

УДК 534.6.08

О.М. Мокрий

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра фотоніки

## МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ПОГЛИНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В СИЛЬНО ПОГЛИНАЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ

© Мокрий О.М., 2010

О.М. Mokryy

## MEASUREMENT METHOD OF ULTRASOUND WAVES ATTENUATION IN HIGHLY ATTENUATION MEDIUM

© Mokryy O.M., 2010

Запропоновано нову методику вимірювання поглинання акустичних хвиль в сильно поглинаючих середовищах. Методика дає змогу вимірювати в ближній зоні акустичного поля. За допомогою числового моделювання розраховано розподіл амплітуди акустичної хвилі на поверхні зразка. Показано, що поверхневий розподіл амплітуди залежить від поглинання акустичних хвиль і дає можливість визначити поглинання акустичних хвиль.

*Ключові слова: акустичні хвилі, поглинання.*

New method for measurement of an acoustic wave attenuation has been proposed. This method allows measurements in the near field. The amplitude distribution of acoustic wave at the sample surface is calculated by numerical simulation. It was shown that surface distribution of acoustic wave amplitude depends on the acoustic wave attenuation and allows determine it.

*Keywords:: acoustic waves, absorbtion.*

### Вступ

Поглинання акустичних хвиль є однією з важливих характеристик різноманітних речовин, як з погляду їх застосування в техніці, так і в наукових дослідженнях. Як приклад можна навести використання різноманітних матеріалів в акустоелектроніці та акустооптиці, де величина поглинання акустичних хвиль інколи є визначальною для вибору того чи іншого матеріалу. Також величина поглинання акустичних хвиль визначається з діагностичною ціллю в медицині та неруйнівному контролі. Отже, вимірювання поглинання акустичних хвиль є достатньо ефективним методом дослідження матеріалів [1–3]. Хоча сьогодні розроблено багато різноманітних методик, їхня точність є незначною [4]. Серед таких методик значного поширення набули імпульсні методи. Вимірювання поглинання полягає у визначенні амплітуд акустичної хвилі після проходження різних відстаней. Це забезпечується багатократним проходженням акустичної хвилі через зразок внаслідок відбивання від плоскопаралельних граней зразка або використанням кількох зразків з різними розмірами [4]. За співвідношенням цих амплітуд визначають коефіцієнт поглинання. Точність вимірювань визначається багатьма факторами і серед них важливе значення має сама величина поглинання. У разі великого поглинання точність його визначення зменшується, оскільки вимірювання амплітуди акустичної хвилі необхідно проводити на невеликих відстанях від джерела хвиль. Саме для таких матеріалів з великим поглинанням пропонується нова схема вимірювань.

Особливістю запропонованої схеми є те, що акустична хвиля падає під деяким кутом на поверхню зразка, на якій вона реєструється.

### Методика визначення поглинання

Схема вимірювання показана на рис. 1. За допомогою п'єзоелектричного перетворювача збуджується акустична хвиля, яка поширюється по зразку. З іншого боку зразка ця хвиля реєструється. Зразок виготовляється так, що акустична хвиля падає під деяким кутом до поверхні зразка. Відстань між різними ділянками перетворювача та поверхні зразка, на якій реєструється акустична хвиля, є різною. Відповідно, зменшення амплітуди акустичної хвилі буде пропорційне до цієї відстані. Отже, на поверхні зразка виникає складний розподіл амплітуди, який залежить від коефіцієнта поглинання акустичних хвиль. Крім того, треба відзначити, що неоднорідність акустичного поля виникає внаслідок проведення вимірювань в ближній зоні збуджувального перетворювача, а також завдяки нахилу поверхні зразка. Розмір ближньої зони визначається розміром перетворювача і довжиною акустичної хвилі. Характерною особливістю ближньої зони є неоднорідність просторового розподілу амплітуди акустичного поля перетворювача. Ця неоднорідність виникає внаслідок інтерференції хвиль, які випромінюються різними ділянками перетворювача. Використання п'єзоелектричного перетворювача як приймача приводить до просторового усереднення сигналу і складності реєстрації акустичної хвилі в ближній зоні. Запропонована методика вимірювань полягає в визначенні просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі на поверхні зразка і порівнянні його з результатами числового моделювання. Знаходять значення коефіцієнта поглинання, за якого різниця між виміряним розподілом амплітуди акустичної хвилі та розподілом, отриманим за допомогою моделювання є мінімальною.

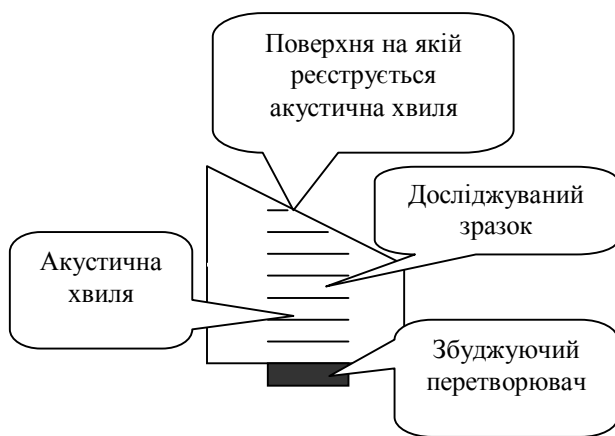


Рис. 1. Схема вимірювання поглинання акустичних хвиль

Знаходять значення коефіцієнта поглинання, за якого різниця між виміряним розподілом амплітуди акустичної хвилі та розподілом, отриманим за допомогою моделювання є мінімальною.

Знаходять значення коефіцієнта поглинання, за якого різниця між виміряним розподілом амплітуди акустичної хвилі та розподілом, отриманим за допомогою моделювання є мінімальною.

### Числове моделювання просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі

Для аналізу можливості використання цієї методики було виконано числовий розрахунок розподілу амплітуди акустичної хвилі на поверхні зразка за допомогою принципу Гюйгенса-Френеля. Приймали, що перетворювач збуджує в зразку акустичну хвилю з однаковою амплітудою по поверхні перетворювача. Розраховували розподіл амплітуди акустичної хвилі на протилежній поверхні зразка згідно з виразом [5, 6]

$$u(x_i, y_i) = \frac{k}{2\pi i} \iint_s u(x_j, y_j) \frac{ze^{ikr}}{r^2} ds_j, \quad (1)$$

де  $u$  – амплітуда коливань в ділянці з координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $k$  – хвильове число акустичної хвилі,  $s$  – площа збуджувального перетворювача,  $z$  – відстань від перетворювача до ділянки поверхні, в якій розраховується амплітуда,  $r$  – відстань від ділянки перетворювача до ділянки поверхні зразка. За допомогою виразу (1) можна описувати поширення акустичних хвиль у рідині, а також повздовжніх хвиль в ізотропних, однорідних твердих тілах [7]. Поглинання акустичної хвилі враховували зображенням хвильового числа у вигляді [6]

$$k = k' + i\alpha, \quad (2)$$

де  $\alpha$  характеризує поглинання акустичної хвилі.

За допомогою виразу (1) було проведено числове моделювання амплітуди акустичного поля на поверхні зразка за різних значень коефіцієнта поглинання. Під час розрахунків використовували величину швидкості акустичної хвилі 4000 м/с, її частота – 2.5 МГц, розмір збуджувального перетворювача становив  $15 \times 20 \text{ мм}^2$ . (15 мм по осі x). Центр перетворювача мав координати (100, 100, 0). Також приймали, що амплітуда і фаза на поверхні зразка, до якого приєднаний перетворювач, є однаковою в усіх ділянках. Отримані результати показані на рис. 2–4. Графіки наведені для різних значень відстані від середини збуджувального перетворювача до поверхні зразка  $z_0$ , на якій визначається просторовий розподіл амплітуди акустичної хвилі, а також різних кутів  $\beta$ , під якими падає акустична хвиля на цю поверхню. На рис. 2 наведені залежності для випадку

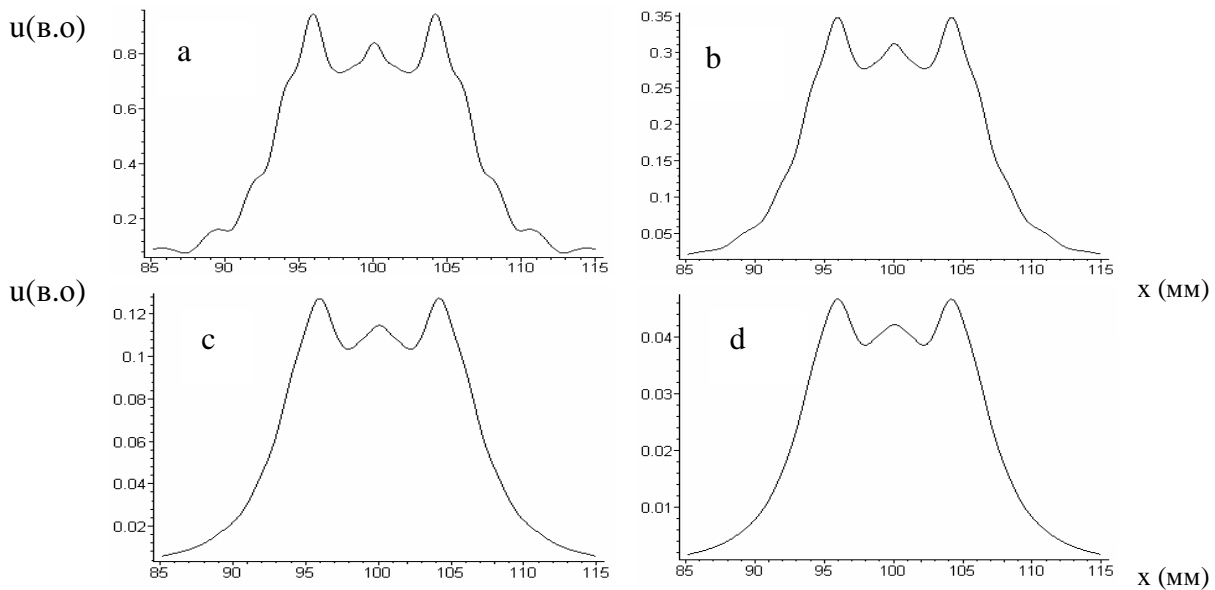


Рис. 2. Залежність просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі по поверхні зразка від коефіцієнта поглинання  $\alpha$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $z_0=10 \text{ мм}$ , а-  $\alpha=0$ , b-  $\alpha=1 \text{ см}^{-1}$ , c-  $\alpha=2 \text{ см}^{-1}$ , d-  $\alpha=3 \text{ см}^{-1}$

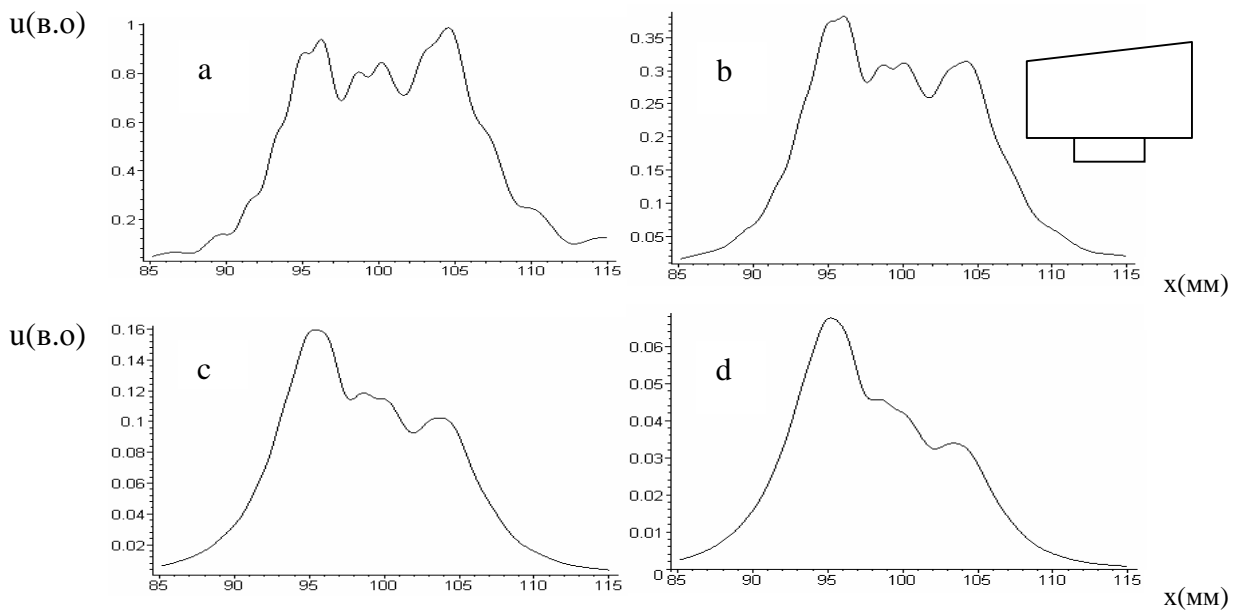


Рис. 3. Залежність просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі по поверхні зразка коефіцієнта поглинання  $\alpha$ ,  $\beta=18^\circ$ ,  $z_0=10 \text{ мм}$ , а-  $\alpha=0$ , b-  $\alpha=1 \text{ см}^{-1}$ , c-  $\alpha=2 \text{ см}^{-1}$ , d-  $\alpha=3 \text{ см}^{-1}$ . У верхньому правому куті показана орієнтація досліджуваного зразка із збуджувальним перетворювачем

нормального падіння акустичної хвилі на поверхню. Оскільки акустичне поле визначається в ближній зоні, то спостерігається складний неоднорідний просторовий розподіл амплітуди. Як видно з графіків, у разі збільшення поглинання зменшується амплітуда хвилі, проте характер самої залежності змінюється незначно. На рис. 3, 4 наведені залежності, які отримані у разі падіння акустичної хвилі під кутом  $18^\circ$  на поверхню зразка і на відстанях від перетворювача  $z_0=10$  мм (рис. 3) і  $z_0=40$  мм (рис. 4). Величина кута падіння хвилі на поверхню зразка, а також відстані  $z_0$  вибрані як один з можливих варіантів. Як видно з графіків, вигляд просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі сильно залежить від відстані  $z_0$ . Також можна побачити, що амплітуда змінюється залежно від величини поглинання. До того ж з наведених графіків видно, що від величини поглинання залежить і сам характер просторового розподілу амплітуди. Таку залежність просторового розподілу амплітуди можна використати для визначення поглинання. Визначивши просторовий розподіл амплітуди акустичної хвилі на поверхні зразка, можемо однозначно визначити величину поглинання акустичної хвилі. Графіки, наведені на рис. 2–4, показують відмінність традиційної методики вимірювання поглинання від запропонованої. У традиційній методиці вимірюють за допомогою п'єзоелектричного перетворювача, який інтегрує амплітуду акустичної хвилі по площі перетворювача. У разі неоднорідного розподілу амплітуди акустичної хвилі сигнал з перетворювача буде складною функцією розподілу амплітуди хвилі на поверхні зразка. У цьому випадку складно проводити вимірювання в ближній зоні, де акустичне поле є неоднорідне. З іншого боку, при великих значеннях поглинання необхідно проводити вимірювання на ділянках зразка, які є розміщені близько до перетворювача і відповідно, попадають в ближню зону. Крім того, щоб виміряти поглинання, потрібно визначити амплітуду акустичної хвилі на різних відстанях. У традиційній методиці це реалізується вимірюванням амплітуди хвиль, які, відбиваючись від граней зразка, проходять його певну кількість разів. Відповідно реєструють багатократно відбиті акустичні імпульси, які послідовно в часі приходять на поверхню зразка. У пропонуваній методиці можна визначити розподіл амплітуди хвилі на поверхні зразка у разі однократного проходження її через зразок. Отже, вимірюють амплітуду достатньо близько до збуджувального перетворювача, що важливо під час досліджень сильно поглинаючих середовищ.

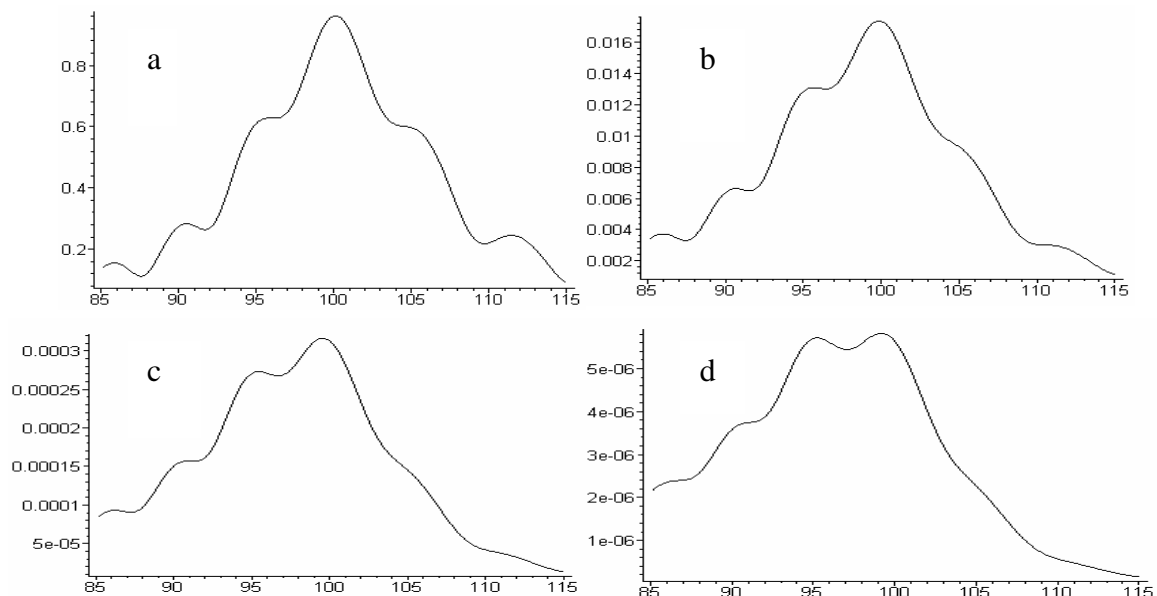


Рис. 4. Залежність просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі по поверхні зразка від коефіцієнта поглинання  $\alpha$ ,  $\beta=18^\circ$ ,  $z_0=40$  мм, а-  $\alpha=0$ , б-  $\alpha=1$  см<sup>-1</sup>, с-  $\alpha=2$  см<sup>-1</sup>, д-  $\alpha=3$  см<sup>-1</sup>

Особливість пропонованої методики полягає у необхідності вимірювати просторовий розподіл амплітуди акустичної хвилі. Це складно зробити за допомогою контактного п'єзоелектричного перетворювача, оскільки розміри перетворювача є достатньо великі, що обмежує просторове розділення. Також акустичний контакт п'єзоелектричного перетворювача із зразком є слабо контрольований, що дає велику похибку у разі визначення амплітуди акустичної хвилі. Тому для цієї методики ефективніші є оптичні безконтактні методи реєстрації акустичних коливань, оскільки вони мають високе просторове розділення, а також не вимагають акустичного контакту із досліджуваним зразком.

### Висновки

Запропоновано нову методику вимірювання поглинання акустичних хвиль в сильно поглинаючих середовищах. Перевага запропонованої методики полягає в можливості вимірювати амплітуду акустичної хвилі в ділянці, яка розміщена на близькій відстані до збуджувального перетворювача. Виконано числове моделювання поширення хвиль у досліджуваному зразку запропонованої геометрії. Показано, що існує чітко виражена залежність просторового розподілу амплітуди акустичної хвилі від величини поглинання. Така залежність дає можливість визначати величину поглинання за розподілом амплітуди акустичної хвилі по поверхні зразка. Для реалізації запропонованої методики пропонується використовувати оптичні методи реєстрації акустичних хвиль, які дають змогу вимірювати з високим просторовим розділенням.

1. Kim K.B., Ahn B., Kim Y.G., Park S. K. and Ha, J. S. *Optimal Design for Piezoelectric Ultrasonic Transducer for High Attenuative Materials 12th A-PCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, 5th – 10th Nov. 2006, Auckland, New Zealand.* 2. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. *Ультразвуковые методы в физике твердого тела.* – М.: Мир, 1972. 307 с. 3. Papadakis E.P. *The Measurement of Ultrasonic Attenuation // Physical acoustic: Ultrasonic Measurement Methods R.N. Thurston, A.D. Pierce eds. Vol. XIX: Academic Press. Inc., Boston, San Diego, New York, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 1990.* – P. 108–155. 4. Ермолов И.Н. *Методики измерения затухания ультразвука // Заводская лаборатория – 1992.* – № 6. – С. 26–30. 5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн.* – М.: Наука, 1990. – 432 с. 6. Шендеров Е.Л. *Волновые задачи гидроакустики.* – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с. 7. Ермолов И.Н. *Оптимизация условий контроля ультразвуковым эхометодом // Дефектоскопия.* – 1996. – № 1. – С. 3–16.