

## ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДВИЖНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

И. И. ГОРБАНЬ<sup>1</sup>, Ю. С. КУРСКОЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем математических машин и систем НАН Украины  
03187, Киев, пр. академика Глушкова, 42,  
тел. 099-791-0781, эл. почта igor.gorban@yahoo.com

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский и учебный центр проблем  
стандартизации, сертификации и качества, Госпотребстандарт Украины  
03115, Киев, ул. Святошинская, 2,  
тел. 099-24-19-205, эл. почта kurskoy@rambler.ru

Установлено, что отражение и преломление гидроакустических волн на плоской поверхности движущегося твердого тела не подчиняется классическому закону Снелиуса. Получены аналитические выражения, описывающие в условиях движения тела углы и частоты отраженных и преломленных волн. Обнаруженные эффекты подтверждаются результатами компьютерного моделирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Многие физические явления проявляются по-разному в статических и динамических условиях. При падении плоской волны на плоскую границу раздела двух жидких сред формируется отраженная и преломленная волна. Если граница раздела сред неподвижна, то углы отражения  $\beta$  и преломления  $\gamma$  связаны с углом падения  $\alpha$  и скоростями  $c_1, c_{2l}$  распространения звука в первой и второй средах классическими выражениями, представляющими закон Снеллиуса:

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

Если же граница раздела сред движется, то углы отражения и преломления являются решениями уравнений [1]:

$$\sin(\beta + \varphi(t)) = K(t) \sin \alpha, \quad \sin(\gamma - \varphi(t)) = K(t) \frac{c_{2l}}{c_1} \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\varphi(t) = \arctg \frac{Y(t) \sin \alpha}{t + \frac{Y(t)}{c_1} \cos \alpha}$ ,  $K(t) = \frac{t}{\sqrt{t^2 + \left(\frac{Y(t)}{c_1}\right)^2 + 2 \frac{tY(t)}{c_1} \cos \alpha}}$ ,  $t$  – время,

$Y(t)$  – функция перемещения границы раздела сред вдоль нормали, а частоты  $f_R, f_{\Pi}$  отраженной и преломленной волн описываются выражениями:

$$f_R = f_I \frac{t + \frac{Y(t)}{c_1} \cos \alpha}{t - \frac{Y(t)}{c_1} \cos \beta}, \quad f_{\Pi} = f_I \frac{t + \frac{Y(t)}{c_1} \cos \alpha}{t + \frac{Y(t)}{c_{2l}} \cos \gamma}, \quad (3)$$

$f_I$  — частота падающей волны.

При отсутствии движения из уравнений (2) следует соотношение (1). При наличии нормальной составляющей скорости движения границы углы отражения и преломления отличаются от соответствующих углов при отсутствии движения. Расхождения между углами оказываются тем больше, чем больше скорость движения границы.

Целью настоящей статьи является обобщение полученных результатов на случай отражения и преломления волн на плоской поверхности твердого тела, движущегося в жидкости.

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Предполагалось, что тело движется в жидкости в общем случае с переменной скоростью, обе среды распространения волн изотропны, движение твердого тела не вызывает сжатия жидкости, отражающая поверхность – плоская и бесконечная, при этом выполняются условия лучевого приближения [2]. В твердом теле, в отличие от жидкости распространяется не одна, а две волны: продольная и поперечная.

Решение волнового уравнения привело к соотношениям, совпадающим с выражениями (2), (3) для отраженной и продольной преломленной волн. Для поперечной волны были получены выражения, аналогичные выражениям (2), (3):

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

$$f_{Ti} = f_I \frac{c_1}{t + \frac{Y(t)}{c_{2t}} \cos \delta}, \quad (5)$$

где  $\delta$ ,  $c_{2t}$  и  $f_{Ti}$  – соответственно угол преломления, скорость распространения и частота поперечной преломленной волны.

Из выражений (2) – (5) следует, что углы отражения и преломления, а также частоты отраженной и преломленных волн не зависят от тангенциальной составляющей скорости движения поверхности твердого тела и определяются нормальной ее составляющей. Движение тела вдоль нормали приводит к смещению углов отражения и преломления от тех, которые описываются классическими выражениями (1).

На рис. 1 приведены результаты расчетов (для сред «вода – латунь») зависимостей отклонений углов отражения  $\Delta\beta(\alpha)$  (а) и преломления  $\Delta\gamma(\alpha)$ ,  $\Delta\delta(\alpha)$  (б – для продольной и в – поперечной волн) от угла падения  $\alpha$ , где  $\Delta\beta = \beta - \beta_0$ ,  $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0$ ,  $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ , а  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $\delta_0$  – значения соответственно углов отражения и преломления при отсутствии движения. Кривым от 1 до 10 соответствуют скорости движения границы раздела сред  $v = -10$  м/с,  $-8$  м/с,  $-6$  м/с,  $-4$  м/с,  $-2$  м/с,  $0$  м/с,  $2$  м/с,  $4$  м/с,  $6$  м/с,  $8$  м/с,  $10$  м/с.

Как видно, при удалении поверхности от источника угол отражения и углы преломления продольной и поперечной волн отклоняются в сторону отражающей поверхности, а при приближении поверхности – в противоположную сторону. Эффект тем более значителен, чем больше нормальная составляющая скорости движения. При отсутствии движения ( $Y(t) = 0$ ) выражения (2), (4) трансформируются в выражение (1).

При нормальном падении волны ( $\alpha = \beta$ ) на поверхность тела, удаляющегося или приближающегося с постоянной скоростью  $v$ , частота отраженной волны описывается классическим выражением:

$$f_R = f_I \frac{1 + v/c_1}{1 - v/c_1}.$$

Таким образом, формулы (2) – (5) обобщают классические выражения для закона Снелиуса и эффекта Доплера.

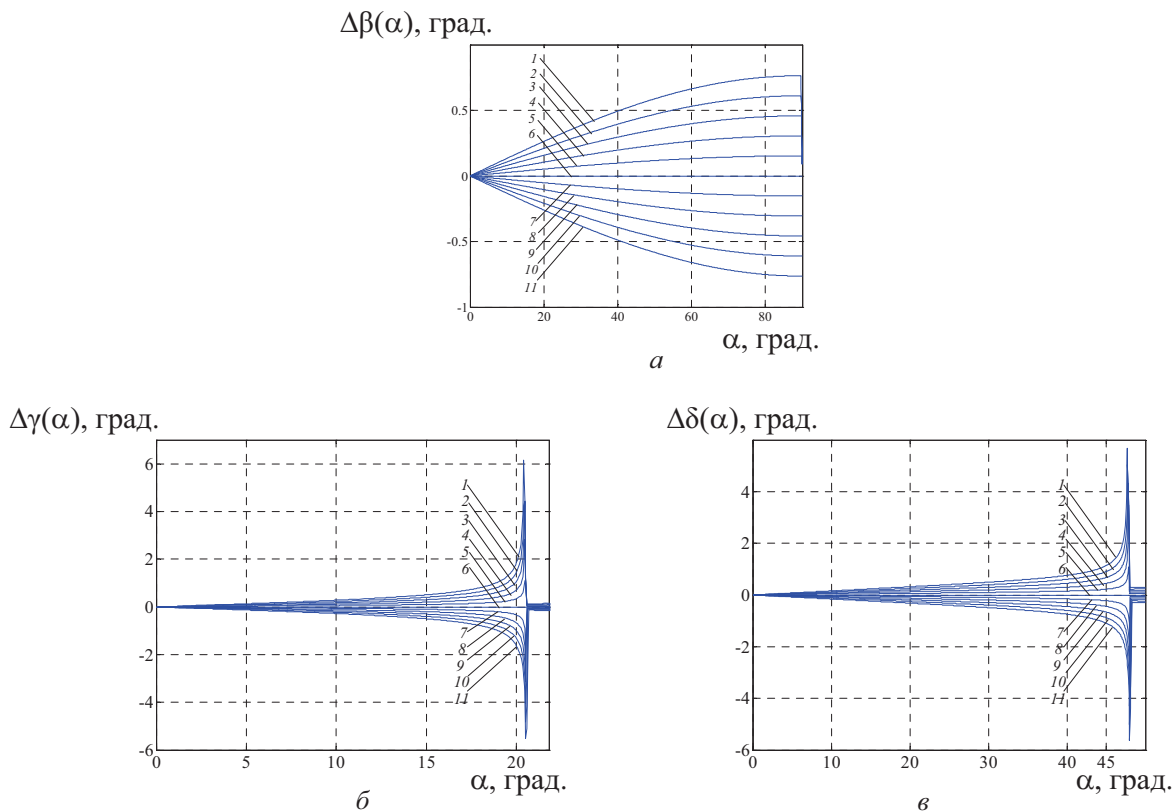


Рис. 1.

### ОБЪЯСНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ

Смещение углов отражения и преломления можно объяснить с помощью принципа Гюйгенса [3], согласно которому каждую точку среды, которой достигла волна, можно рассматривать как источник вторичных сферических волн, распространяющихся по всем направлениям со скоростью, присущей данной среде. Огибающая поверхность – поверхность, которая касается всех сферических поверхностей в данный момент времени, – представляет собой волновой фронт вторичной волны.

На рис. 2 изображено формирование отраженной волны с волновым вектором  $\vec{k}_R$  при движении тела вдоль оси  $y$  со скоростью  $v$ . Из рисунка видно, что в результате движения тела угол отражения не равен углу падения. Угол отражения меньше угла падения. Подобным образом можно объяснить и отклонение углов преломления, наблюдаемое при движении тела.

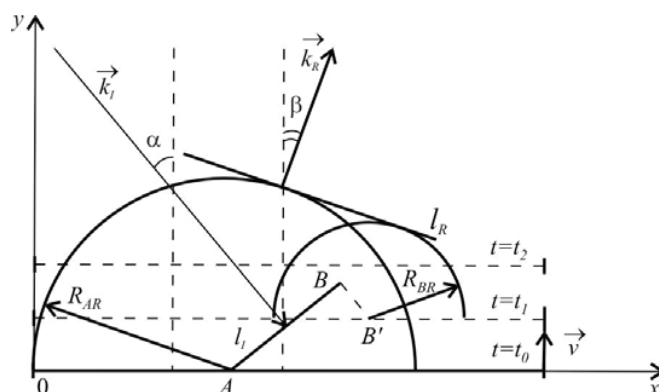


Рис. 2.

Для подтверждения эффектов было проведено компьютерное моделирование формирования отраженной и преломленных волн при падении плоской волны на плоскую поверхность твердого тела, находящегося в жидкости. Рассматривались три варианта условий: тело неподвижно, тело движется на источник волны, тело движется от источника [4]. Моделирование полностью подтвердило эффекты, описываемые выражениями (2) – (5).

### ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрена многопозиционная гидроакустическая система [5], обеспечивающая определение пространственных координат, направления и скорости движения объектов. Эта система состоит из одного передающего и двух приемных устройств, расположенных соответственно в точках с координатами  $x, x_1, x_2$  (рис. 3). В этой системе дистанция до объекта  $r$  и его угловое положение  $\xi$  относительно излучающего устройства рассчитывается триангуляционным методом по результатам измерения углов  $\eta_1, \eta_2$ . Результаты этих расчетов используются для определения направления  $\varphi_v$  и скорости движения  $v$  объекта доплеровским методом.

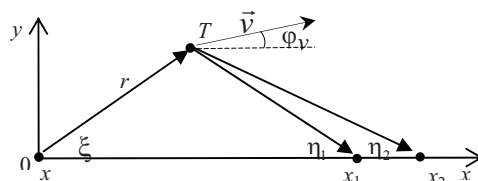


Рис. 3.

Было показано, что при игнорировании отклонения угла отражения возникает систематическая погрешность измерения скорости и направления движения объекта. На рис. 4 для различных углов  $\xi$  (кривые 1 – 4 соответственно для  $\xi=10^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$ ) приведены зависимости погрешности  $\Delta v$  измерения скорости движения объекта от скорости  $v$  его движения. На рис. 5 представлены зависимости погрешности измерения

направления движения  $\Delta\varphi$  от значения направления  $\varphi_v$  движения. Кривым на рис. 4 соответствует угол  $\varphi_v = 30^\circ$ , а кривым на рис. 5 – скорость объекта  $v = 50$  м/с.

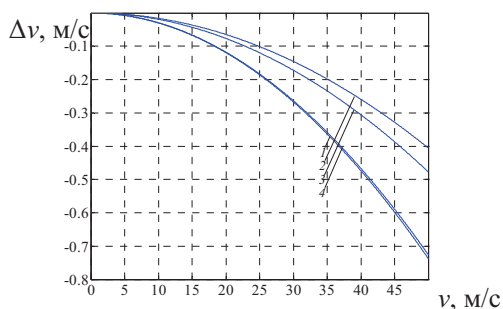


Рис. 4.

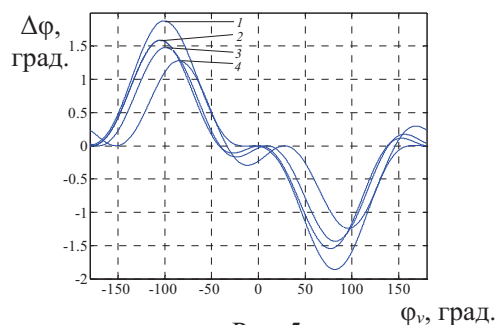


Рис. 5.

Как видно из рисунков, погрешность измерения может быть достаточно большой.

Использование соотношений (2), (3), учитывающих отклонение луча отраженной волны и изменение частоты отраженной волны, вызванные движением объекта, позволяет уменьшить систематическую погрешность измерения. В [5] приведен алгоритм обработки сигналов, учитывающий обнаруженные эффекты.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что отражение и преломление гидроакустических волн на плоской поверхности движущегося твердого тела не подчиняется классическому закону Снелиуса.
2. Получены аналитические выражения, описывающие в условиях движения тела углы и частоты отраженных и преломленных волн.
3. Показано, что при удалении тела от источника угол отражения и углы преломления продольной и поперечной волн отклоняются в сторону отражающей поверхности, а при приближении тела – в сторону от нее. Эффект тем более значителен, чем больше нормальная составляющая скорости движения.
4. Обнаруженные эффекты объясняются с помощью принципа Гюйгенса и подтверждаются результатами компьютерного моделирования.
5. Показано на конкретном примере, что использование полученных обобщающих выражений позволяет уменьшить систематическую погрешность измерения скорости и направления движения объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

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. Горбань І., Курський Ю. Акустичні ефекти в динамічних умовах // Стандартизація, сертифікація, якість. — 2007. — №2. — С. 47—51.
4. Горбань І., Курський Ю. Комп'ютерне моделювання відбиття та заломлення акустичних хвиль на поверхні твердого тіла, що рухається // Гідроакустичний журнал. — 2008. — №5. — С. 29—33.
5. Жарков Ю., Горбань І., Курський Ю. Систематична похибка вимірювання швидкості рухомих, що рухаються, багатопозиційною гідроакустичною системою // Стандартизація, сертифікація, якість. — 2007. — №6. — С. 36—44.