

УДК 621.391: 621.396

Ю.С. Курський

ДП "УкрНДНЦ проблем стандартизації, сертифікації та якості", м. Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ ЕФЕКТІВ У ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

Наведено результати комп'ютерного моделювання відбиття плоскої акустичної хвилі від рухомої границі розподілу двох середовищ, що рухається. Підтверджено, що рух границі призводить до відхилення кута відбиття від того, що відповідає класичному закону Снеліуса. Показано, що реальні частоти відбитих хвиль відрізняються від тих, що дає класичний вираз для ефекту Доплера, який не враховує кутовий зсув. Отримані результати комп'ютерного моделювання повністю співпали з очікуваними значеннями параметрів, що були заздалегідь розраховані.

**Ключові слова:** відбиття акустичних хвиль, зсув кута відбиття, узагальнений вираз для закону Снеліуса.

## Вступ

**Постановка проблеми.** Акустичні засоби вимірювальної техніки фіксують та обробляють інформацію щодо параметрів випромінюваних та (або) відбитих акустичних хвиль. Достовірність результатів вимірювання залежить від коректності описання фізичних ефектів, що спостерігаються.

Для розрахунку параметрів відбитої акустичної хвилі в умовах взаємодії випроміненої хвилі із рухомою границею розподілу двох середовищ, або із об'єктом, що перебуває у русі, використовують вираз для закону Снеліуса:

$$\frac{\sin \alpha}{c} = \frac{\sin \beta}{c},$$

$$\alpha = \beta, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – кут падіння променя;  $\beta$  – кут відбиття;  $c$  – швидкість поширення звуку в середовищі, та вираз для ефекту Доплера:

$$f_R = f_I \frac{1 + v_n/c}{1 - v_n/c}, \quad (2)$$

де  $f_R, f_I$  – частоти відповідно відбитих і випромінених коливань;

$v_n$  – нормальна складова швидкості руху границі.

Вирази (1), (2) мають загальновідомий вигляд.

**Аналіз досліджень.** Теоретичні дослідження взаємодії плоских акустичних хвиль із рухомою границею розподілу двох середовищ [1 – 4] дозволяє стверджувати, що за наявності нормальної складової руху границі розподілу середовищ, параметри відбитих та випромінених хвиль пов'язані більш складним чином, ніж вирази (1), (2):

$$\sin(\beta + \varphi(t)) = K(t) \sin \alpha, \quad (3)$$

$$f_R = f_I \frac{t + \frac{Y(t)}{c} \cos \beta}{t - \frac{Y(t)}{c} \cos \alpha}, \quad (4)$$

$$\text{де } \varphi(t) = \arctg \frac{\frac{Y(t)}{c} \sin \alpha}{t + \frac{Y(t)}{c} \cos \alpha},$$

$$K(t) = \frac{t}{\sqrt{t^2 + \left(\frac{Y(t)}{c}\right)^2 + 2 \frac{tY(t)}{c} \cos \alpha}},$$

$t$  – час;  $Y(t)$  – закон переміщення границі поділу середовищ.

Дослідження виразів (3), (4) показує [1 – 4], що за наявності нормальної складової руху границі розподілу середовищ кут відбиття  $\beta$  не дорівнює куту падіння  $\alpha$ : у випадку руху границі на хвилю, що падає, кут відбиття приймає значення менші значення кута падіння  $\beta < \alpha$ ; у випадку руху границі від хвилі, що падає, кут відбиття приймає значення більші значення кута падіння  $\beta > \alpha$ . Відхилення значення кута відбиття від значення кута падіння стає тим більше, чим більші значення приймає нормальна складова швидкості руху границі розподілу середовищ.

Ефекти, що описані виразами (3), (4), були пояснені за допомогою принципу Гюйгенса у роботі [5].

**Мета дослідження.** Експериментальне підтвердження встановлених ефектів з'явилося непростим завданням.

Метою цієї статті є підтвердження виявлених ефектів методом комп'ютерного моделювання.

## Результати дослідження

В основу моделювання покладено принцип Гюйгенса, згідно з яким кожна точка фронту первинної хвилі може розглядатися як центр зародження вторинної сферичної хвилі [5].

Було змодельовано процес формування відбитої хвилі при падінні плоскої хвилі на плоску поверхню розподілу двох ізотропних нескінченних середовищ за умов: границя розподілу середовищ неру-

хома; границя розподілу середовищ рухається з постійною швидкістю у напрямку власної нормалі; границя розподілу середовищ рухається у напрямку, що протилежний до напрямку нормалі. Результати моделювання для цих трьох випадків наведено на рис. 1, а – в.

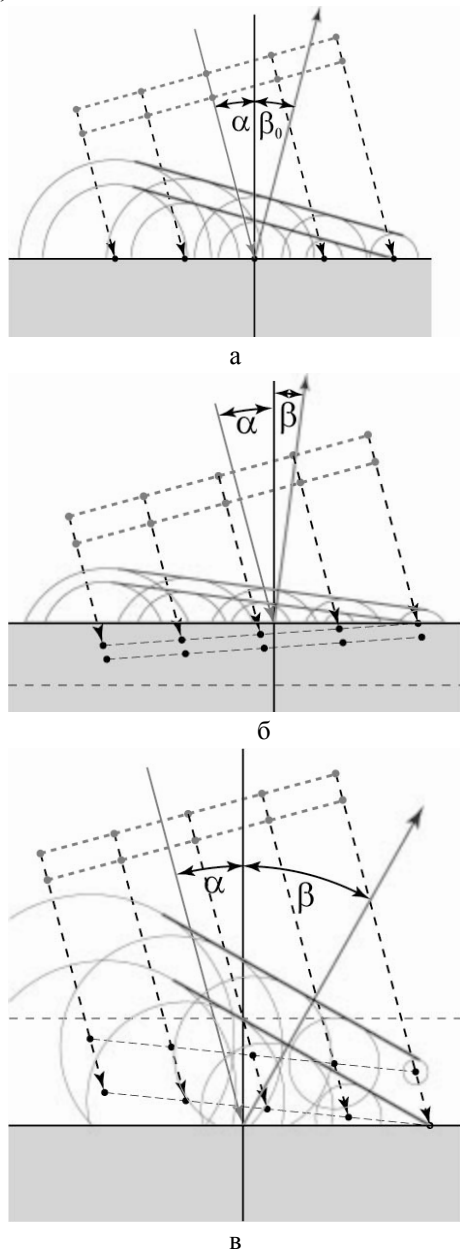


Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання процесу формування фронтів відбитої хвилі за відсутності руху границі розподілу середовищ (а), при його переміщенні з постійною швидкістю  $v_n = 500$  м/с у напрямку нормалі до границі (б) та у протилежному напрямку з тією ж швидкістю (в):

$$c = 1500 \text{ м/с}, \quad \beta = 15^\circ, \quad f_1 = 1 \text{ кГц}$$

Результати розрахунків наведено у табл. 1, де  $\Delta v = v - v_0$ ,  $\Delta f_R = f_R - f_{R0}$  – розходження значень кутів відбиття та частот відбитих хвиль відповідно, що отримані за узагальненими виразами (3), (4) –

$v, f_R$  із значеннями, що отримані за класичними виразами (1), (2) –  $v_0, f_{R0}$ .

Таблиця 1

Результати розрахунків

Рис.	$v_0$ , град.	$f_{R0}$ , кГц	$v$ , град.	$f_R$ , кГц	$\Delta v$ , град.	$\Delta f_R$ , кГц
а	15	1	15	1	0	0
б	15	1,95	7,5	1,97	-7,5	0,02
в	15	0,52	29,5	0,53	14,5	0,01

## Висновки

Отримані результати комп'ютерного моделювання повністю співпали з очікуваними значеннями параметрів, що були заздалегідь розраховані за формулами (1) – (4).

Результати моделювання підтвердили коректність отриманих раніш формул (3), (4), що описують кути та частоти відбитої хвилі в умовах руху поверхні, що відбиває. При скороченні в процесі руху відстані до джерела випромінювання кут відбиття виявляється меншим, ніж такий, що відповідає класичному закону Снеліуса. При цьому частота відбитої хвилі є більшою за частоту випроміненої хвилі.

При збільшенні відстані до джерела випромінювання кут відбиття виявляється більшим, ніж той, що відповідає класичному закону Снеліуса. При цьому частоті відбитої хвилі є меншою, ніж частота випроміненої хвилі.

В обох випадках завдяки зсуву кутів відбиття реальні частоти відбитих хвиль відрізняються від тих, що дає класичний вираз для ефекту Допплера, який не враховує кутовий зсув.

## Список літератури

1. Горбань І.І. Отражение и преломление акустических лучей на подвижной границе раздела сред / И.И. Горбань // Акустичний вісник. – 2004. – Т. 4, № 2. – С. 36-41.
2. Горбань І.І. Отражение и преломление акустических лучей на границе жидкости и движущегося твердого тела / И.И. Горбань, Ю.С. Курской // Вісник ХНУ. №739, серія «Фізика». – Х.: ХНУ, 2006. – Вип. 9. – С. 44-49.
3. Горбань І.І. Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях / И.И. Горбань. – К.: Наукова думка, 2008. – 272 с.
4. Gorban I.I. Mobile sonar systems: Optimization of Space-Time Signal Processing / I.I. Gorban. – K.: Naukova dumka, 2008. – 236 p.
5. Горбань І. Акустичні ефекти в динамічних умовах / І. Горбань, Ю. Курський // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2007. – №2. – С. 47-51.

Надійшла до редколегії 21.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Горбань, НДІ математичних машин НАН України, Київ.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ю.С. Курской

Приведены результаты компьютерного моделирования отражения плоской акустической волны от подвижной границы раздела двух сред. Подтверждено, что движение границы приводит к отклонению угла отражения от того, которое отвечает классическому закону Снелиуса. Показано, что реальные частоты отраженных волн отличаются от тех, которые дает классическое выражение для эффекта Доплера, не учитывающее угловой сдвиг. Полученные результаты компьютерного моделирования полностью совпали с ожидаемыми значениями параметров, которые были предварительно рассчитаны.

**Ключевые слова:** отражение акустических волн, сдвиг угла отражения, обобщенное выражение для закона Снелиуса.

## MODELING OF ACOUSTIC EFFECTS IN DYNAMIC CONDITIONS

Yu.S. Kurskoy

The results of computer design of reflection of flat acoustic wave are resulted from the moving boundary of section of two environments. It is confirmed that over motion of border brings to deviation of corner of reflection from mozo which answers the classic law of Snelius. It is shown that the real frequencies of the reflected waves differ om those which are given by classic expression for the effect of Doppler, not taking into account an angular change. The got results of computer design fully coincided with the expected values of parameters which were preliminary expected.

**Keywords:** reflection of acoustic waves, change of corner of reflection, generalized expression for the law of Snelius.