

УДК 621.391: 621:396

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДБИТТЯ ТА ЗАЛОМЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ НА ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА, ЩО РУХАЄТЬСЯ

© І.І. Горбань, Ю.С. Курський, 2008

ДП «УкрНДНЦ проблем стандартизації, сертифікації та якості», м. Київ

Наведено результати комп'ютерного моделювання відбиття та заломлення плоских акустичних хвиль на плоскій поверхні твердого тіла, що рухається в однорідному середовищі. Підтверджено, що рух тіла призводить до відхилення кутів відбиття та заломлення від тих, що відповідають класичному закону Снеліуса.

Приведены результаты компьютерного моделирования отражения и преломления плоских акустических волн на плоской поверхности твердого тела, движущегося в однородной среде. Подтверждено, что движение тела приводит к отклонению углов отражения и преломления от тех, что соответствуют закону Снеллиуса.

Computer modeling results of reflection and refraction of flat acoustic waves on the flat surface of solid body which moves in a homogeneous environment are presented. It is confirmed, that the motion of the body leads to deviation of reflection and refraction angles from those which according to the classic Snell's law.

### ВІДБИТТЯ ТА ЗАЛОМЛЕННЯ, АКУСТИЧНА ХВИЛЯ, ЗАКОН СНЕЛІУСА, СЕРЕДОВИЩЕ, ЧАСТОТА, ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У роботах [1 – 4] проведено теоретичні дослідження відбиття та заломлення акустичних променів на плоскій рухомій границі розподілу однорідних середовищ: рідина – рідина [1, 3, 4] та рідина – тверде тіло [2 – 4]. У відповідності до класичного закону Снеліуса у разі відсутності руху однорідного ізотропного тіла, кут відбиття хвилі  $\beta$ , кут заломлення повздовжньої хвилі  $\gamma$  і кут заломлення поперечної хвилі  $\delta$  пов'язані з кутом падіння  $\alpha$  таким чином:

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_1} = \frac{\sin \gamma}{c_{2l}} = \frac{\sin \delta}{c_{2t}}, \quad (1)$$

де  $c_1$  – швидкість поширення коливань у рідкому середовищі,

$c_{2l}$ ,  $c_{2t}$  – швидкості поширення відповідно повздовжніх та поперечних коливань у твердому тілі.

У разі, коли тіло рухається, кути відбиття та заломлення залежать не лише від параметрів середовищ розповсюдження хвиль, а й від закону руху тіла вздовж нормалі до площі, що відбиває хвилі [2 – 4]. При постійній швидкості руху  $v$  ці кути можуть бути описані виразами:

$$\sin(\beta + \phi) = K \sin \alpha, \quad (2)$$

$$\sin(\gamma - \phi) = K \frac{c_{2l}}{c_1} \sin \alpha, \quad (3)$$

$$\sin(\delta - \phi) = K \frac{c_{2t}}{c_1} \sin \alpha, \quad (4)$$

$$\text{де } \phi = \arctg \frac{\frac{v}{c_1} \sin \alpha}{1 + \frac{v}{c_1} \cos \alpha},$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{c_1}\right)^2 + 2 \frac{v}{c_1} \cos \alpha}}.$$

Дослідження виразів (2) – (4) показує [2 – 4], що за умов скорочення в процесі руху відстані до джерела випромінювання кути відбиття та заломлення виявляються меншими ніж ті, що відповідають виразу (1), а за умов збільшення відстані до джерела випромінювання – більшими ніж ті, що дає вираз (1). Відхилення за модулем тим більші, чим більша нормальна складова швидкості руху тіла.

Частоти відбитої хвилі  $f_R$ , поздовжньої заломленої хвилі  $f_{Tl}$  та поперечної заломленої хвилі  $f_{Tt}$  описуються такими виразами [2 – 4]:

$$f_R = f_I \frac{1 + \frac{v}{c_1} \cos \alpha}{1 - \frac{v}{c_1} \cos \beta},$$

$$f_{Tl} = f_I \frac{1 + \frac{v}{c_1} \cos \alpha}{1 + \frac{v}{c_{2l}} \cos \gamma}, \quad (5)$$

$$f_{Tt} = f_I \frac{1 + \frac{v}{c_1} \cos \alpha}{1 + \frac{v}{c_{2t}} \cos \delta},$$

де  $f_I$  – частота хвилі, що падає.

Відхилення від класичного закону Снеліуса та класичних виразів, що описують ефект Доплера, були пояснені за допомогою принципу Гюйгенса [5].

Експериментальне підтвердження встановлених ефектів виявилось непростим завданням. Мета цієї статті - обґрунтування виявлених ефектів методом комп'ютерного моделювання.

Моделювання проводилось за допомогою пакета «3dMax». В його основу покладено принцип Гюйгенса, згідно з яким кожна точка фронту первинної хвилі може розглядатися як центр зародження вторинної сферичної хвилі.

Моделювався процес формування відбитої та заломлених хвиль при падінні плоскої хвилі на плоску поверхню твердого тіла. Розглядалися різні динамічні умови: за відсутністю руху тіла, при його переміщенні з постійною швидкістю у напрямку нормалі до поверхні та у напрямку, що протилежний до нормалі. Результати моделювання для цих трьох випадків наведено на рис. 1(а-в) та у табл. 1 – 3, де  $\Delta\beta = \beta - \beta_0$ ,  $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0$ ,  $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ ,  $\Delta f_R = f_R - f_{R0}$ ,  $\Delta f_{T1} = f_{T1} - f_{T10}$ ,  $\Delta f_{T2} = f_{T2} - f_{T20}$ ;  $\beta, \gamma, \delta$  – кути відбитої та заломлених хвиль, що отримані в результаті моделювання;  $\beta_0, \gamma_0, \delta_0$  – кути відбитої та заломлених хвиль, що відповідають класичному закону Снеліуса;  $f_R, f_{T1}, f_{T2}$  – частоти коливань відбитої та заломлених хвиль, що отримані в результаті моделювання;  $f_{R0}, f_{T10}, f_{T20}$  – частоти коливань відбитої та заломлених хвиль, що відповідають класичному закону Доплера, який не враховує кутові зсуви відбитої та заломлених хвиль, що обумовлені рухом тіла.

Таблиця 1. Розрахункові параметри відбитої та заломленої хвиль без врахування кутових зсувів

Рисунок	$\beta_0$ , град.	$\gamma_0$ , град.	$\delta_0$ , град.	$f_{R0}$ , кГц	$f_{T10}$ , кГц	$f_{T20}$ , кГц
а	15	47,6	20,4	1	1	1
б	15	47,6	20,4	1,95	1,23	1,072
в	15	47,6	20,4	0,52	0,75	0,886

Таблиця 2. Параметри відбитої та заломленої хвиль, що отримані в результаті моделювання

Рисунок	$\beta$ , град.	$\gamma$ , град.	$\delta$ , град.	$f_R$ , кГц	$f_{T1}$ , кГц	$f_{T2}$ , кГц
б	7,5	37,6	19	1,97	1,21	1,07
в	29,5	82,7	23,4	0,53	0,69	0,88

Таблиця 3. Зсуви параметрів відбитої та заломленої хвиль, що обумовлені рухом тіла

Рисунок	$\Delta\beta$ , град.	$\Delta\gamma$ , град.	$\Delta\delta$ , град.	$\Delta f_R$ , кГц	$\Delta f_{T1}$ , кГц	$\Delta f_{T2}$ , кГц
б	-7,5	-10	-1,4	0,02	-0,02	-0,002
в	14,5	35,1	3	0,01	-0,06	-0,006

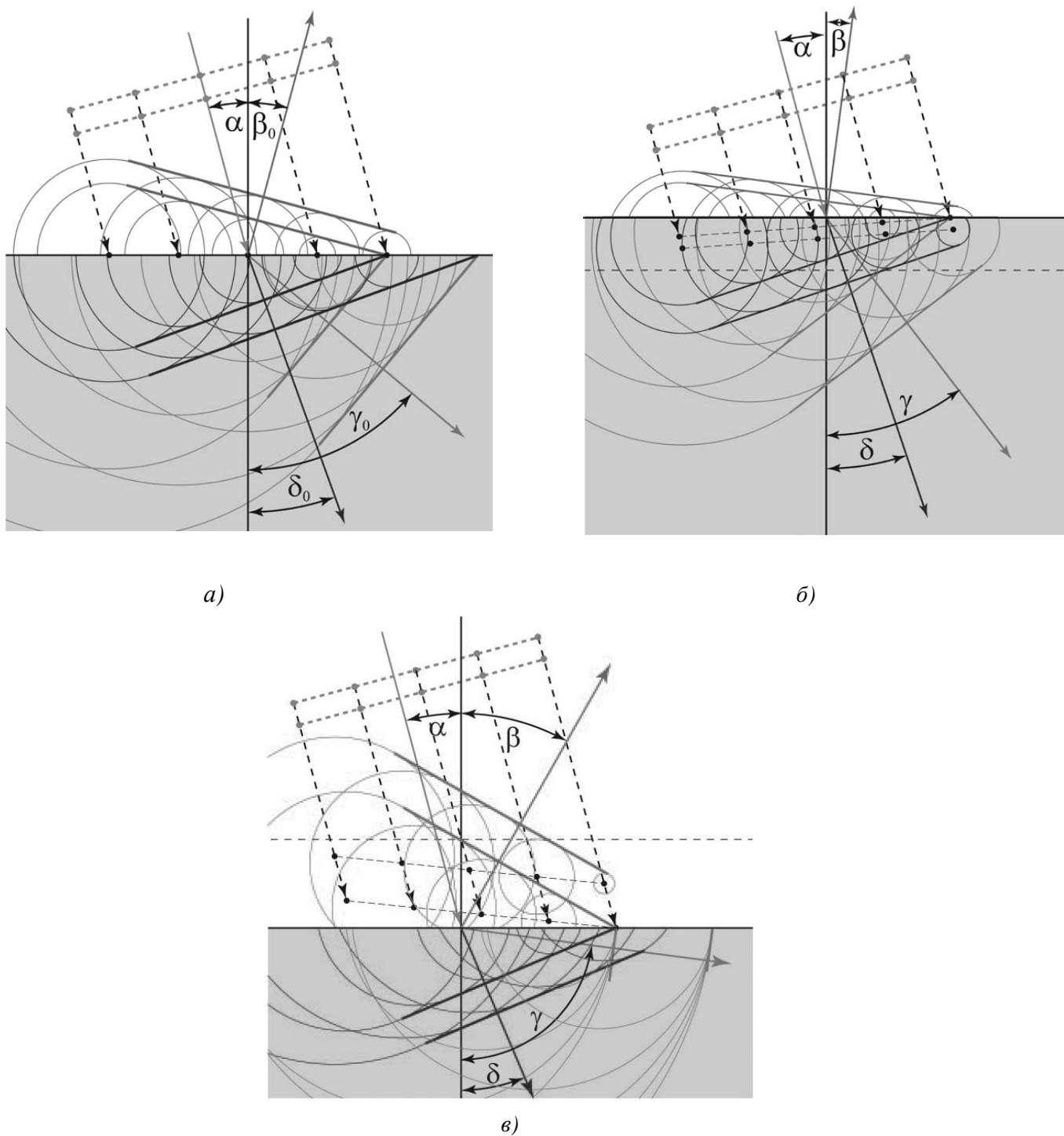


Рис. 1 - Результати комп'ютерного моделювання процесу формування фронтів відбитої та заломленої хвиль за відсутності руху тіла (а), при його переміщенні з постійною швидкістю  $v = 500 \text{ м/с}$  у напрямку нормалі до поверхні тіла (б) та у протилежному напрямку з тією ж швидкістю (в):  $c_1 = 1500 \text{ м/с}$ ,  $c_{21} = 4280 \text{ м/с}$ ,  $c_{21} = 2020 \text{ м/с}$  (середовища вода – латунь),  $\alpha = 15^\circ$ ,  $f_1 = 1 \text{ кГц}$ .

Отримані результати комп'ютерного моделювання повністю співпали з очікуваними значеннями параметрів, що були заздалегідь розраховані за формулами (1) – (5).

Таким чином, моделювання підтвердило коректність отриманих раніше формул (2) – (5), що описують кутові та частотні параметри відбитої та заломлених хвиль в умовах руху тіла. При скороченні в процесі руху відстані до джерела випромінювання кути відбиття та заломлення виявляються меншими, ніж ті, що відповідають класичному закону Снеліуса. При цьому частоти відбитої та заломлених хвиль є більшими, ніж частота падаючої хвилі. При збільшенні відстані до джерела випромінювання кути відбиття та заломлення виявляються більшими, ніж ті, що відповідають класичному закону Снеліуса. При цьому частоти відбитої та заломлених хвиль є меншими, ніж частота падаючої хвилі. В обох випадках завдяки зсуву кутів відбиття та заломлення реальні частоти відбитої та заломленої хвиль відрізняються від тих, що дає класичний закон Доплера, який не враховує кутові зсуви.

## Література

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