

УДК 534.222.1

Шиллер Михаил Павлович

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Камалетдинова Алина Ильдаровна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Иванова Олеся Сергеевна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Трандин Семён Евгеньевич

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ДЛЯ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Аннотация. В данной работе проводится теоретическое исследование эффекта Доплера — изменения воспринимаемой частоты волны при относительном движении источника и приёмника. Целью является систематизация знаний о механизме явления для акустических волн в неподвижной среде. Рассмотрены случаи движения источника и движения наблюдателя, выведены расчётные соотношения для частоты, проанализирована физическая причина их различия. Полученные выводы имеют практическое значение для радиолокации, медицинской диагностики и астрофизических измерений.

Ключевые слова: эффект Доплера, частота, акустическая волна, источник, приёмник, относительное движение, скорость звука.

Shiller Mikhail Pavlovich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Kamaletdinova Alina Ildarovna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Ivanova Olesya Sergeevna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Trandin Semyon Evgenievich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

THEORETICAL ANALYSIS OF THE DOPPLER EFFECT FOR ACOUSTIC WAVES AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Abstract. This paper presents a theoretical study of the Doppler effect — the change in the perceived frequency of a wave caused by the relative motion of the source and the receiver. The goal is to systematize knowledge about the mechanism of the phenomenon for acoustic waves in a stationary medium. The cases of a moving source and a moving observer are considered, the calculation relations for the frequency are derived, and the physical reason for their difference is analyzed. The conclusions are of practical importance for radar, medical diagnostics, and astrophysical measurements.

Keywords: Doppler effect, frequency, acoustic wave, source, receiver, relative motion, speed of sound.

Введение

Волновые процессы сопровождают человека повсюду — от звука речи до излучения далёких звёзд. Одним из наиболее наглядных и практически значимых волновых явлений является эффект Доплера, впервые теоретически описанный австрийским физиком Кристианом Доплером в 1842 году. Суть явления заключается в том, что частота волны, регистрируемая приёмником, отличается от частоты, излучаемой источником, если источник и приёмник движутся друг относительно друга. Классический пример эффекта знаком каждому: тон сигнала проезжающего автомобиля кажется выше при его приближении и ниже при удалении. Несмотря на кажущуюся простоту, корректное теоретическое описание явления требует чёткого разграничения двух принципиально разных ситуаций: когда движется источник волн и когда движется наблюдатель относительно среды распространения.

Актуальность работы обусловлена широчайшим применением эффекта Доплера в современной технике: он лежит в основе доплеровских радаров измерения скорости, ультразвуковой медицинской диагностики кровотока, систем спутниковой навигации и методов определения лучевых скоростей небесных тел в астрофизике.

Целью данного исследования является теоретический анализ механизма формирования доплеровского сдвига частоты для акустических волн и вывод соответствующих расчётных соотношений на основе представлений о распространении волн в неподвижной среде.

Методы и теоретические основы

Будем рассматривать звуковые волны, распространяющиеся в неподвижной однородной среде (например, в воздухе) с постоянной

скоростью v . Скорость звука определяется свойствами самой среды и не зависит от движения источника. Это ключевое отличие акустического эффекта Доплера от оптического: для звука существует выделенная система отсчёта, связанная со средой.

Пусть источник излучает волну с собственной частотой f и соответствующей длиной волны $\lambda = v / f$. Рассмотрим первый случай — движение наблюдателя со скоростью u по направлению к неподвижному источнику. Относительно наблюдателя скорость волны возрастает и становится равной $v + u$, тогда как длина волны не изменяется. Воспринимаемая частота определяется соотношением:

$$f' = f \cdot (v + u) / v$$

При удалении наблюдателя от источника знак скорости меняется, и в числителе формулы вместо сложения появляется вычитание. Таким образом, движение наблюдателя изменяет регистрируемую частоту за счёт изменения относительной скорости встречи с гребнями волны.

Рассмотрим второй случай — движение источника со скоростью w по направлению к неподвижному наблюдателю. Здесь длина волны в среде физически сжимается, поскольку за период колебаний источник смещается в сторону наблюдателя. Эффективная длина волны становится равной $(v - w) / f$, и воспринимаемая частота принимает вид:

$$f' = f \cdot v / (v - w)$$

При удалении источника от наблюдателя в знаменателе вместо вычитания появляется сложение, и частота уменьшается. Принципиально важно, что формулы для движущегося источника и для движущегося наблюдателя математически различны, хотя при малых скоростях по сравнению со скоростью звука дают близкие результаты.

Обобщённое соотношение, учитывающее одновременное движение источника и приёмника вдоль линии, соединяющей их, записывается следующим образом:

$$f' = f \cdot (v \pm u) / (v \mp w)$$

Верхние знаки соответствуют сближению, нижние — удалению. Это выражение полностью описывает продольный акустический эффект Доплера и является основой для всех практических расчётов.

Результаты теоретического анализа

Анализ полученных соотношений позволяет сформулировать ряд важных физических выводов. Во-первых, доплеровский сдвиг частоты прямо пропорционален относительной скорости при условии её малости по

сравнению со скоростью звука. Это означает, что измерение сдвига частоты даёт прямой способ определения скорости движущегося объекта.

Во-вторых, асимметрия формул для движущегося источника и движущегося наблюдателя имеет глубокий физический смысл: она отражает наличие выделенной среды распространения звука. При движении источника изменяется сама структура волнового поля в пространстве (изменяется длина волны), тогда как при движении наблюдателя изменяется лишь скорость, с которой он пересекает неизменные волновые фронты.

В-третьих, при приближении скорости источника к скорости звука знаменатель формулы стремится к нулю, а воспринимаемая частота — к бесконечности. Физически это соответствует накоплению волновых фронтов перед источником и образованию ударной волны — звукового удара, наблюдаемого при преодолении самолётом звукового барьера.

Практическое применение полученных соотношений чрезвычайно широко. В медицине ультразвуковая доплерография позволяет по сдвигу частоты отражённого сигнала измерять скорость кровотока. В метеорологии доплеровские радары определяют скорость перемещения дождевых фронтов. В астрофизике аналогичный по природе эффект для света (красное и фиолетовое смещение спектральных линий) служит основным инструментом измерения лучевых скоростей звёзд и галактик.

Заключение

Проведённый теоретический анализ подтверждает, что эффект Доплера является фундаментальным следствием конечности скорости распространения волн и относительности движения источника и приёмника.

Основные выводы исследования:

Доплеровский сдвиг частоты однозначно связан с относительной скоростью источника и приёмника, что позволяет использовать его для бесконтактного измерения скоростей.

Формулы для движущегося источника и для движущегося наблюдателя различны, что является прямым следствием существования выделенной среды распространения звука.

Предельный случай движения источника со скоростью звука приводит к образованию ударной волны, что объясняет физику звукового удара.

Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом поперечного и релятивистского эффектов Доплера для электромагнитных волн, где

отсутствует выделенная среда и описание строится на основе специальной теории относительности.

Использованные источники

Савельев И.В. Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. — М.: Лань, 2019. — 432 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. — М.: Физматлит, 2009. — 656 с.

Крауфорд Ф. Волны. Берклевский курс физики. Т. 3. — М.: Наука, 1984. — 512 с.

Горелик Г.С. Колебания и волны. — М.: Физматлит, 2007. — 656 с.