднести наступне:

- висока чутливість до дрібних дефектів у порівнянні з луна-імпульсним методом, більш висока точність визначення розмірів дефектів;
- висока чутливість до всіх типів дефектів зварних швів (зокрема, міжваликових несплавлень) і одночасний контроль біляшовної зони;
- вимірювання параметрів дефекту засноване на часі проходження дифракційних сигналів і не залежить від амплітуди сигналу;

- висока продуктивність контролю, виконання контролю всього обсягу шва за один прохід за рахунок широкого охоплення одним променем;
- документування та зберігання результатів контролю у вигляді А та В-сканів.

Однак метод TOFD має і ряд обмежень:

- існують мертві зони поблизу поверхні установки датчиків і донної поверхні, які пов'язані з тим, що сигнал підповерхневої хвилі і донний сигнал маскують можливі сигнали від дефектів;
- положення дефекту щодо перетворювачів впливає на час приходу сигналу, тому якщо дефект розташований не посередині між перетворювачами, можуть виникати помилки визначення його розмірів (наприклад, положення дефекту в шві необхідно уточнювати додатково за допомогою переміщення пари перетворювачів поперек шва);
- інтерпретація образів дефектів на зображенні вимагає серйозної підготовки та досвіду роботи;
- низьке співвідношення сигнал-завада;
- сигнали чутливі до грубозернистої структури матеріалу;
- особливості геометрії ОК і акустичного контакту можуть перешкоджати поширенню підповерхневої хвилі.

7.4. Методи контролю з використанням ефекту Допплера

Використання ефекту Допплера розширює можливості луно-методу і може бути ефективним, коли досліджуваний об'єкт знаходиться в стані руху по відношенню до випромінювача-приймача. Найбільш поширеним доплерівський метод є в медичній діагностиці, зокрема, в ультразвуковій інтроскопії, судинній хірургії, кардіології та при вимірюванні швидкості потоку крові в судинах. У технічній діагностиці доплерівський метод знайшов застосування в пристроях контролю витрати рідини в трубопроводах.

В медичній діагностиці для контролю швидкості кровотоку використовуються роздільно-суміщені перетворювачі, в яких випромінювач і приймач ультразвуку розміщені в одному корпусі. Причому сам датчик розташовується під певним кутом до судини. Для розрахунку частоти доплерівського зсуву скористаємось моделлю, що представлена на рис. 7.22.

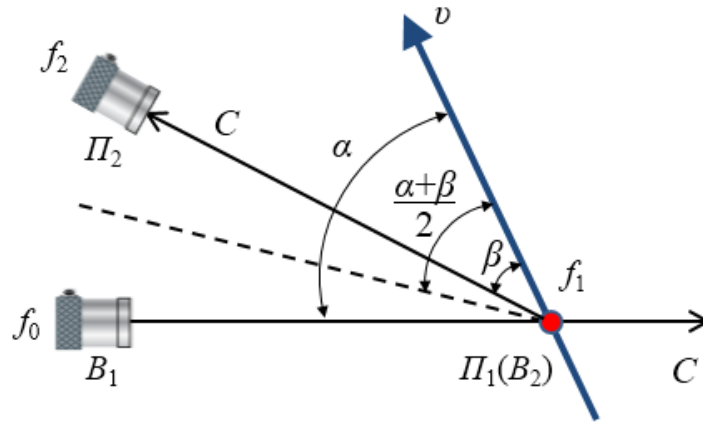


Рис. 7.22. До розрахунку ефекту Доплера при використанні роздільно-суміщеного ПЕП для вимірювання швидкості кровотоку: B_1 – первинний випромінювач з частотою випромінювання f_0 ; Π_1 – приймач-відбивач (він же вторинний випромінювач B_2 з частотою випромінювання f_1); Π_2 – приймач віддзеркаленого сигналу з частотою f_2

Нехай нерухомий випромінювач B_1 збуджує коливання частотою f_0 під кутом α до судини, по якій протікає кров. Рухомі клітинні елементи крові (як приймач Π_1) сприймають ультразвукові коливання частотою f_1 :

$$f_1 = \frac{C + v \cos \alpha}{\lambda_0} = f_0 \frac{C + v \cos \alpha}{C},$$

де C – швидкість поширення хвилі в середовищі, v – швидкість руху приймача, α – кут між вектором швидкості приймача v і напрямком на випромінювач.

Клітинні елементи крові відбивають коливання (тобто виступають як вторинний випромінювач B_2) частотою f_1 на приймач Π_2 під кутом β . Частота f_2 , яка сприймається приймачем Π_2 визначається як:

$$f_2 = f_0 \frac{C + v \cos \alpha}{C - v \cos \beta}.$$

Тоді частота Доплера f_d визначається як:

$$f_d = f_2 - f_0 = f_0 \frac{C + v \cos \alpha}{C - v \cos \beta} - f_0 = f_0 \left(\frac{C + v \cos \alpha - C + v \cos \beta}{C - v \cos \beta} \right) =$$

$$= v f_0 \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{C - v \cos \beta} \right) \approx 2 f_0 \frac{v}{C} \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (7.8)$$

Кінцевий результат формули (7.8) отриманий із урахуванням, що $v \ll C$, тоді знаменник $(C - v \cdot \cos \beta) \approx C$. Також в формулі (7.8) використано перетворення суми косинусів двох кутів.

Враховуючи, що кути розташування випромінювача та приймача відносно напрямку руху відбивача практично однакові, тобто $\alpha \approx \beta$, отримуємо кінцеву формулу для розрахунку частоти Допплера при використанні роздільно-суміщеного перетворювача для вимірювання швидкості кровотоку в судинах:

$$f_d \approx 2 f_0 \frac{v}{C} \cos \alpha .$$

7.5. Методи ультразвукової витратометрії

Сьогодні найпоширенішими є ультразвукові витратоміри двох типів:

- витратоміри, принцип роботи яких ґрунтується на тому факті, що швидкість поширення ультразвукової хвилі в рухомому середовищі є векторною сумою $C = C_p + v$, де C_p – швидкість поширення ультразвуку в нерухомій рідині, v – швидкість руху рідини;
- витратоміри, принцип роботи яких ґрунтується на використанні ефекту Допплера, що виникає при віддзеркаленні ультразвукової хвилі від деякого відбивача або групи відбивачів, що рухаються в потоці рідини.

Серед першої групи найбільше застосування одержали витратоміри, побудовані на принципі вимірювання параметрів акустичних сигналів, які проходять шлях за напрямком і проти напрямку потоку речовини, швидкість руху якої і необхідно визначити. Виділяють три основних вимірюваних параметри:

- вимірювання різниці часу проходження двох коротких ультразвукових імпульсів, що направляються за потоком речовини і проти нього;

- вимірювання різниці фазового зсуву двох довгих ультразвукових імпульсів, що направляються за потоком речовини і проти нього;
- вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань, що направляються за потоком речовини і проти нього.

З урахування написаного вище на рис. 7.23 наведена загальна класифікація ультразвукових витратомірів.

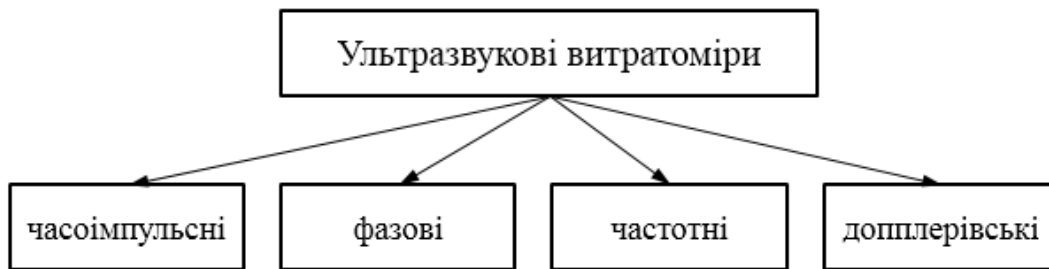


Рис. 7.23. Класифікація ультразвукових витратомірів

Ультразвукові витратоміри відрізняються за конструкцією первинних перетворювачів та за використовуваними вимірювальними схемами. Високі частоти акустичних коливань (0,1-10 МГц) використовуються для вимірювання витрати чистих рідин. Для вимірювання забруднених середовищ частоти коливань значно зменшують (до декількох десятків кілогерц), щоб запобігти поглинанню і розсіянню акустичних коливань. Довжина хвилі повинна бути у рази більше діаметра повітряних бульбашок або твердих частинок. Для вимірювання витрати газів також використовують низькі частоти.

Найбільшого поширення набули часоімпульсні витратоміри вбудованого та накладного типу. Для застосування перших необхідно вирізати частину труби, якою рухається певна речовина, і на її місце герметично встановити конструкцію витратоміра. Другий тип часоімпульсних витратомірів не потребує демонтажу частини труби, тому що його датчики встановлюються на поверхню контрольованого об'єкту, через яку і відбувається випромінювання та приймання УЗК. При цьому самі датчики як для першого, так і для другого типів витратомірів можуть розташовуватись як з однієї сторони труби, так і з протилежних відносно осі.

На рис. 7.24. представлено принцип роботи вбудованих часоімпульсних витратомірів, датчики яких розташовані з протилежних сторін труби.

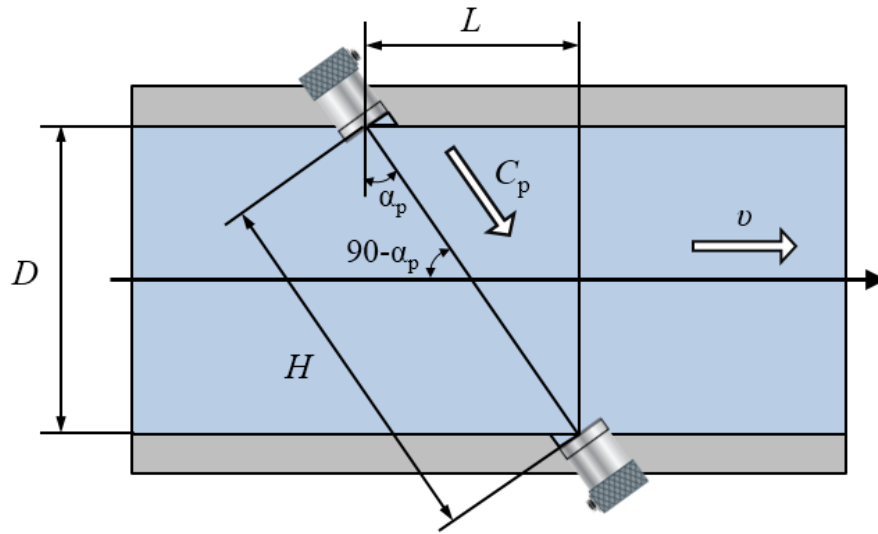


Рис. 7.24. Принцип роботи вбудованого часоімпульсного витратоміра

Очевидно, що проекція швидкості потоку речовини v на акустичну вісь датчиків (вздовж якої поширюються ультразвукові коливання) при відомому куті між нормаллю та напрямком поширення ультразвуку в речовині α_p розраховуватиметься як $v \cdot \sin \alpha_p$. Тоді час проходження ультразвукового імпульсу вздовж відстані H за потоком речовини можна розрахувати як:

$$t_1 = \frac{H}{C_p + v \cdot \sin \alpha_p},$$

Час проходження імпульсу у зворотному напрямку:

$$t_2 = \frac{H}{C_p - v \cdot \sin \alpha_p}.$$

Різниця часу між приходом обох імпульсів:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = H \left(\frac{1}{C_p - v \cdot \sin \alpha_p} - \frac{1}{C_p + v \cdot \sin \alpha_p} \right) = H \cdot \frac{2v \cdot \sin \alpha_p}{(C_p)^2 - (v \cdot \sin \alpha_p)^2}. \quad (7.9)$$

Враховуючи, що $v \ll C_p$, то величиною $(v \cdot \sin \alpha_p)^2$ можемо знехтувати. Тоді формула (7.9) прийме наступний вигляд:

$$\Delta t = \frac{2Hv \cdot \sin \alpha_p}{C_p^2}. \quad (7.10)$$

З формули (7.10) можна виразити швидкість руху речовини:

$$v = \frac{C_p^2 \Delta t}{2H \cdot \sin \alpha_p}. \quad (7.11)$$

Даний запис формули для розрахунку швидкості потоку речовини незручний тим, що в ньому використовується значення швидкості C_p , тобто це значення необхідно знати з заданою точністю (це досить складана задача, тому що сама швидкість C_p може змінюватись внаслідок зміни густини потоку і температури). Для того, щоб позбутись цієї залежності, виразимо швидкість C_p через виміряні часові затримки та відомі геометричні характеристики витратоміра наступним чином:

$$t_2 \cdot t_1 = \left(\frac{H}{C_p - v \cdot \sin \alpha_p} \right) \cdot \left(\frac{H}{C_p + v \cdot \sin \alpha_p} \right) = \frac{H^2}{(C_p)^2 - (v \cdot \sin \alpha_p)^2} \approx \frac{H^2}{C_p^2}.$$

Звідки:

$$C_p^2 = \frac{H^2}{t_2 \cdot t_1}.$$

Тоді швидкість потоку рідини з урахуванням того, що $\sin \alpha_p = L/H$, розрахуватиметься за наступною формулою:

$$v = \frac{H^2}{t_2 \cdot t_1} \cdot \frac{\Delta t}{2H \cdot \frac{L}{H}} = \frac{H^2 \cdot \Delta t}{2L \cdot t_2 \cdot t_1}. \quad (7.12)$$

Тобто, для визначення швидкості потоку речовини необхідно знати геометричні характеристики витратоміра, а також виміряні значення часових затримок. Формулу (7.11) також можна виразити дещо інакше – через відомий внутрішній діаметр труби D , враховуючи, що $H = D / \cos \alpha_p$, а $2 \cos \alpha_p \cdot \sin \alpha_p = \sin(2\alpha_p)$:

$$v = \frac{H^2}{t_2 \cdot t_1} \cdot \frac{\Delta t}{2H \cdot \sin \alpha_p} = \frac{H \cdot \Delta t}{2t_2 \cdot t_1 \cdot \sin \alpha_p} = \frac{D \cdot \Delta t}{2t_2 \cdot t_1 \cdot \sin \alpha_p \cdot \cos \alpha_p} = \frac{D}{\sin 2\alpha_p} \cdot \frac{\Delta t}{t_2 \cdot t_1}.$$

До недоліків вбудованих ультразвукових витратомірів можна віднести складність їх монтажу. Цього недоліку позбавлені накладні витратоміри, датчики яких встановлюються на трубу, а хвиля похило вводиться через призму датчика (рис. 7.25).

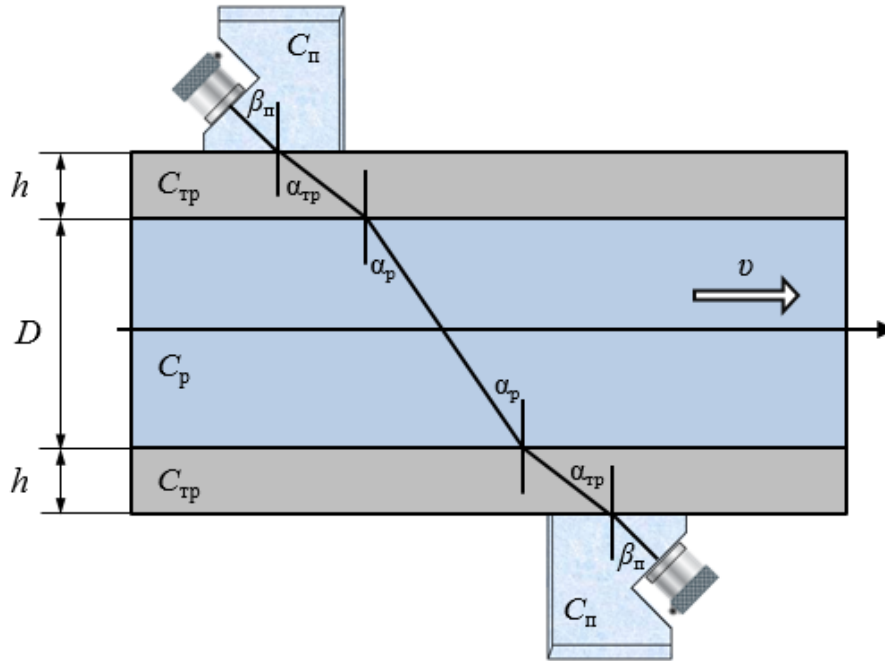


Рис. 7.25. Принцип роботи накладного часоімпульсного витратоміра

До переваг накладних витратомірів по відношенню до вбудованих можна віднести наступне:

- немає необхідності вбудовувати витратомірну ділянку в трубу;
- виключена втрата тиску на витратомірній ділянці;
- датчики витрати не занурені у вимірюване середовище, а значить, виключене їх забруднення та утворення на них осаду;
- можливість використання там, де небажано контактувати із вимірюваним середовищем.

У випадку використання витратомірів з накладними датчиками час поширення сигналу за потоком може бути записаний у наступному вигляді:

$$t_1 = 2(t_n + t_{тр}) + \frac{D}{\cos \alpha_p \cdot (C_p + v \cdot \sin \alpha_p)}, \quad (7.13)$$

де t_n – час поширення ультразвуку в призмі перетворювача, $t_{тр}$ – час поширення ультразвуку в матеріалі стінки трубопроводу.

Аналогічно можна розрахувати час поширення сигналу проти потоку рідини:

$$t_2 = 2(t_n + t_{тр}) + \frac{D}{\cos \alpha_p \cdot (C_p - v \cdot \sin \alpha_p)}. \quad (7.14)$$

Вирішивши систему рівнянь (7.13)-(7.14) відносно швидкості v отримаємо:

$$v = \frac{\frac{C_p}{\sin \alpha_p} (t_2 - t_1)}{t_2 + t_1 - 4(t_n + t_{тр})} . \quad (7.15)$$

В формулі (7.15) кут α_p – розрахункова величина, яка залежить від кута призми β_n . Розраховується кут α_p за законом Снеліуса, враховуючи, що:

$$\frac{C_n}{\sin \beta_n} = \frac{C_{тр}}{\sin \alpha_{тр}} = \frac{C_p}{\sin \alpha_p} ,$$

де C_n – швидкість ультразвуку в матеріалі призми, $C_{тр}$ – швидкість ультразвуку в матеріалі труби, β_n – кут призми, $\alpha_{тр}$ – кут між нормаллю та напрямком поширення ультразвуку в матеріалі труби.

Тоді кінцева формула для розрахунку швидкості потоку речовини матиме наступний вигляд:

$$v = \frac{\frac{C_n}{\sin \beta_n} (t_2 - t_1)}{t_2 + t_1 - 4(t_n + t_{тр})} .$$

Ультразвукові фазові витратоміри мають ті ж конструктивні особливості, що і часоімпульсні, а також спосіб введення коливань, при якому ультразвукові хвилі направляються за потоком і проти нього. Відмінності полягають у формі коливань, що випромінюються, та у способі вимірювання часової затримки, який заснований на вимірюванні різниці фаз двох коливань. Якщо шлях проходження ультразвуку в речовині за і проти напрямку руху однаковий, а також однакова початкова фаза обох коливань, то вимірювана різниця фаз $\Delta\varphi$ буде залежати лише від різниці часу проходження Δt , тобто:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega(t_2 - t_1) = \omega \cdot \Delta t .$$

Тоді з урахуванням формули (7.12) вираз для розрахунку швидкості потоку речовини для фазового методу прийме вигляд:

$$v = \frac{H^2 \cdot \pi f \cdot \Delta\varphi}{L \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_1} .$$

В частотно-імпульсних витратомірах виробляються короткі імпульси, які надходять до ПЕП з інтервалами, рівними часу проходження ультразвуку за

напрямом потоку і проти нього. Частота повторення цих коротких імпульсів визначатиметься як $f_1=1/t_1$ та $f_2=1/t_2$. Різниця частот становитиме:

$$f_1 - f_2 = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{t_2 - t_1}{t_2 \cdot t_1} = \frac{\Delta t}{t_2 \cdot t_1}.$$

Тоді з урахуванням формули (7.12) швидкість потоку для частотно-імпульсного методу розраховуватиметься як:

$$v = \frac{H^2}{2L} (f_1 - f_2).$$

Ультразвукові часоімпульсні, фазові та частотно-імпульсні витратоміри в основному використовуються для вимірювання витрати «чистих» рідин, тобто середовищ, що містять порівняно невелику кількість твердих і газових включень. У випадку, коли необхідно проводити вимірювання витрати неоднорідних рідин, таких як стічні води і пульпи, використовують доплерівські витратоміри.

Принцип роботи доплерівського витратоміра представлений на рис. 7.26. Якщо точковий розсіювач, який рухається вздовж труби зі швидкістю v , опромінюється сигналом частотою ω_0 під кутом α_p до вертикалі, то частота ω_1 прийнятого луно-сигналу визначається як:

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot \frac{\frac{1 - v \cdot \sin \alpha_p}{C_p}}{\frac{1 + v \cdot \sin \alpha_p}{C_p}}.$$

Виконавши певні математичні перетворення та спрощення отримаємо так званий локаційний варіант формули для розрахунку частоти Доплера:

$$\omega_d = \omega_1 - \omega_0 = \frac{2\omega_0 v \sin \alpha_p}{C_p}. \quad (7.16)$$

З виразу (7.16) випливає, що величина доплерівського зсуву ω_d прямо пропорційна швидкості руху розсіювача в рідині:

$$v = \frac{\omega_d C_p}{2\omega_0 \sin \alpha_p}. \quad (7.17)$$

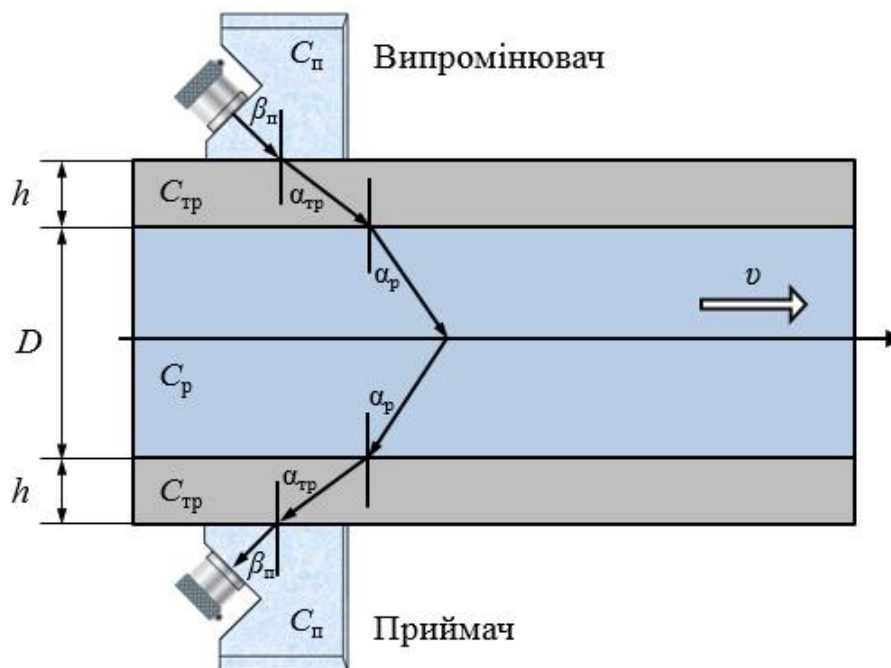


Рис. 7.26. Принцип роботи ультразвукового доплерівського витратоміра

В реальних умовах у формуванні сигналів об'ємного розсіювання бере участь сукупність розсіювачів різної природи, випадково розташованих в просторі. У цьому випадку поняття «доплерівське зміщення» замінюється концепцією «доплерівського спектра», що відображає розподіл прийнятої енергії як функції радіальних швидкостей розсіювачів. Для того щоб можна було користуватися співвідношенням (7.17) в реальних розрахунках, досить під величиною ω_d мати на увазі центр ваги спектра віддзеркаленого сигналу.

Таким чином, вимірявши будь-яким із описаних вище способів середню швидкість руху речовини можна розрахувати її витрату:

$$Q = v \cdot S = v \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$

7.6. Акустико-емісійний метод контролю

Акустична емісія – це явище генерації пружних хвиль, обумовлене раптовою зміною (перебудовою) в структурі матеріалу. Класичним джерелом АЕ є процес деформування, пов'язаний з ростом дефектів, наприклад, тріщин або зон пластичної деформації. АЕ проявляється і при фазових перетвореннях, пов'язаних із зміною

кристалічної решітки, а також при різанні твердих матеріалів. Фізичним механізмом, що пояснює ряд особливостей АЕ, є рух в речовині дислокацій і їх скупчень. Дислокаційні процеси, пов'язані з відривом дислокацій від точок закріплення, гальмуванням їх на перешкоді, виникненням і знищенням окремих дислокацій, – мають істотно нерівномірний, і навіть переривчастий, характер. Відповідно АЕ має «вибуховий», імпульсний характер; тривалість імпульсу може становити $10^{-8} \div 10^{-4}$ с, енергія окремого імпульсу – від 10^{-9} до 10^{-5} Дж.

Процес генерації і виявлення АЕ наведений на рис. 7.27. Раптовий рух джерела емісії стає причиною появи пружних хвиль, які поширюються в матеріалі та досягають перетворювача. При збільшенні навантаження активізується значна кількість наявних у матеріалі джерел емісії. Електричні сигнали емісії, отримані у результаті перетворення датчиком пружних хвиль, підсилюються, апаратно реєструються та піддаються подальшій обробці та інтерпретації.

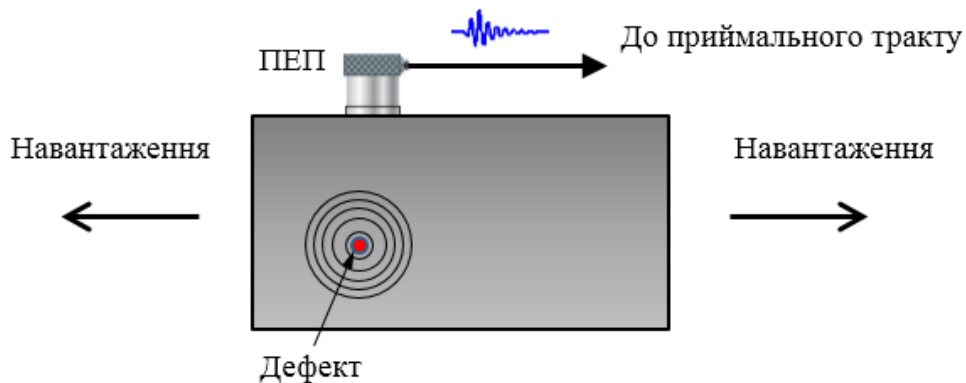


Рис. 7.27. Принцип АЕ контролю та реєстрації сигналів

Таким чином, без виникнення напруженого стану матеріалу не виникатиме й емісія. Тому АЕ контроль зазвичай проводиться шляхом навантаження ОК. Це може бути перевірочний контроль перед запуском об'єкта, контроль змін навантаження під час роботи об'єкта, випробування на втому, повзучість або комплексне навантаження. Найчастіше конструкція навантажується довільним способом. У цьому випадку використання АЕ контролю дає змогу одержувати додаткову корисну інформацію про поведінку конструкції під дією навантаження.

Як джерело акустичної емісії можна розглядати розташований в глибині зразка твердого тіла елемент об'єму, який відчуває зміну напруженого стану.

Сигнали АЕ проявляються у вигляді коливань поверхні зразка, зміщення при яких становить $10^{-14} \div 10^{-7}$ м. Сигнал емісії, поширюючись від джерела до поверхні зразка, зазнає істотне спотворення внаслідок дисперсії швидкості ультразвуку, трансформації типу і форми хвилі при віддзеркаленні, загасанні та ін. Якщо час згасання сигналу і час перехідних процесів у зразку менше проміжку часу між випромінюваними імпульсами, емісія сприймається у вигляді послідовності імпульсів і називається дискретною або імпульсною. Якщо ж інтервал між окремими актами випромінювання менше часу згасання, емісія має характер неперервного випромінювання, в переважній більшості випадків нестационарного, і називається неперервною або суцільною. Дискретна емісія має місце, наприклад, при утворенні тріщин, неперервна – у процесі різання.

Існує декілька найбільш використовуваних параметрів сигналів АЕ, які вимірюються під час проведення контролю. До них належать: число осциляцій, амплітуда, тривалість, час наростання сигналу та площа під обвідною сигналу (MARSE), що є аналогом енергії (рис. 7.28).

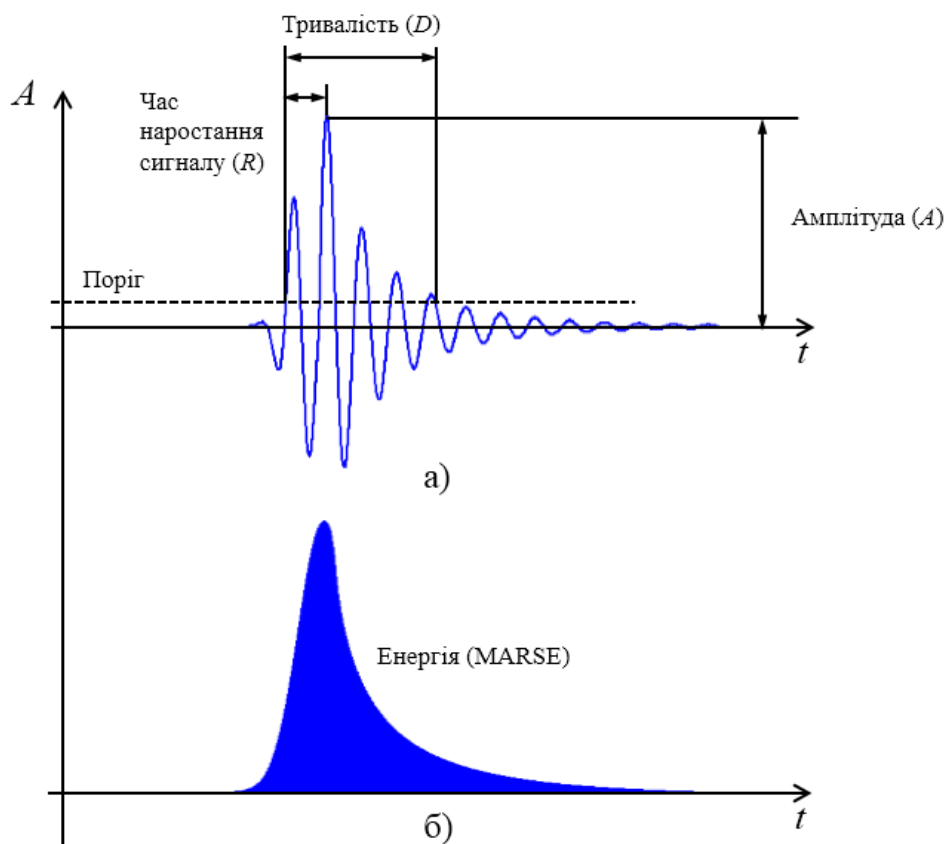


Рис. 7.28. Параметри сигналу АЕ: а) тривалість сигналу, час наростання та амплітуда;
б) енергія сигналу

У деяких вимірюваннях використовується менша кількість параметрів, в інших – додаткові параметри, наприклад, реальна енергія, число осциляцій до пікової амплітуди, середня частота, спектральний момент.

Після того, як сигнал був прийнятий датчиком і підсилений попереднім підсилювачем, він надходить в основну систему електронного аналогового тракту, де знову підсилюється та фільтрується. На наступному важливому етапі відбувається безпосередньо виділення сигналу. Коли сигнал перевищує встановлений поріг, у компараторному ланцюгу в цифровому вигляді генерується вихідний імпульс. Зв'язок між сигналом, порогом та імпульсом з компаратора проілюстрований на рис. 7.29.

Найпростіший спосіб визначення активності емісії полягає в підрахунку **числа осциляцій** (counts) – кількості перетинань імпульсом, виданим компаратором, встановленого порога (див. рис. 7.29).

Число осциляцій залежить від величини джерела сигналів, а також від акустичних і резонансних властивостей середовища та датчика. Параметр осциляцій представляється у вигляді функції часу/навантаження. Це подання може носити характер накопиченого числа осциляцій від відповідного аргументу, або може бути представлене у диференціальному вигляді (гістограма).

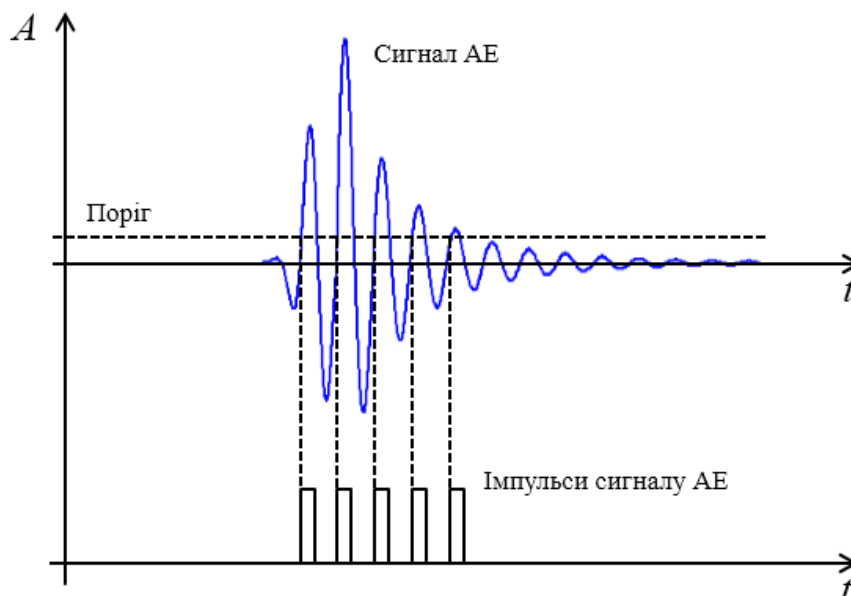


Рис. 7.29. Принцип реєстрації сигналу АЕ

Амплітуда (A) являє собою максимальне значення напруги сигналу, що вимірюється у вольтах. Цей параметр визначає можливість реєстрації АЕ події. Амплітуди сигналів прямо пов'язані з величинами подій у джерелі і варіюються в широких межах від мікрівольтів до вольтів. Серед інших стандартних параметрів амплітуда є найбільш придатною для проведення статистичної обробки даних АЕ шляхом одержання функцій розподілу процесу. Амплітуди АЕ прийнято виражати в децибельному (логарифмічному) масштабі, при цьому 1 мкВ на виході датчика приймається за 0 дБ, 10 мкВ – 20 дБ, 100 мкВ – 40 дБ і далі у такому порядку.

MARSE (число осциляцій енергії) – параметр, який розраховується за площею під обвідною сигналу. Параметр MARSE є чутливим і до амплітуди, і до тривалості сигналу, тому останнім часом він став дуже поширеним. Крім того, він менш залежний від встановленого порога і робочої частоти. Сумарна АЕ активність визначається шляхом додавання амплітуд всіх зареєстрованих сигналів.

Тривалість (D) – це повний час, починаючи від перетинання сигналом порога та закінчуючи зменшенням сигналу до рівня, меншого за поріг. Тривалість вимірюється в мікросекундах та залежить від амплітуди джерела, а також акустичних і резонансних властивостей середовища та датчика (як і число осциляцій). Параметр використовується при ідентифікації процесів, що мають характерно великі тривалості сигналів, наприклад процеси розшаровування композитних матеріалів. Крім того, цей параметр є корисним при відфільтровуванні різних завад (за тривалістю).

Час наростання сигналу (R) – це час від першого перетинання сигналом порога до досягнення максимальної амплітуди. Даний параметр сильно залежить від функції поширення та передатних властивостей датчика. Він може використовуватись для визначення типу деяких джерел сигналів і при відфільтровуванні завад.

АЕ відрізняється від більшості методів неруйнівного контролю в двох ключових аспектах. По-перше, джерелом сигналу служить сам матеріал, а не зовнішнє джерело, тобто метод є пасивним (а не активним, як більшість інших методів контролю). По-друге, на відміну від інших методів АЕ виявляє рух дефекту,

а не статичні неоднорідності, пов'язані з наявністю дефектів. Тобто АЕ виявляє дефекти, що розвиваються, а такі дефекти є найнебезпечнішими.

7.7. Приклади розв'язку задач

Приклад 7.1. Виміряна за допомогою штангенциркуля товщина ОК становить 20 мм. Часова затримка між зондувальним та першим донним ультразвуковими імпульсами при використанні луно-методу дорівнює 8,5 мкс. Визначити швидкість ультразвуку в ОК.

Розв'язок:

Розрахуємо швидкість, використовуючи формулу (7.1):

$$C = \frac{2H}{T} = 4705,9 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $C=4705,6 \text{ м/с.}$

Приклад 7.2. Швидкість поширення ультразвукових хвиль в ОК дорівнює 6000 м/с. Довжина зондувального імпульсу разом з ревербераційними шумами становить 5 періодів на частоті 2,5 МГц. Визначити глибину мертвої зони $h_{\text{мз}}$, якщо хвилі нормально вводяться в ОК через безпосередній акустичний контакт.

Розв'язок:

Глибина мертвої зони розраховується за формулою (7.4):

$$h_{\text{мз}} = \frac{C(\tau_{\text{імп}} + \tau_{\text{ш}})}{2} = \frac{Cn}{2f} = \frac{6000 \cdot 5}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6 \text{ мм.}$$

Відповідь: $h_{\text{мз}}=6 \text{ мм.}$

7.8. Завдання для самостійного розв'язку

Задача 7.1. Віддзеркалений від дефекту ультразвуковий імпульс складається з трьох періодів коливань. Знайти показник тривалості імпульсу γ .

Відповідь: $\gamma=0,161.$

Задача 7.2. Визначити глибину водного шару, якщо випромінений ультразвуковим локатором імпульс повертається до перетворювача через 0,2 с після випромінювання. Швидкість ультразвукових коливань у воді складає 1500 м/с.

Відповідь: $H=150$ м.

Задача 7.3. Чому дорівнює товщина сталевго об'єкту, якщо два сусідні акустичні резонанси виникають на частотах 3,2 МГц і 4,0 МГц? Знайти номери цих резонансів. Швидкість ультразвуку в сталі $C_{ст}=5900$ м/с.

Відповідь: $H=3,68$ мм, резонанси відбуваються на 4 і 5 гармоніках.

Задача 7.4. При вимірюванні товщини сталевго листа фазовим методом абсолютна похибка визначення фази становить $\Delta\varphi=20^\circ$ на частоті $f=5$ МГц. Визначити відносну похибку формування вимірювального інтервалу часу, якщо товщина листа становить $H=5$ мм. Швидкість ультразвуку в ОК $C_{ок}=5780$ м/с.

Відповідь: $\delta=0,642$ %.

Задача 7.5. Ультразвуковий товщиномір було відкалібровано на сталевому зразку із швидкістю поширення ультразвуку 5920 м/с. Яким буде абсолютне значення похибки вимірювання, якщо використовувати такий товщиномір для контролю сталевих виробів товщиною 10 мм, швидкість ультразвуку в яких 5980 м/с?

Відповідь: $\Delta H_c=0,1$ мм.

Задача 7.6. Розрахувати похибку, обумовлену шаром контактної рідини, при контролі сталевго зразку, якщо товщина контактного шару 0,1 мм, а швидкість ультразвуку: в рідині – 1500 м/с, в сталі – 5920 м/с.

Відповідь: $\Delta H_p \approx 0,79$ мм.

Задача 7.7. Оцінити похибку, обумовлену шорсткістю поверхні введення ультразвуку, при контролі алюмінієвого зразку, якщо шорсткість поверхні Rz40, а швидкість ультразвуку: в рідині – 1500 м/с, в алюмінії – 6300 м/с.

Відповідь: $\Delta H_{\text{ш}}=0,084$ мм.

Задача 7.8. Визначити реальну товщину виробу в місці вимірювання, якщо відомо, що поверхні виробу неплоскопаралельні. При цьому кут між поверхнями становить 5° , а виміряне значення товщини дорівнює 20 мм.

Відповідь: $H \approx 20,076$ мм.

Задача 7.9. Поршневий випромінювач гідролокатора діаметром $2a=1$ м використовується для передачі та прийому ультразвукових хвиль. Він реєструє сигнал, інтенсивність якого на 60 дБ менша, ніж інтенсивність випроміненої хвилі. За якої мінімальної частоти можна виявити сигнал від перешкоди, яка розташована на відстані $H=10$ км та віддзеркалює 20% інтенсивності, що падає на неї? Розміри перешкоди значно перевищують діаметр акустичного променя на заданій відстані. Вважати, що хвиля, яка падає на перешкоду та яка приймається гідролокатором в локальному об'ємі є плоскою, а довжина хвилі у воді набагато менша за радіус випромінювача $\lambda \ll a$. Швидкість ультразвуку у воді $C_{\text{в}}=1500$ м/с. Згасанням ультразвуку у воді знехтувати.

Відповідь: $f \approx 163,7$ кГц.

Задача 7.10. Максимальна глибина залягання дефекту в сталевому ОК становить $H=100$ мм. Швидкість ультразвуку в сталі $C_{\text{ст}}=5900$ м/с. Якою може бути максимальна частота посилок зондувальних імпульсів при роботі дефектоскопу в луно-імпульсному режимі, якщо вимірюється часова затримка між: а) зондувальним і першим донним сигналом; б) першим і другим донним сигналами?

Відповідь: а) $f=29,5$ кГц; б) $f=14,75$ кГц.

Задача 7.11. В сталевому ОК товщиною $H=5$ см ведеться пошук дефектів шляхом сканування зі швидкістю $v=15$ м/хв. Діаметр п'єзопластини перетворювача $D=10$ мм. Введення коливань відбувається нормально до поверхні ОК. Контроль проводиться в ближній зоні ПЕП. Режим контролю – луно-імпульсний. Розрахувати максимально можливу та мінімально допустиму частоту посилок зондувального імпульсу. Швидкість ультразвуку в ОК $C_{ок}=5800$ м/с.

Відповідь: $f_{max}=58$ кГц, $f_{min}=25$ Гц.

Задача 7.12. Луно-імпульсний товщиномір укомплектовано ПЕП з алюмінієвою лінією затримки товщиною 1 см. Яку максимальну товщину сталевго листа можна виміряти за допомогою такого товщиноміра, якщо вимірювання проводяться між першим імпульсом від межі алюміній-сталь та першим імпульсом від дна ОК? Яку максимальну товщину сталевго листа можна виміряти за допомогою такого товщиноміра, щоб уникнути похибки за рахунок контактного шару рідини на межі алюміній-сталь? Швидкості поширення ультразвуку в середовищах $C_{ал}=6300$ м/с, $C_{ст}=5800$ м/с.

Відповідь: в першому випадку $H_{max}=9,2$ мм, в другому випадку $H_{max}=4,6$ мм.

Задача 7.13. За допомогою похилого перетворювача, що має кут призми $\beta=51^\circ$, проводиться контроль головки залізничної рейки на наявність дефектів (див. рис. 7.13). Виміряний за допомогою дефектоскопу час затримки між зондувальним імпульсом та максимальним віддзеркаленим від дефекту луно-сигналом становить $T_{заг}=25$ мкс. Шлях променя в призмі $r_{пр}=10$ мм. Швидкості ультразвуку в середовищах: поздовжніх хвиль в призмі – $C_{лпр}=2700$ м/с, поздовжніх хвиль в матеріалі рейки – $C_{лок}=5900$ м/с, поперечних хвиль в матеріалі рейки – $C_{ток}=3250$ м/с. Визначити глибину залягання дефекту H .

Відповідь: $H=10,1$ мм.

Задача 7.14. За допомогою ультразвукового похилого перетворювача в сталевий ОК вводяться поперечні акустичні хвилі. Схема акустичного тракту

зображена на рис. 7.30. Дефект великої площі із дзеркальною поверхнею має нахил до поверхні ОК в основній площині ПЕП $\varphi=15^\circ$. Акустичний промінь віддзеркалюється від поверхні дефекту на глибині $H=15$ мм. Розрахувати положення точки виходу віддзеркалених від поверхні дефекту поперечної та поздовжньої хвиль на поверхню ОК відносно точки введення, а також кути, які повинні мати приймаючі датчики для реєстрації кожного типу хвиль. Призми всіх датчиків, які входять до акустичного тракту, виготовлені з оргскла, в якому швидкість поздовжніх хвиль дорівнює $C_{\text{пр}}=2700$ м/с. Кут призми випромінюючого датчика становить $\beta=35^\circ$ (більше за перший критичний кут). Швидкість поширення хвиль в ОК: поздовжніх – $C_{\text{лок}}=5980$ м/с, поперечних – $C_{\text{ток}}=3200$ м/с.

Відповідь: $L_l=29,2$ мм , $L_t=17,3$ мм.

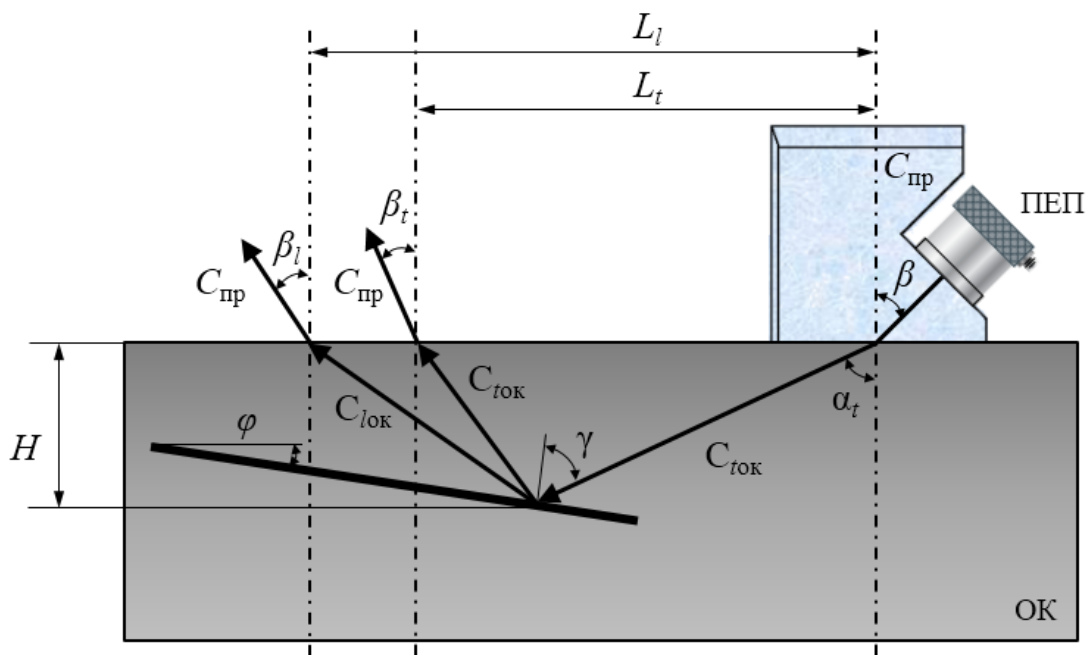


Рис. 7.30. Схема акустичного тракту (до задачі 7.14)

Задача 7.15. Контроль зварного шва виконується з використанням методу TOFD. Відстань між осями датчиків становить 80 мм. У результаті вимірювань отримані наступні часові затримки сигналів за наявності дефекту (див. рис. 7.21б): сигналу підповерхневої хвилі – 21,1 мкс, сигналу від верхнього краю тріщини – 21,8 мкс, сигналу від нижнього краю тріщини – 22,2 мкс, донного сигналу –

22,7 мкс. Визначити товщину ОК H , висоту дефекту h і глибину залягання його верхнього краю d . Швидкість поздовжніх хвиль в ОК $C_l=5860$ м/с.

Відповідь: $H \approx 20$ мм, $h \approx 3,4$ мм, $d \approx 13,05$ мм.

Задача 7.16. Роздільно-суміщений перетворювач випромінює коливання частотою f_0 . Відбивач рухається вздовж напрямку поширення ультразвуку зі швидкістю v . Швидкість поширення коливань C . На скільки зміниться частота прийнятого луно-сигналу, якщо відбивач змінить напрямок руху на зворотній?

Відповідь: $4f_0 \frac{v}{C}$.

Задача 7.17. Кровоносна судина має нахил 10° до поверхні тіла. Кут введення ультразвукового променя в тіло дорівнює 70° . Якою буде максимальна (з двох можливих) частота Допплера, якщо робоча частота становить 5 МГц, а максимальна швидкість кровотоку в судині 1 м/с? Середня швидкість поширення ультразвуку в тілі людини $C=1,5 \cdot 10^3$ м/с.

Відповідь: $f_{d1}=6,5$ кГц, $f_{d2}=5,77$ кГц.

Задача 7.18. Ультразвуковий вбудований витратомір складається із двох ПЕП, що розміщені на протилежних сторонах труби з внутрішнім діаметром 10 см. При цьому ПЕП мають безпосередній контакт з рідиною, а їх акустична вісь складає 60° з віссю труби. Визначити максимальну частоту ультразвуку, при якій можна було б фазовим методом вимірювати швидкість потоку води в трубі до 3 м/с. Швидкість поширення ультразвуку у воді 1500 м/с.

Відповідь: $f \approx 6,5$ МГц.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть класифікацію акустичних методів НК.
2. Що таке «акустичний контакт»? Коли він необхідний? Як його забезпечити?

3. Поясніть, в чому полягає відмінність порогового методу вимірювання часової затримки від методу перетину нуля.
4. Поясніть причини виникнення основної та додаткових похибок вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміра.
5. Дайте пропозиції, які необхідно вжити заходи, щоб зменшити загальну похибку вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміра.
6. В чому полягає відмінність між дифузним та дзеркальним відбиттям акустичної хвилі від дефекту?
7. Чим відрізняється підключення суміщеного та роздільно-суміщеного перетворювача до дефектоскопу?
8. Яку функцію в луно-імпульсних дефектоскопах виконують генератор зондувальних імпульсів та генератор синхроімпульсів?
9. Який набір вимірювальних характеристик використовується при ідентифікації дефектів?
10. Від чого залежить променева та фронтальна роздільні здатності? Якими заходами їх можливо покращити?
11. За яких умов контролю передбачено використання схеми АРП?
12. За яких умов контролю передбачено використання схеми ЧРЧ?
13. Що таке мертва зона? Проаналізувати, які параметри сигналу випромінювання та характеристик ОК впливають на глибину мертвої зони.
14. Поясніть основні ідеї, які покладені в основу методу TOFD.
15. Які обмеження має метод TOFD?
16. Поясніть, в чому полягає відмінність між часоімпульсними та доплерівськими витратомірами?
17. Поясніть, яким чином визначається частота Допплера при використанні роздільно-суміщеного ПЕП для контролю швидкості кровотоку в судинах.
18. Що таке акустична емісія? Які основні причини її виникнення?
19. Опишіть основні вимірювальні параметри сигналів АЕ.
20. Чим відрізняється дискретна та неперервна АЕ?

ЛІТЕРАТУРА

1. Акопян Б. В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / Б. В. Акопян, Ю. А. Ершов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 224 с.
2. Акустика в задачах. Учеб. рук-во: для вузов / А. Н. Бархатов, Н. В. Горская, А. А. Горюнов и др.; под ред. С. Н. Гурбатова, О. В. Руденко. – М. : Наука. Физматлит, 1996. – 336 с.
3. Алешкевич В. А. Колебания и волны. Лекции / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. – М. : Физический факультет МГУ, 2001. – 144 с.
4. Алёшин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н. П. Алёшин. – М. : Машиностроение, 2006. – 368 с.
5. Балдев Р. Применения ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. – М. : Техносфера, 2006. – 576 с.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М. : Иностр. лит., 1957. – 726 с.
7. Биргер Г. И. Ультразвуковые расходомеры / Г. И. Биргер, Н. И. Бражников. – М. : Металлургия, 1964. – 343 с.
8. Близнюк В. Ультразвуковые расходомеры и система учёта на их основе / В. Близнюк, В. Костылев, В. Сорокопут, Анат. Стеценко, Андр. Стеценко // Современные технологии автоматизации. – Москва. – 1998. – № 2. – С. 70–73.
9. Вайншток И. С. Ультразвук и его применение в машиностроении / И. С. Вайншток. – М. : ГНТИМЛ, 1958. – 140 с.
10. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б. И. Выборнов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
11. Галаган Р. М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: влияние субъективной погрешности / Р. М. Галаган, Г. А. Богдан // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування. – Київ. – 2015. – № 49(1). – С. 53-60.

12. Галаган Р. М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: влияние инструментальной и методической погрешностей / Р. М. Галаган, Г. А. Богдан // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування. – Київ. – 2016. – № 51(1). – С. 52-57.

13. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г. С. Горелик; под ред. С. М. Рытова. – 3-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 656 с.

14. ГОСТ 31295.1-2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 1. Расчет поглощения звука атмосферой». – Введён впервые; введ. 01.01.2007. – М. : Стандартиформ, 2006. – 34 с.

15. ГОСТ 14782-86 «Соединения сварные, методы ультразвуковые». – Взамен ГОСТ 14782-76; введ. 01.01.88. – М. : Стандартиформ, 2005. – 25 с.

16. ГОСТ 26266-90 «Преобразователь ультразвуковые. Общие технические требования». – Взамен ГОСТ 26266-84; введ. 01.01.91. – М. : Стандартиформ, 2010. – 18 с.

17. ГОСТ ИЕС 62127-1-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Параметры ультразвуковых полей. Общие требования к методам измерений и способам описания полей в частотном диапазоне от 0,5 до 40 МГц». – Введён впервые; введ. 01.07.2017. – М. : Стандартиформ, 2016. – 58 с.

18. ГОСТ Р 52727-2007 «Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования». – Введён впервые; введ. 14.06.2007. – М. : Стандартиформ, 2007. – 12 с.

19. ГОСТ Р ИСО 5577-2009 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь». – Введён впервые; введ. 01.01.2011. – М. : Стандартиформ, 2011. – 26 с.

20. Грешников В. А. Акустическая эмиссия / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.

21. Грінченко В. Т. Основи акустики: навч. посіб. / В. Т. Грінченко, І. В. Вовк, В. Т. Маципура. – Київ : Наук. думка, 2007. – 640 с.

22. Гурский И. П. Элементарная физика с примерами решения задач / И. П. Гурский. – М. : «Наука», 1976. – 464 с.

23. Домаркас В. Й. Ультразвуковая эхоскопия / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. – Л. : Машиностроение, 1988. – 276 с.
24. Ермолов И. Н. Расчёты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справ.) / И. Н. Ермолов, А. Х. Вopilкин, В. Г. Бадалян. – М. : ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2004. – 108 с.
25. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.
26. Зацепин А. Ф. Акустический контроль: учеб. пособие / А. Ф. Зацепин; под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В. Е. Щербинина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 211 с.
27. Зисман Г. А. Курс общей физики. Т. 1. Колебания и волны / Г. А. Зисман, О. М. Тодес – М. : Наука, 1974. – 336 с.
28. Иродов И. Е. Задачи по общей физике: учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : «Наука», 1988. – 416 с.
29. Капранов Б. И. Акустические методы контроля и диагностики. Ч. 1: учеб. пособие / Б. И. Капранов, М. М. Коротков. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. – 186 с.
30. Козлов В. В. Проверка средств неразрушающего контроля / В. В. Козлов. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 215 с.
31. Королёв М. В. Широкополосные ультразвуковые преобразователи / М. В. Королёв, А. Е. Керпельсон. – М. : Машиностроение, 1982. – 155 с.
32. Красильников В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов. – М. : Наука, 1984. – 403 с.
33. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «СВЕН», 2007. – 296 с.
34. Ланге Ю. В. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник. Издание второе, исправленное / Ю. В. Ланге, В. А. Воронков. – М. : Авторское издание, 2003. – 120 с.
35. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости: учеб. пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : «Наука», 1987. – 248 с.

36. Методы акустического контроля металлов / Под ред. Н. П. Алешина. – М. : Машиностроение, 1989. – 456 с.
37. Мякишев Г. Я. Физика. Колебания и волны. Профильный уровень: учеб. для общеобразоват. учреждений / Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков. – 9-е изд., стереотип. – М. : Дрофа, 2010. – 287 с.
38. Неразрушающий контроль и диагностика: справ. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалёв и др.; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.
39. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.
40. Неразрушающий контроль: справ. : В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И. Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов; Кн. 2: Балицкий Ф. Я. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 829 с.
41. Неразрушающий контроль: справ.: В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 864 с.
42. Никитин Ю. М. Ультразвуковая доплеровская диагностика в клинике / Ю. М. Никитин, А. И. Труханов. – Иваново: МИК, 2004. – 496 с.
43. Осипов Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы: практическое руководство пользователя / Л. В. Осипов. – М. : Видар, 1999. – 256 с.
44. Полунин В. М. Физические основы измерений: Конспект лекций / В. М. Полунин, Г. Т. Сычев, А. И. Шумаков. – Курск: Курский гос. техн. ун-т., 2004. – 261 с.
45. Применение ультразвука в медицине: физические основы / Под ред. К. Хилла. – пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 568 с.
46. Промышленный контроль методом фазированных решеток: теоретические основы / Olympus NDT Inc. – USA, Waltham: Olympus Scientific Solutions America, 2015. – 130 с.

47. Путилов К. А. Курс физики. Т. I. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика / К. А. Путилов. – М. : ГИ ФМЛ, 1963. – 560 с.
48. Пьезокерамические преобразователи: справ. / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша, Н. И. Прудько, С. И. Пугачев. – Л. : Судостроение, 1984. – 256 с.
49. Р 50.2.038-2004 «ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений». – Взамен МИ 1552-86; введ. 01.01.2005. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
50. РД 50-453-84 «Методические указания характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета». – Введён впервые; введ. 01.01.1986. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.
51. Ржевкин С. Н. Задачи по теории звука / С. Н. Ржевкин. – М. : Изд-во Московского ун-та, 1976. – 52 с.
52. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны / Г. М. Свердлин. – Л. : Судостроение, 1988. – 200 с.
53. Справочник. Расходомеры и счетчики количества веществ: Кн. 2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 412 с.
54. Сучков Г. М. Акустический контроль: учеб. пособие / Г. М. Сучков, Е. Л. Ноздрачева. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – 138 с.
55. Теория волновых процессов. Акустические волны: учеб. пособие / И. П. Соловьянова, С. Н. Шабунин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 142 с.
56. Троицкий В. А. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. А. Троицкий, В. Ю. Попов. – Киев: Феникс, 2010. – 224 с.
57. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под. ред. И. П. Голяминой. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
58. Ультразвуковой контроль материалов: справ. изд. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – пер. с нем. – М. : Metallurgia, 1991. – 752 с.

59. Ультразвуковой контроль — Краткий обзор [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.olympus-ims.com/ru/ndt-tutorials/flaw-detection> (дата звернення 22.12.2018 р.). – Назва з екрана.
60. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И. Н. Ермолова. – М. : Машиностроение, 1986. – 280 с.
61. Физика: 3800 задач для школьников и поступающих в вузы / Авт.-сост. Н. В. Турчина, Л. И. Рудакова, О. И. Суров и др. – М. : Дрофа, 2000. – 672 с.
62. Филоненко Ф. С. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / Ф. С. Филоненко. – Киев: КМУГА, 1999. – 312 с.
63. Цапенко В. К Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / В. К. Цапенко, Ю. В. Куц. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – 448 с.
64. Чертов А. Г. Задачник по физике: учеб. пособие для студентов вузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 527 с.
65. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова; под ред. В. М. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
66. Шиляев А. С. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учеб.-метод. пособие / А. С. Шиляев, С. П. Кундас. А. С. Стукин; под общ. ред. проф. С. П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 110 с.
67. Щербинский В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. – М. : «Тиссо», 2003. – 328 с.
68. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: учеб. пособие / В. А. Шутилов. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
69. Элементарный учебник физики: учеб. пособие. В 3 т. / Под ред. Г. С. Ландсберга: Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 656 с.
70. ASM International (1989) *ASM Handbook. Vol. 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control*. – Metals Park, Ohio: ASM International. – 795 p.

71. J. C. Drury (2004) *Ultrasonic Flaw Detection for Technicians*, 3rd ed. – Wales: Llandarcy Neath, Imex Group Limited. – 252 p.
72. Olympus NDT (2007) *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. – USA: Waltham, Olympus NDT. – 491 p.
73. Olympus NDT (2007) *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*. – USA: Waltham, Olympus NDT. – 354 p.

ДОДАТОК А. Акустичні характеристики деяких матеріалів та речовин

Таблиця А1. Акустичні властивості газових та рідинних середовищ

Речовина	C_l , 10^3 м/с	ρ , 10^3 кг/м ³	z , 10^6 кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Коефіцієнт згасання в діапазоні частот	
				f , 10^6 Гц	α/f^2 , 10^{-14} (Нп·с ²)/м
Гази					
Повітря	0,331...0,34	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$	1,1...1,4	1800
Водень	1,248	$0,09 \cdot 10^{-3}$	$0,11 \cdot 10^{-3}$	—	3580
Кисень	0,316	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-3}$	—	1680
Азот	0,334	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$	—	1350
Гелій	0,965	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-3}$	—	2960
Рідини					
Вода дистильована	1,483	0,988	1,48	1...250	2,3
Вода морська	1,51	—	—	—	—
Ртуть	1,45	13,6	19,7	21...996	1,2...1,3
Гліцерин	1,92	1,27	2,43	0,5...4	250
Масло трансформаторне	1,32...1,4	0,9...0,92	1,3	1...5	130
Спирт етиловий (питний)	1,18	0,789	0,93	13...220	5,4
Бензин	1,2...1,3	0,71...0,8	0,95	—	—

Таблиця А2. Акустичні властивості металів та їх сплавів

Речовина	C_L , 10^3 м/с	C_T , 10^3 м/с	ρ , 10^3 кг/м ³	z , 10^6 кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Коефіцієнт Пуассона, ν	f , 10^6 Гц	α , Нп/м
Метали							
Алюміній	6,24	3,1	2,7	17,2	0,34	2,5	0,1...1,0
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8,0...9,0	30,0...34,0	0,33...0,38	—	—
Вольфрам	5,32	2,6	19,3	102,7	0,35	—	—
Дюралюміній	6,2...6,4	3,0...3,2	2,7...2,8	19,0...20,0	0,34	2,5	0,1...1,0
Залізо	5,93	3,23	7,8	46,3	0,29	2,5	0,2...5,0
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	36,0...40,0	0,35	—	—
Магній	5,74	3,05	1,74	9,98	0,33	2,5	0,1...2,0
Мідь	4,72	2,3	8,9	42,0	0,35	2,5	2,5...5,0
Нікель	5,7	3,0	8,9	50,7	0,31	—	—
Олово	3,32	1,67	7,3	24,2	0,39	—	—
Свинець	2,16	0,8	11,4	24,6	0,42...0,44	—	—
Срібло	3,65	1,65	10,5	38,3	0,37	—	—
Сталь вуглецева	5,9...5,94	3,22...3,25	7,7...7,9	45,9...46,3	0,24...0,28	2,5	0,1...10
Сталь аустенітна	5,7...6,14	3,20...3,31	7,6...8,0	44,0...48,0	—	2,5	0,3...40
Титанові сплави	6,05...6,3	3,1...3,3	4,5...4,7	27,0...29,0	—	—	—
Цинк	4,17	2,41	7,1	29,6	0,25...0,27	—	—
Чавун	3,5...5,8	2,2...3,2	7,0...7,5	26,0...42,0	0,22...0,27	2,5	0,3...50

Таблиця А3. Акустичні властивості неметалів

Речовина	C_l , 10^3 м/с	C_t , 10^3 м/с	ρ , 10^3 кг/м ³	z , 10^6 кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Коефіцієнт Пуассона, ν	f , 10^6 Гц	α , Нп/м	α/f , 10^{-6} (Нп·с)/м
Неметали								
Бетон	2,1...5,2	–	1,8...2,8	6,0...9,5	–	–	–	–
Кварц плавлений	5,95	3,75	2,2	13,1	0,17	2,5	0,31	0,13
Полістирол	2,37	1,12	1,1	2,5	0,35	2,5	10...13	0,02
Гума	1,4...2,3	–	0,9...1,6	2,0...3,0	–	2,5	30...60	–
Скло віконне	5,7	3,4	2,1...2,6	11,0...15,0	0,25	2,5	0,4...0,7	–
Органічне скло	2,65...2,73	1,12...1,13	1,17...1,2	3,0...3,3	0,35	2,5	25...35	0,08
Текстоліт	2,4...2,8	1,1...1,4	2,3...2,5	6,0...6,4	–	2,5	80...120	–
Фарфор	5,3...6,8	3,1...3,8	2,3...2,6	15,0...20,0	0,23	2,5	0,1...0,4	–
Фторопласт	1,35	–	2,2	3,0	–	2,5	160...180	0,6
Ебоніт	2,4	–	1,2	2,9	–	2,5	90	0,34
ЕД-5 з вольфрамом 0%	2,5...2,8	1,2	1,15...1,3	2,8...3,0	–	2,5	100	0,4
Капрон	2,5...2,6	1,1	1,1	2,8...2,9	–	–	–	–
Нейлон	1,8...2,2	–	1,1...1,2	1,9...2,7	–	2,5	33	–
Смола акрилова	2,6	1,12	1,18	3,2	–	–	–	–
ПВХ	2,38	1,06	1,38	3,27	–	–	128	–
Поліетилен	1,95	0,540	0,9	1,8	–	–	–	–
Rexolite®	2,34	–	1,056	2,47	–	–	–	–

ДОДАТОК Б. Швидкості поширення ультразвуку в різних конструкційних матеріалах

Таблиця Б1. Конструкційні марки сплавів на основі заліза

Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с	Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с
Залізо АРМКО	5930	Сталь ЭП428	5990
Сталь 3	5930	Сталь ЭП543	5750
Сталь 10	5920	Сталь 30ХРА	5900
Сталь У10	5925	Сталь ЭП814	5900
Сталь 40	5925	Сталь ЭИ437БУ	5990
Сталь У8	5900	Сталь ЭИ612	5680
Сталь 50	5920	Сталь ЭИ617	5930
Сталь 45Л-1	5925	Сталь ЭИ766А	6020
Сталь ШХ-15	5965	Сталь ЭИ826	5930
Сталь 40Х13	6070	Сталь ХН77ТЮР	6080
Сталь 30ХГСА	5915	Сталь 40ХНМА	5600
Сталь 30ХМА	5950	Сталь ХН70ВМТЮ	5960
Сталь 08Х17Н14М3	5720	Сталь ХН35ВТ	5580
Сталь 1Х18Н9Т	5720	Сталь Х15Н15ГС	5400
Сталь ЭП33	5650	Сталь 20ГСНДИ	6060

Таблиця Б2. Конструкційні марки сплавів на основі алюмінію

Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с	Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с
Д16АТ	6365	АМГ-5М	6390
Д16	6380	АМГ6	6380
Д16ТПП	6420	АМГ-6М	6405
В95Т1ПП	6330	АД	6360
АМГ 2	6390	АД1	6385
АМГ-2М	6390	Д1	6365
АМГ 3	6400	АМЦ	6405
В95	6280	АК4-1	6390

Таблиця Б3. Конструкційні марки сплавів на основі титану

Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с	Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с
ВТ 6С	6150	ВТ 9	6180
ОТ 4	6180	З В	6170
ВТ 4	6090	ВТ 1	6080
ВТ14	6105		

Таблиця Б4. Конструкційні марки сплавів на основі міді

Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с	Позначення марки сплаву	Швидкість поширення повздовжніх УЗК, м/с
Мідь	4680	Л 68	4260
М 1	4780	БрХ0, 8Л	4850
М 2	4750	БрХ0, 8Д	4860
ЛС 52-1	4050	БрКМЦ 3-1	4820
ЛС 59-1	4360	БрОЦ 4-3	4550
ЛС 63	4180	БрАМц 9-2	5060
Л 62	4680	БрАЖМц 10-3-1,5	4900
Л 63	4440		

ДОДАТОК В. Графіки залежностей згасання хвиль від частоти в деяких матеріалах

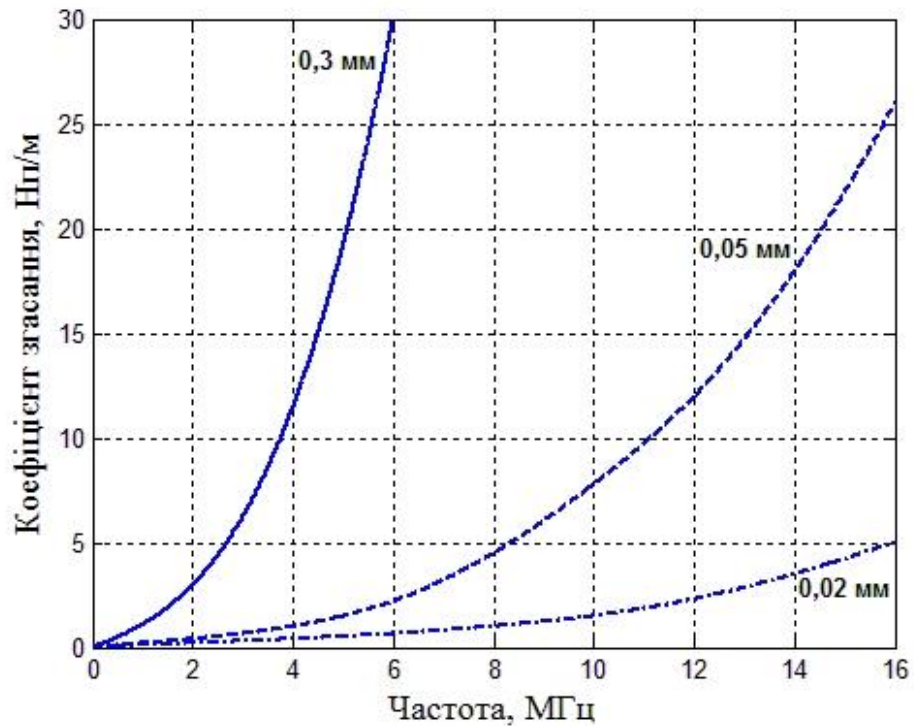


Рис. В1. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти у сталі 40
(на кривих вказаний середній розмір зерна)

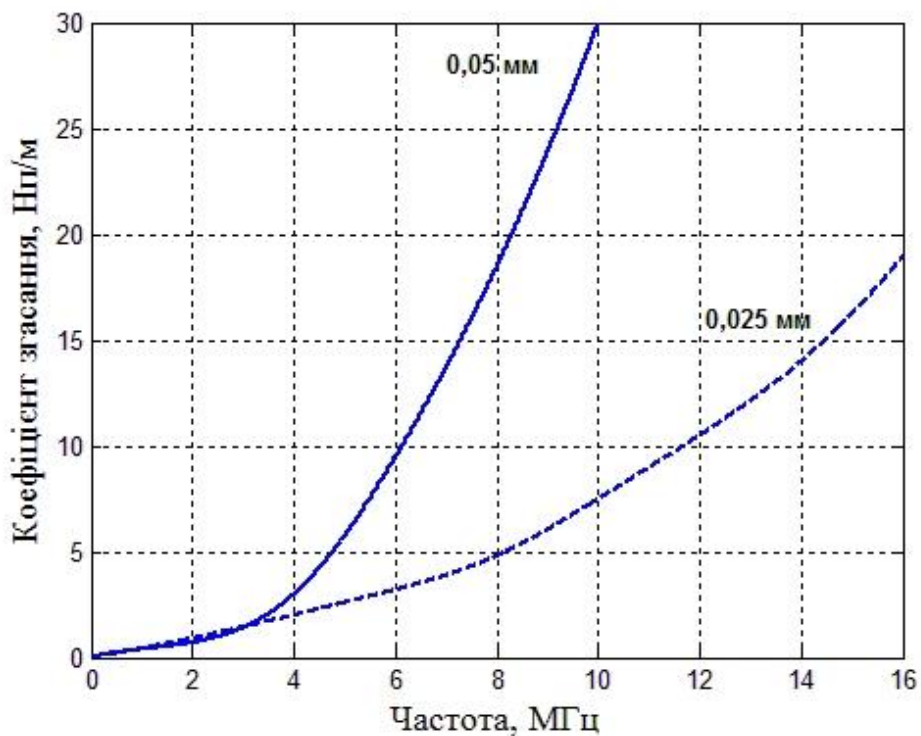


Рис. В2. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти у сталі 15
(на кривих вказаний середній розмір зерна)

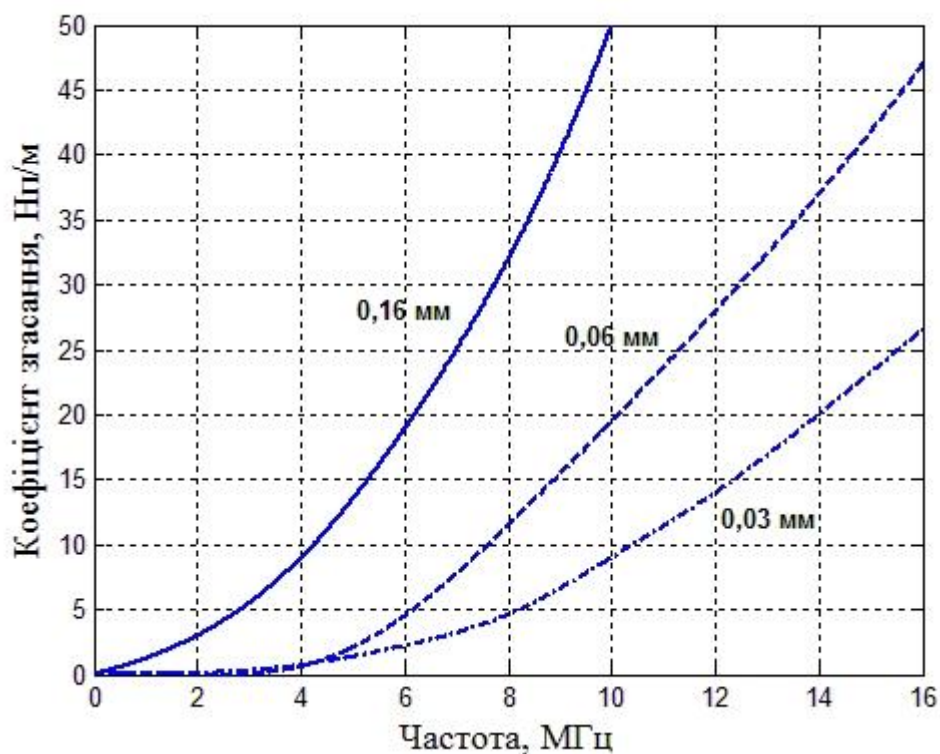


Рис. В3. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти в інструментальній сталі У12
(на кривих вказаний середній розмір зерна)

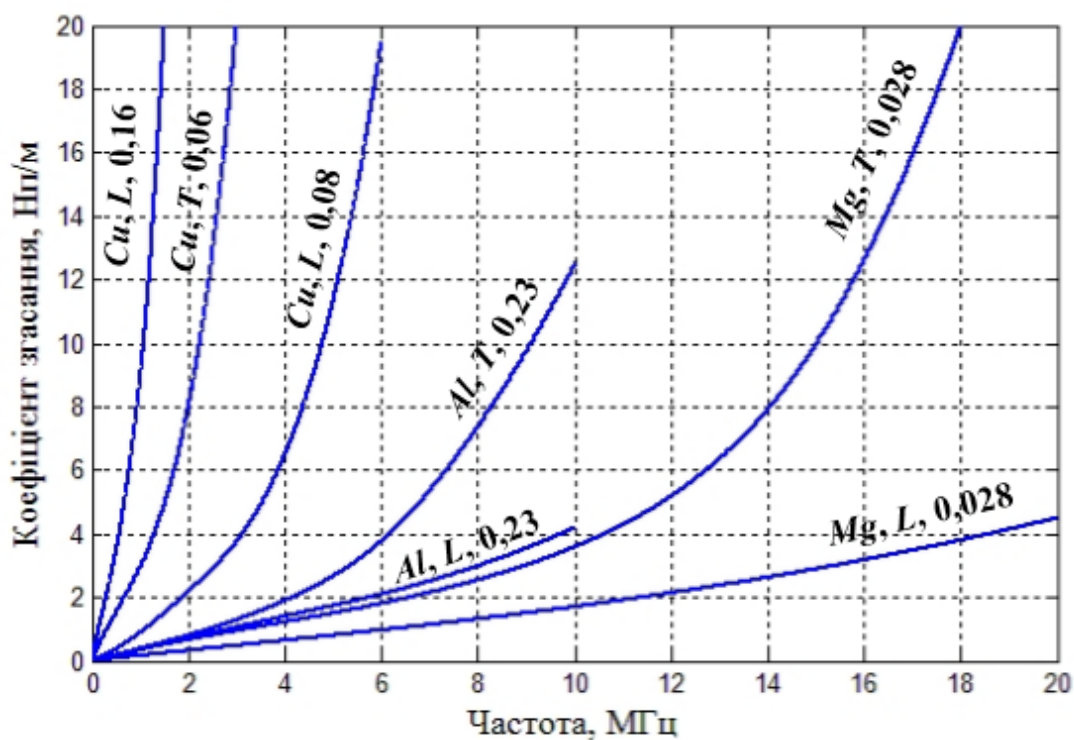


Рис. В4. Залежність згасання поздовжніх та поперечних хвиль від частоти в металах
(на кривих вказано хімічний символ, тип хвилі та середній розмір зерна в мм)

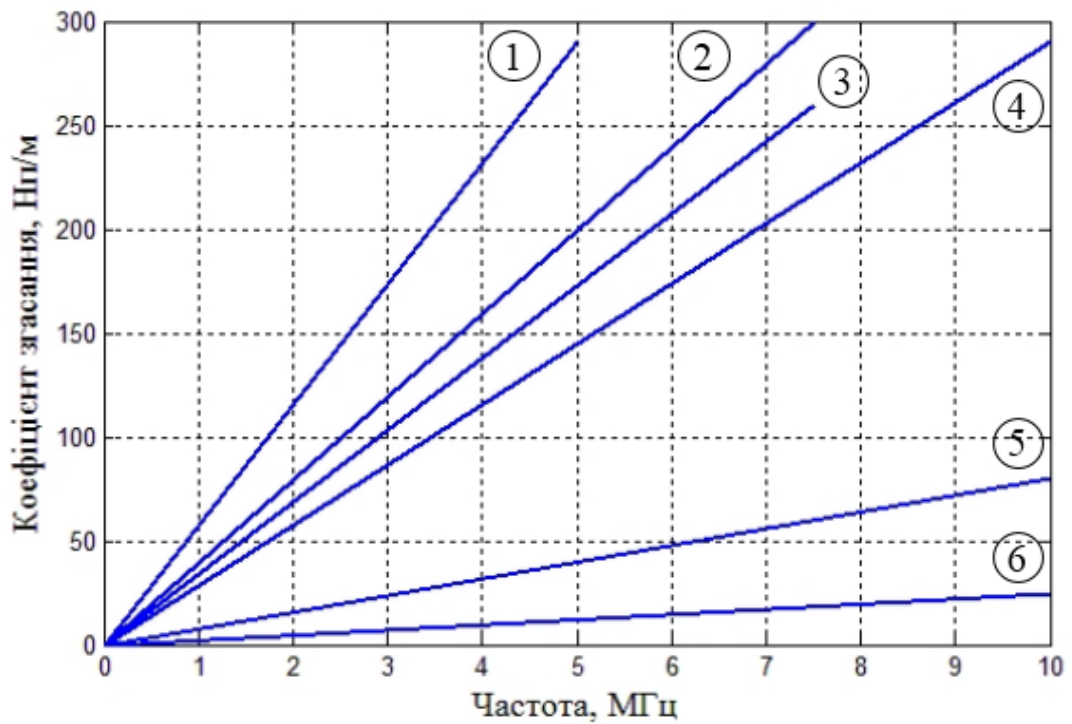


Рис. В5. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти в неметалах:

- 1 – фторопласт; 2 – затверділа епоксидна смола ЕД-5; 3 – ебоніт;
4 – компанунд К-153; 5 – оргскло; 6 – полістирол

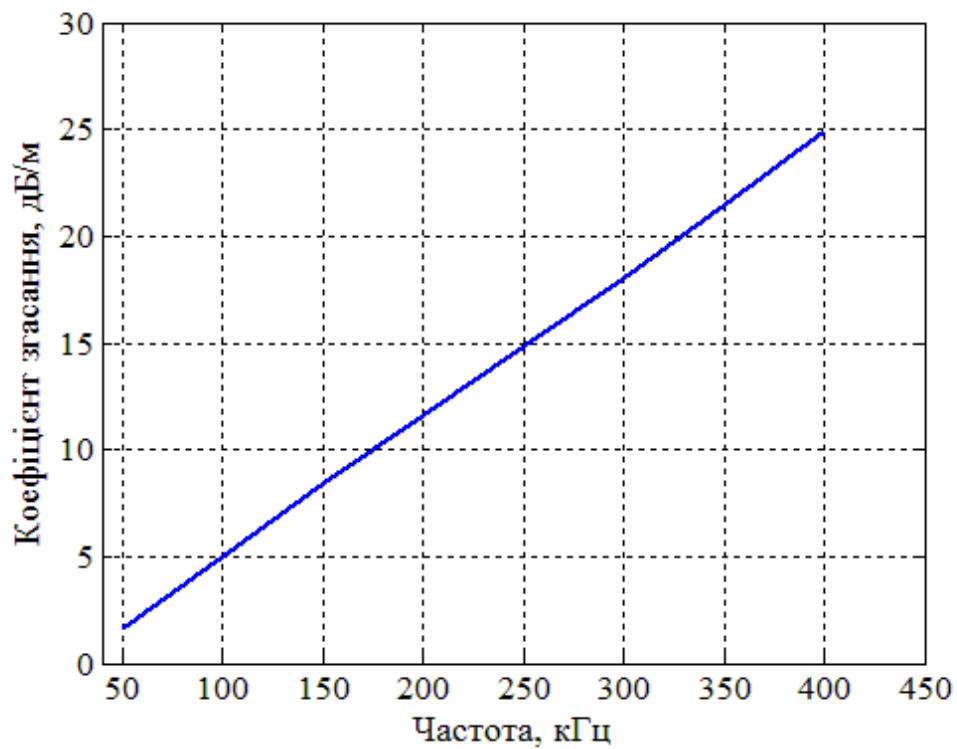


Рис. В6. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти в повітрі у діапазоні частот 50-400 кГц при температурі 20°C, тиску 1 атм, відносній вологості 80%

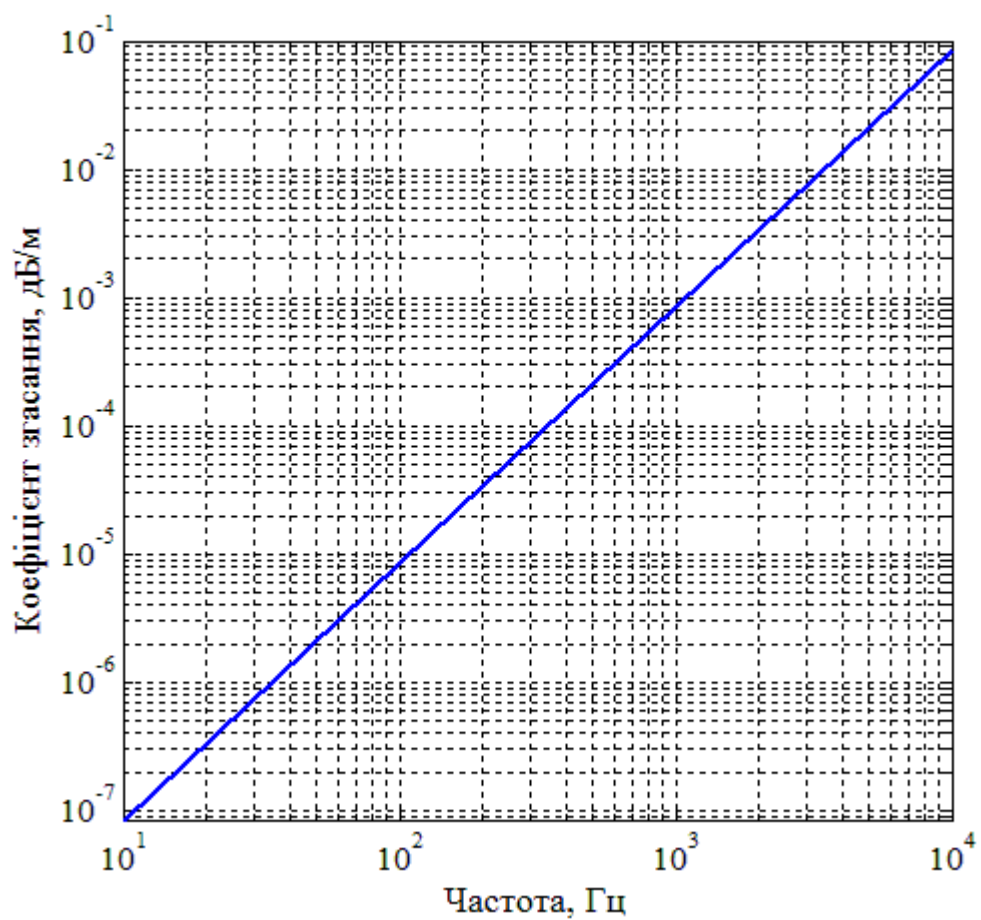


Рис. В7. Залежність згасання поздовжніх хвиль від частоти в повітрі у логарифмічному масштабі в діапазоні частот 10-10000 Гц за нормальних умов і відносній вологості 70%

ДОДАТОК Г. Коефіцієнти згасання ультразвуку частотою 2,5 МГц для деяких металів

Таблиця Г1. Коефіцієнт згасання в металах

Метал	Коефіцієнт згасання, дБ/мм	
	Поздовжні хвилі	Поперечні хвилі
Сталь перлітна		
Виливки	0 – 0,018	-
Литі заготовки	0 – 0,013	-
Прокат, поковки	0 – 0,009	-
Зварні з'єднання	0 – 0,009	0,009 – 0,018
Сталь аустенітна		
Литво	0,018 – 0,9	-
Дрібні поковки и прокат	0 – 0,018	-
Великі поковки	0 – 0,09	-
Зварні з'єднання	0,13 – 0,18	0,13 – 0,26
Титан		
Зливи	0,009 – 0,054	-
Поковки	0,009 – 0,045	-
Зварні з'єднання	0,018 – 0,045	0,045 – 0,063
Алюміній		
Литво	0,009 – 0,072	-
Поковки	0 – 0,009	-
Зварні з'єднання	0 – 0,009	0,009
Бронза		
Литво	0,045 – 0,9	-
Поковки	0,018 – 0,045	-

ДОДАТОК Д. Акустичні властивості біологічних тканин та води

Таблиця Д1. Акустичні властивості біологічних тканин та води

Тканина	Швидкість ультразвуку, м/с	Середня густина, кг/м ³	Коефіцієнт згасання на частоті 1 МГц, дБ/см
Кров	1540-1600	1050-1060	0,09-0,13
Мозок	1510-1590	1030	0,85-0,9
Жирова тканина	1360-1480	850-950	0,55-0,65
М'язи серця	1540-1580	1060	1,8-2,0
Нирка	1550-1570	1070	1,5-2,5
Печінка	1550-1620	1080	0,6-0,94
Легені	400-1200	-	30
Камені печінки	1400-2200	940-1090	-
Селезінка	1520-1600	1080	0,5-0,8
Шкіра	1500-1740	-	3,5
М'яз: вздовж фібрил поперек фібрил	1560-1640	1070	0,7-1,3 3,3
М'які тканини (середнє значення)	1540	1060	-
Кісткова тканина	2500-4300	1200-1800	>8
Кістки черепа	3660-4080	1700-1900	9-13
Кришталік ока	1620-1650	1100	-
Дистильована вода	1480	1000	0,0019-0,0022
Фіз. розчин	1500-1570	-	-

ДОДАТОК Е. Технічні характеристики п'єзоматеріалів

Таблиця Е1. Технічні характеристики п'єзоматеріалів

Матеріал	Швидкість звуку C , 10^3 м/с	Густина ρ , 10^3 кг/м ³	Характеристичний імпеданс Z , 10^6 Па·с/м	Відносна діелектрична проникність, ϵ	Електрична міцність $E_{\max}$, 10^3 В/мм	П'єзомодуль d_{33} , 10^{-12} Кл/Н	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку, K_p	Температура Кюрі, °С	Механічна добротність, Q
П'єзокераміка вітчизняного (або країн ближнього зарубіжжя) виробництва									
ЦТС-19	3,3±0,3	7,4-7,5	22-27	1750±200	3,0	330-350	0,45-0,6	>290	80
ЦТС-23	3,0-3,3	7,4-7,6	22,2-25,0	1050±150	3,0	200-240	0,45-0,5	280	300
ЦТС-36	3,0-3,3	7,7	-	670	-	220	0,57	350	80
ЦТССт-1	3,5	7,3	24,5	1000±150	-	180	0,43	260	500
ТКС-21 (РСТ-21)	4,96-5,16	7,0	-	390-440	7,0	90-100	0,13-0,16	200-220	100-200
П'єзокераміка виробництва США									
PZT-2	3,36	7,6	-	990	0,8	152	0,47	370	680
PZT-4	4,6	7,5	-	1300	-	389	0,58	328	500
PZT-5Н	2,85	7,5	-	3400	0,6	593	0,65	193	65
PZT-8	3,39	7,6	-	1000	0,9	218	0,5	300	1000
П'єзокераміка виробництва Німеччини									
PXE-1	-	5,7	-	900	-	85	0,28	130	1000
PXE-4	-	7,65	-	1500	0,77	265	0,55	300	500
PXE-5	-	7,6	-	1750	0,65	365	0,62	285	80
П'єзополімерна плівка									
ПВДФ	1,5-2,5	1,3-1,8	2,0-4,5	11-13	-	25	0,1-0,14	150	-

ДОДАТОК Ж. Графіки та таблиці залежностей швидкості ультразвуку від температури в деяких середовищах

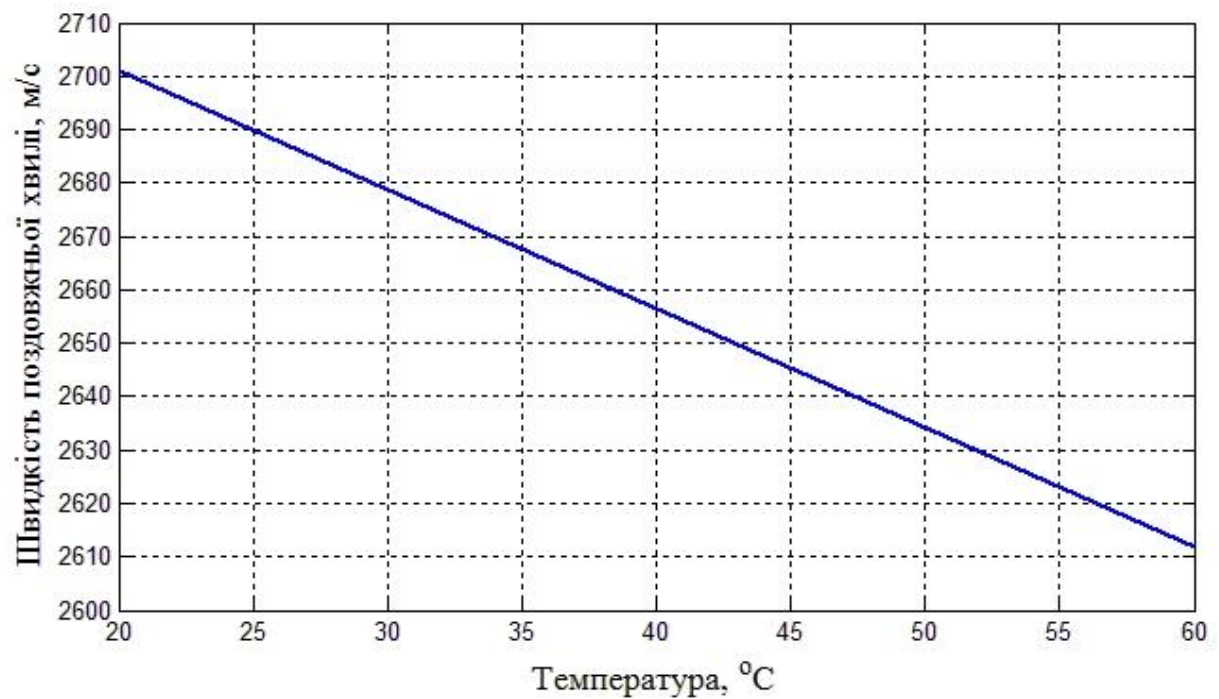


Рис. Ж1. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль
від температури в призмі із плексигласу

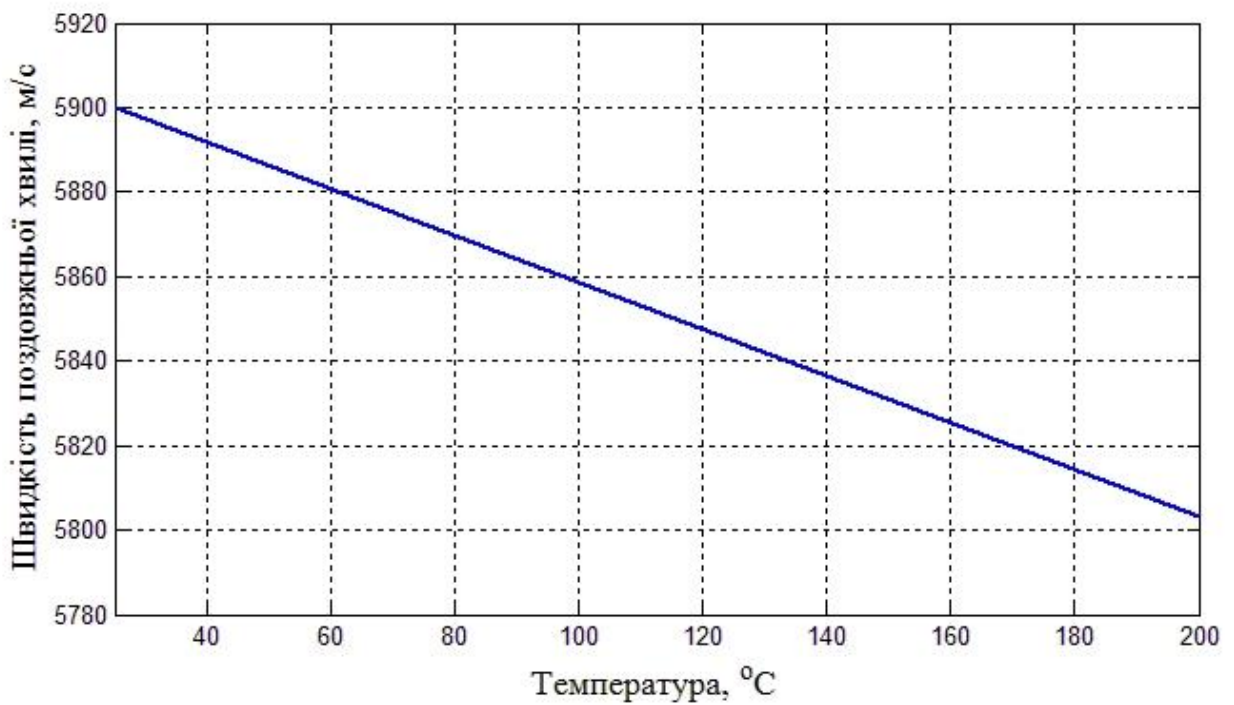


Рис. Ж2. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль
від температури в сталі

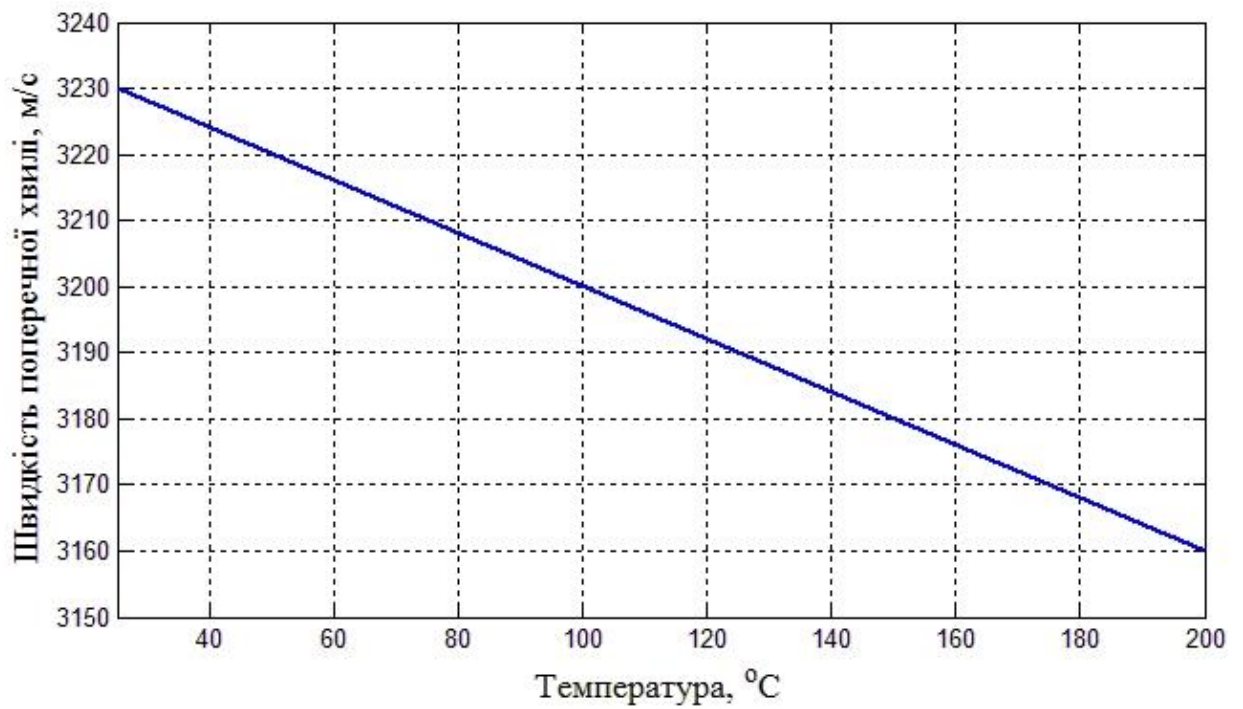


Рис. Ж3. Залежність швидкості поперечних ультразвукових хвиль від температури в сталі

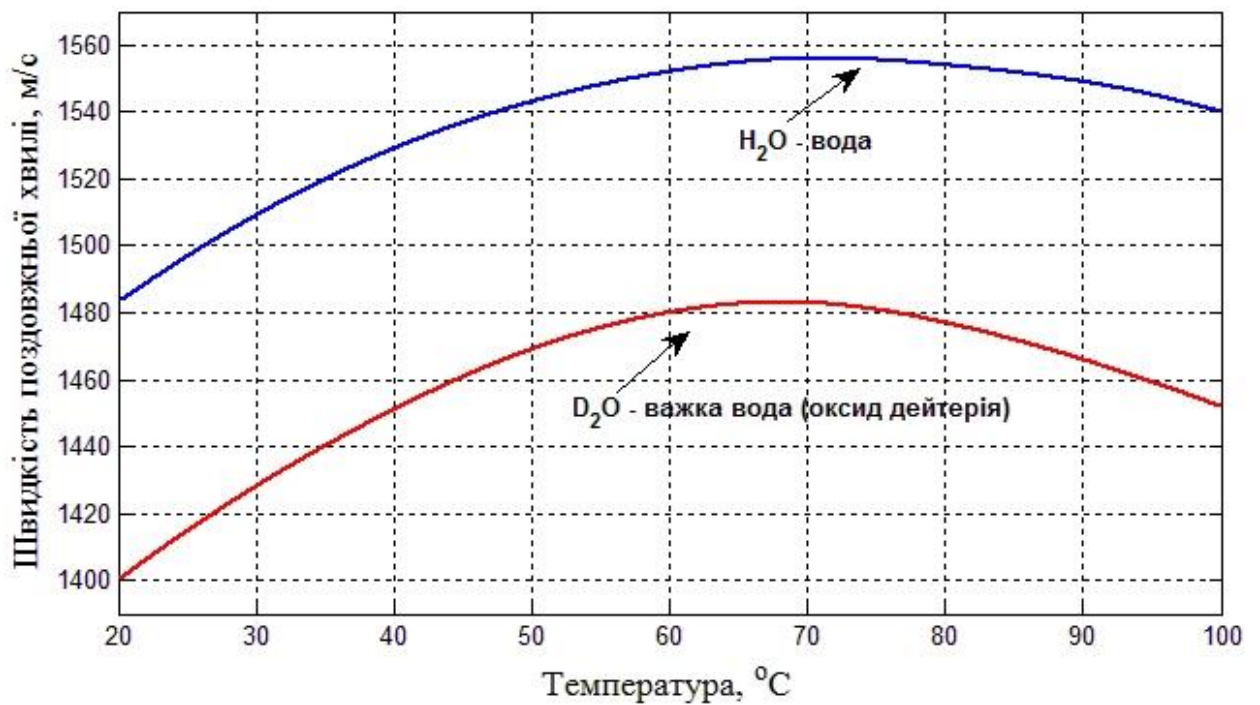


Рис. Ж4. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль від температури у воді

Таблиця Ж1. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль
від температури у повітрі

Температура повітря, °С	Швидкість звуку в повітрі	
	м/с	км/год
-150	216,7	780,1
-100	263,7	942,2
-50	299,3	1077,6
-20	318,8	1147,8
-10	325,1	1170,3
0	331,5	1193,4
10	337,3	1214,1
20	343,1	1235,2
30	348,9	1256,2
50	360,3	1296,9
100	387,1	1393,7
200	436,0	1569,5
300	479,8	1727,4
400	520,0	1872,1
500	557,3	2006,4
1000	715,2	2574,8