

**THE DOPPLER EFFECT IN NON-RECIPROCAL MEDIA**  
**Glushchenko A.G.<sup>1</sup>, Glushchenko E.P.<sup>2</sup> (Russian Federation)**  
**Email: Glushchenko333@scientifictext.ru**

<sup>1</sup>Glushchenko Alexander Grigorievich – Doctor of Physical Science, Professor;

<sup>2</sup>Glushchenko Evgenia Pavlovna – Candidate PhD, Associate Professor,

DEPARTMENT OF PHYSICS,

VOLGA STATE UNIVERSITY OF TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION,  
SAMARA

**Abstract:** here we consider peculiarities of the Doppler Effect when reflected waves from a moving boundary-moving media. It is shown that the frequencies and coefficients of reflection and transmission of waves depend on the velocity of the interface and the speed of the media. The terms of the Doppler Effect for the transferred waves. Relationships are obtained for the analytical calculation and the results of the calculation of coefficients of reflection, transmission, the Doppler frequencies of the reflected and transferred waves depends on the speed of the media.

**Keywords:** non-reciprocal media, the Doppler Effect.

**ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА В НЕВЗАИМНЫХ СРЕДАХ**  
**Глущенко А.Г.<sup>1</sup>, Глущенко Е.П.<sup>2</sup> (Российская Федерация)**

<sup>1</sup>Глущенко Александр Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор;

<sup>2</sup>Глущенко Евгения Павловна – кандидат физико-математических наук, доцент,  
кафедра физики,

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
г. Самара

**Аннотация:** рассмотрены особенности эффекта Доплера при отражении волн от движущейся границы раздела движущихся сред. Показано, что частоты и коэффициенты отражения и прохождения волн зависят как от скорости движения границы раздела сред, так и от скорости движения самих сред. Установлены условия возникновения эффекта Доплера для прошедших волн. Получены соотношения для аналитического расчета и представлены результаты расчета коэффициентов отражения, прохождения доплеровских частот отраженных и прошедших волн в зависимости от скорости движения сред.

**Ключевые слова:** невязимные среды, эффект Доплера.

**Введение.** Эффект Доплера нашел широкое применение в различных областях науки и измерительной техники [1-2]. В последнее время наблюдается повышенный интерес к этому эффекту в связи с открытием новых разновидностей эффекта (аномальный, обратный, поперечный, двойной, многочастотный и др. [2-5]) и новых возможностей его использования в различных областях оптики, микроволновой техники, акустики, медицинской техники. Эффект Доплера обычно определяют как изменение частоты отраженных волн, наблюдаемое при отражении волн различной физической природы от движущихся объектов, неоднородностей, нестационарных участков сред [1-2]. Эффект рассматривается обычно в однородных, стационарных средах в пространственно одномерном приближении. Вместе с тем, движение сред сопровождается увлечением ими волновых процессов и приводит к невязимности параметров сред и к изменению физических свойств структур [5-8]. Здесь рассмотрено влияние движения сред на эффект Доплера при отражении волн от подвижной границы раздела этих сред. Показано, что эффект Доплера может наблюдаться как для отраженных волн, так и для волн, прошедших через подвижную границу раздела различных сред.

**Основные уравнения.** Пусть координата границы раздела сред описывается зависимостью  $x = ut$  (рис. 1). Среда 1 характеризуется плотностью  $\rho_1$  и скоростью распространения волн  $C_1$ , среда 2 - параметрами  $\rho_2$  и  $C_2$ .

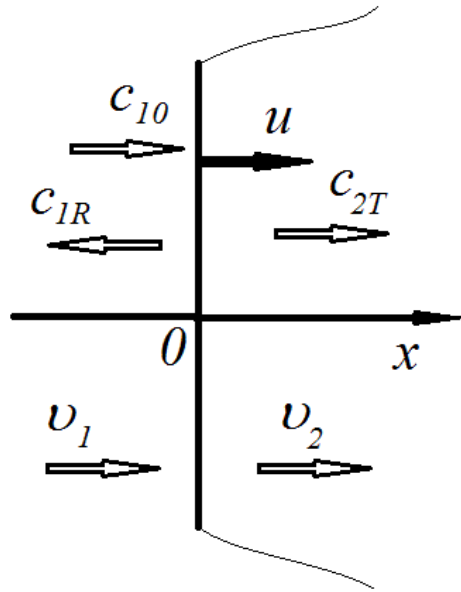


Рис.1. Отражение волн от подвижной границы раздела движущихся сред

Пусть каждая из сред может двигаться вдоль оси  $Ox$  со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Движение сред приводит к увлечению ими волновых процессов со скоростью распространения вдоль оси  $Ox$  в первой среде  $c_{10} = c_1 + v_1$ , в противоположном оси  $Ox$  направлении  $c_{1R} = c_1 - v_1$ . Во второй полубезграничной среде волны распространяются вдоль оси  $Ox$  со скоростью  $c_{2T} = c_2 + v_2$ .

Анализ отражения волн от границы раздела сводится к поиску решения волновых уравнений в граничащих средах 1 и 2 для функции давления падающей  $p_{10}$ , отраженной  $p_{1R}$  и прошедшей через границу  $p_{2T}$  волн с учетом граничных условий на подвижной границе раздела сред  $x = ut$  [3-4]:

$$p_{10} + p_{1R} = p_{2T}, \quad v_{10}x + v_{1R}x = v_{2T}x.$$

Анализ показывает, что решение существует в том случае, когда частоты падающих, отраженных и прошедших волн в каждом из слоев различаются. В этом случае решение ищется в виде:

$$\begin{aligned} p_{10} &= A_{10} \exp[i(\omega t - k_{10}x)], \\ p_{1R} &= A_{1R} \exp[i(\omega_1 t + k_{1R}x)], \\ p_{2T} &= A_{2T} \exp[i(\omega_2 t - k_{2T}x)], \end{aligned}$$

где  $\omega, \omega_1, \omega_2$  - частоты и  $k_{10}, k_{1R}, k_{2T}$  - волновые числа падающей, отраженной и прошедшей волн.

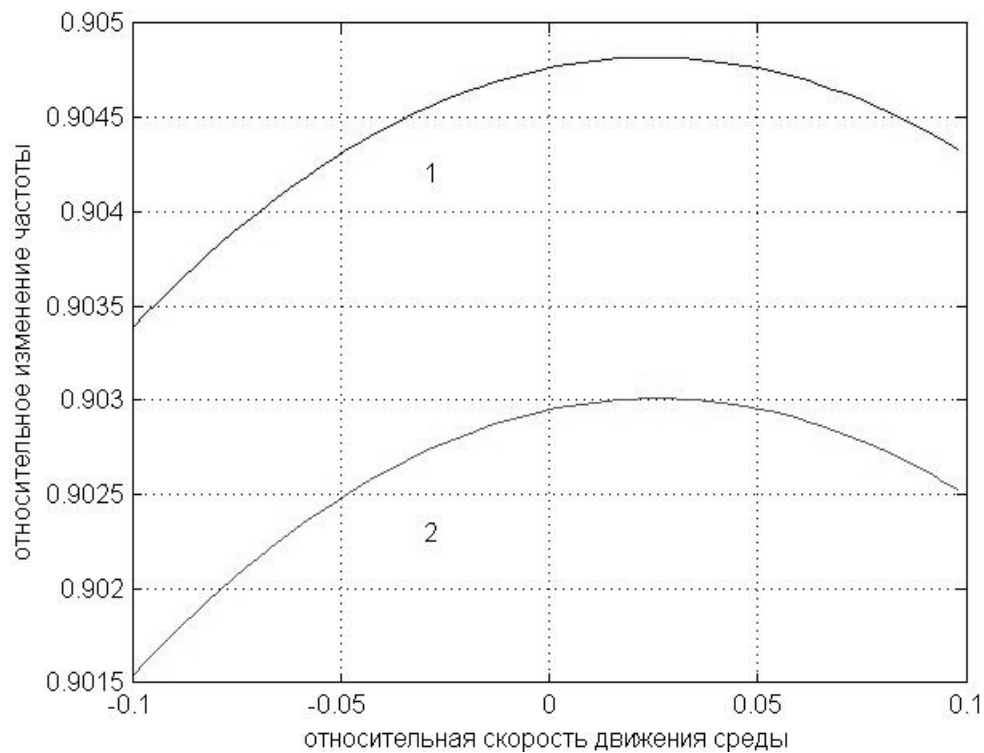
**Основные результаты.** Подстановка искомых решений в первое граничное условие дает аналитические соотношения между частотами:

$$\frac{\omega_1}{\omega} = \frac{c_1 + v_1 - u}{c_1 + v_1} \frac{(c_1 - v_1)}{c_1 - v_1 + u}, \quad \frac{\omega_2}{\omega} = \frac{c_1 + v_1 - u}{c_1 + v_1} \frac{(c_2 + v_2)}{c_2 + v_2 - u} \quad (1)$$

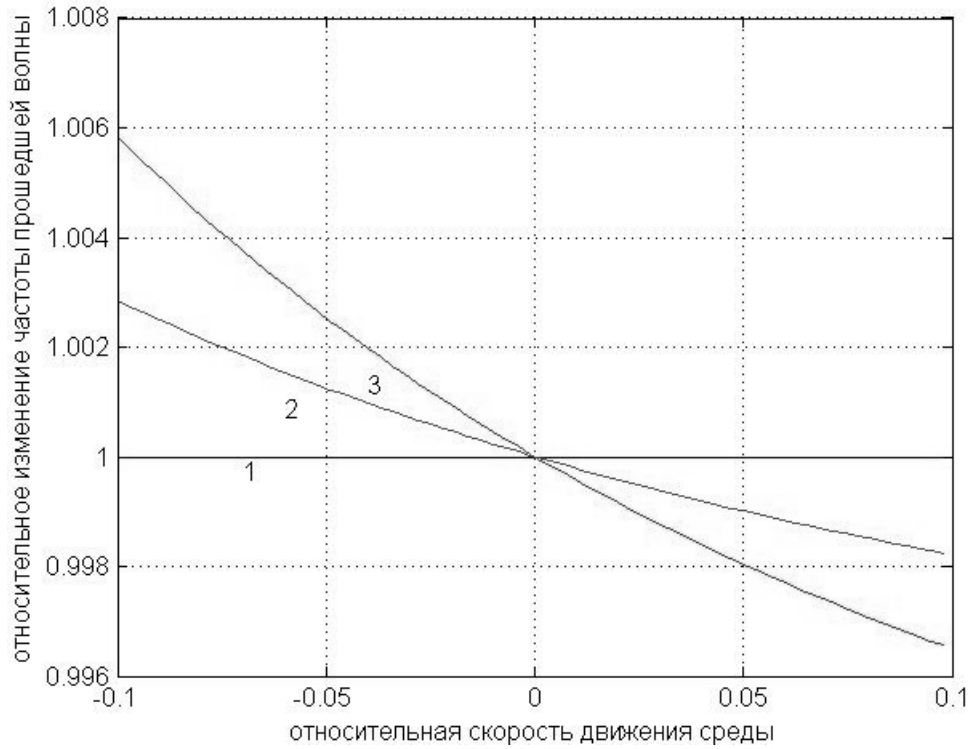
Частоты отраженной и прошедшей волн (1) зависят как от скорости движения границы раздела сред, так и от скоростей движения сред.

Если граница движется в направлении распространения падающей волны (граница раздела «убегает»), частота отраженной волны меньше частоты падающей волны  $\omega_1 < \omega$ ; если навстречу падающей волне, то частота отраженной волны увеличивается  $\omega_1 > \omega$ . Если параметры первой и второй сред совпадают, у прошедших волн частота волны не меняется. Для границы раздела различных сред частота прошедшей волны может быть как больше, так и меньше частоты падающей волны  $\omega$  в зависимости от соотношения скоростей распространения волн в средах:  $c_{10}/c_{2T}$ . При  $c_{10}/c_{2T} > 1$  и скорости движения границы ( $u < c_{10}, c_{2T}$ ) частота прошедшей волны возрастает

$\omega_2 > \omega$ , а при  $c_{10}/c_{2T} < 1$  - уменьшается  $\omega_2 < \omega$ . Таким образом, по характеру изменения частоты отраженных волн можно однозначно судить о направлении движения границы раздела сред. Частота прошедших волн может измениться как в сторону увеличения, так и сторону уменьшения и зависит от соотношения параметров граничащих сред. На рис. 2 показаны зависимости частот отраженной (a) и прошедшей (b) волн от относительной скорости первой среды  $v_1/c_1$  ( $d = c_1 v_2 / c_2 v_1$ ). Если параметры первой и второй сред одинаковые ( $v_1 = v_2, c_1 = c_2$ ), частота прошедших волн не меняется (рис. 2b, кривая 1). Относительное изменение частоты прошедших волн растет с увеличением различия параметров первой и второй сред (рис. 2b, кривые 2 и 3).



a)



b)

Рис. 2. Изменение частот отраженной (а,  $1 \rightarrow u/c_1 = 0.050$ ,  $2 \rightarrow u/c_1 = 0.051$ ) и прошедшей волн (b,  $u/c_1 = 0.05$ ,  $1 \rightarrow d = 1$ ,  $2 \rightarrow d = 1.2$ ,  $3 \rightarrow d = 1.4$ ).

Коэффициенты отражения и прохождения

$$R = \frac{A_{1R}}{A_{10}} = \frac{\rho_2 k_{10} - \rho_1 k_{2T}}{\rho_2 k_{1R} + \rho_1 k_{2T}} \quad T = \frac{A_{2T}}{A_{10}} = \frac{\rho_2 (k_{1R} + k_{10})}{\rho_2 k_{1R} + \rho_1 k_{2T}}. \quad (2)$$

Коэффициент отражения (2) может быть представлен в виде:

$$R = \frac{\frac{\rho_2}{c_1 + v_1 - u} - \frac{\rho_1}{c_2 + v_2 - u}}{\frac{\rho_2}{c_1 - v_1 + u} + \frac{\rho_1}{c_2 + v_2 - u}} \quad (3)$$

Отсюда видно, что условие отсутствия отраженной волны от границы раздела сред (наблюдаемое обычно при согласовании параметров сред  $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$ ) теперь может быть обеспечено движением

границы раздела сред со скоростью:  $u = \frac{\rho_2 (c_2 + v_2) - \rho_1 (c_1 + v_1)}{\rho_2 - \rho_1}$  или движением сред:

- второй среды со скоростью  $v_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} (c_1 + v_1 - u) - c_2 + u$ , или

- первой среды со скоростью  $v_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} (c_2 + v_2 - u) - c_1 + u$ .

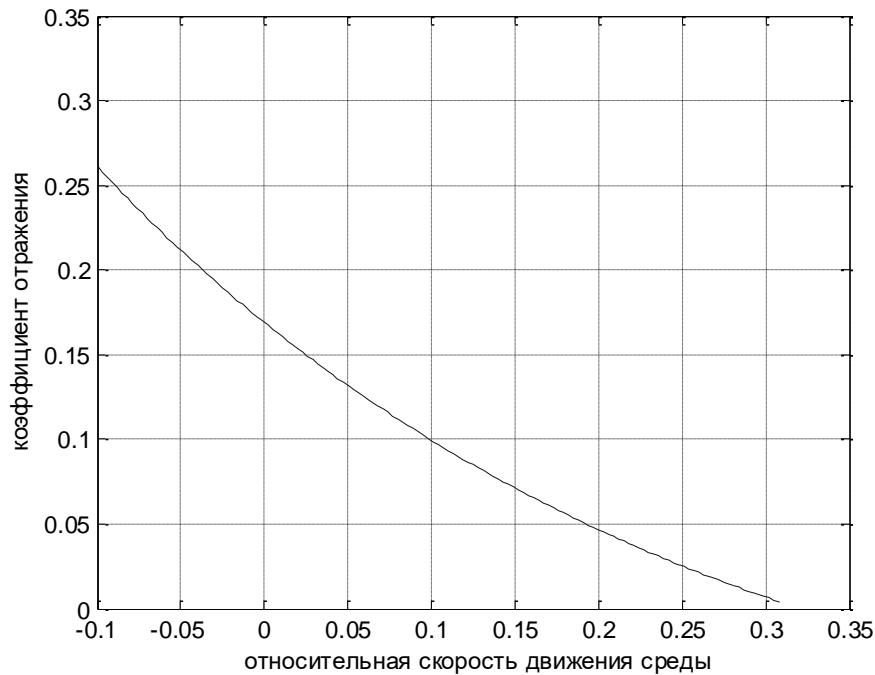


Рис. 3. Коэффициент отражения ( $\rho_2/\rho_1 = 1,1; u/c_1 = 0,1; c_2/c_1 = 1,2$ )

На рис. 3 показана зависимость коэффициента отражения  $R$  в зависимости от относительной скорости движения первой среды  $u_1/c_1$ .

**Заключение.** Движение сред существенно влияет как на величину доплеровского изменения частот отраженной и прошедшей волн, так и на коэффициенты отражения и прохождения. Движение границ разделов и сред позволяет компенсировать неоднородности структуры и обеспечить отсутствие отражения волн подбором соответствующих скоростей. Наиболее сильное влияние движения сред проявляется при скоростях, сопоставимых со скоростью распространения волн в этих средах.

#### Список литературы / References

1. Eden A. The Search for Christian Doppler. Springer-Verlag Wien, 1992. 136 p.
2. Seddon N., Bearpark T. New look for the Doppler effect // Science, 2003. V. 302. P. 1537.
3. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацьгура В.Т. Основы акустики. Київ: Наукова думка, 2007. 640 с.
4. Остаев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.
5. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П., Устинова Е.С. Невзаимные волновые процессы // European research, 2015. № 10 (11). С. 9-12.
6. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П. Методика расчета пространственного распределения интенсивности волнового процесса, формируемого точечными источниками // Вестник науки и образования, 2016. № 11 (23). С. 6-9.
7. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П., Устинова Е.С. Особенности эффекта Доплера в многомодовом волноводе // Компьютерная оптика, 2017. Т. 41. № 5. С. 687-693. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-687-693.
8. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П., Иванов В.В., Устинова Е.С. Влияние движения сред на отражение упругих волн от подвижной границы // Научное обозрение. Физико-математические науки, 2014. № 1. С. 25.