

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

С.А. Переселков

ВВЕДЕНИЕ В ОБЩУЮ АКУСТИКУ

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2014

ВВЕДЕНИЕ

Акустика — это учение о звуке, т.е. об упругих колебаниях и волнах в газах, жидкостях и твердых телах, слышимых человеческим ухом. Частоты таких колебаний и волн лежат в диапазоне примерно от 20 Гц до 20 кГц. В широком смысле слова это область физики, изучающая упругие колебания и волны в различных средах от самых низких частот (инфразвук, условно от 0 до 20 Гц) до предельно высоких частот (ультразвук 10^5 — 10^8 Гц и гиперзвук в кристаллических твердых телах при низкой температуре 10^9 — 10^{13} Гц). Всю историю развития акустики условно можно разбить на три периода.

Первый период — начиная с древней истории до конца 17 в. и начала 18 в. Пифагор (6 в. до н. э.) открыл связь между высотой тона и длиной струны (или трубы). Аристотель (4 в. до н. э.) объяснил эхо отражением звука от препятствий и понимал, что звучащее тело создает сжатия и разрежения воздуха. Леонардо да Винчи (15—16 вв.) сформулировал принцип независимости распространения звуковых волн от различных источников. Галилей (конец 17 века) обнаружил, что звучащее тело совершает колебания, а высота звука зависит от частоты, тогда как сила звука — от амплитуды этих колебаний. Французский ученый М. Мерсенн измерил впервые скорость звука в воздухе.

Второй период охватывает время от конца 1917-го до 1920-х годов. И. Ньютон создает основу механики. Р. Гук (Англия) на опыте устанавливает пропорциональность между напряжениями и деформациями в твердых телах — основной закон теории упругости. Х. Гюйгенс (Голландия) формулирует важный принцип — так называемый принцип Гюйгенса в волновом движении. С этого времени начинается расцвет классической физики. Механика, гидродинамика и теория упругости, математическая физика, теория колебаний и волн, акустика и оптика развиваются в тесной взаимосвязи. В этот период акустика развивается как раздел механики. Создается общая теория механических колебаний, теория излучения и распространения упругих (звуковых) волн в различных средах, разрабатываются методы измерения характеристик звука (скорости звука, звукового давления в среде, импульса, энергии и потока энергии звуковых волн). Диапазон частот звуковых волн расширяется и охватывает как область инфразвука (ниже 20 Гц), так и ультразвука (свыше 20 кГц). Выясняется физическая сущность тембра звука (его «окраска»). Члены Петербургской

реть, однако, только простейшие виды волн — бегущие одномерные волны (см. § 2). Для волн же любого вида этот способ весьма неудобен. В самом деле, силы упругости, действующие на какую-либо частицу, вызваны деформациями соседних частиц, а эти деформации связаны с движением еще более удаленных частиц и т. д.; в итоге, чтобы найти движение одной частицы, требуется выяснить и движение всех остальных частиц среды. Но тогда, оказывается, проще с самого начала отказаться от громоздкого рассмотрения поведения каждой частицы в отдельности и вместо этого изучать *волну в целом как самостоятельный объект*. В этом и заключается второй способ.

При втором способе изучения содержание акустики как науки можно назвать *механикой упругих волн*, в противоположность механике частиц среды, с которой имеем дело при первом способе. Выбор в качестве основного объекта изучения не отдельных частиц среды, а всей волны в целом диктуется тем, что для волны удастся найти простые законы поведения: законы распространения, законы отражения и преломления на границах разных сред, законы рассеяния от препятствий, особенности поведения в ограниченных областях среды и т. д. Получить равноценные результаты, изучая движение системы отдельных взаимодействующих частиц, было бы практически невозможно. Конечно вывод уравнения поведения волн основан на тех же уравнениях механики частиц. Более того, все результаты волновой теории в принципе можно было бы получить расчетом движений всех частиц среды, сколь ни неосуществимо на практике было бы такое вычисление: принципиальной невозможности, вроде той, которая встречается при попытке вывода законов термодинамики только из механики Ньютона, здесь нет. Схема построения акустики как механики упругих волн имеет, таким образом, следующий вид. Общие законы поведения упругих волн мы получим как следствие, ньютоновской механики для частиц среды. Нополучив эти законы, мы в каждой конкретной физической ситуации будем искать поведение волны в целом, уже не интересуясь движением отдельных частиц среды, в которой бежит волна.

Будем характеризовать волну непрерывным распределением в среде *давления, скорости частиц, плотности и температуры* (иногда и некоторыми другими величинами; например, в твердых телах вместо давления *рассматривают тензор напряжений*). В каждой волне эти величины и их изменения связаны друг с другом. Совокупность всех этих величин называют *волновым полем*. Распространение волны — это

изменение волнового поля с течением времени. Превышение p давления в волне над давлением P в невозмущенной среде (например, в воздухе — превышение над атмосферным давлением) будем называть *акустическим давлением* или *звуковым давлением*. Подчеркнем, что эта величина нас интересует сама по себе, а не как приращение невозмущенного давления. Основные величины, характеризующие акустическое состояние жидкости помимо давления, это скорость частиц жидкости (v), а также плотность (ρ) и температура (T) жидкости. При движении жидкости, в том числе и в любой звуковой волне, все эти величины изменяются от точки к точке и с течением времени. Изменения этих величин зависят друг от друга. Так, давление зависит от плотности и температуры, изменение скорости частиц с течением времени зависит от пространственного изменения давления и т.д. Если все эти изменения зависят от времени и координат достаточно гладко, то связь между величинами, характеризующими волну, оказывается чрезвычайно сильной: в этом случае задание пространственно-временной зависимости только одной из величин (например, давления) однозначно определяет пространственно-временные зависимости всех остальных величин. Математически зависимости между величинами, характеризующими упругую волну, можно выразить дифференциальными уравнениями в частных производных с независимыми переменными — временем и координатами. Согласно сказанному выше эти уравнения обеспечивают однозначное решение для всех входящих в них характеристик волны, если зависимость от времени и координат для одной из этих величин задана. Такие системы уравнений называют *полными*.

Акустические характеристики среды. В том, что распространение звуковых волн происходит не мгновенно, можно видеть из простейших наблюдений. Если вдали происходит гроза, выстрел, взрыв, свисток паровоза, удар топором и т.п., то сначала все эти явления видно, а только потом, спустя некоторое время, слышен звук. Как и всякая волна, звуковая волна характеризуется скоростью распространения колебаний в ней. Скорость распространения звуковой волны является основным параметром, определяющим акустические свойства среды распространения. Скорость звука всегда конечна и определяется именно упругими свойствами и плотностью среды. Отсюда следует, что во всех акустических вопросах нужно учитывать как упругость среды, так и ее инерционные свойства; от других же свойств среды ее акустическое поведение не зависит.

Как будет показано ниже, скорость распространения звуковой волны в среде определяется соотношением:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}, \quad (1.1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и по-

стоянном объеме, равное для воздуха, например, 1,43 при 18 °С и литосферном давлении. Эта формула говорит о том, что распространение звука есть процесс адиабатический; изменение температуры в звуковой волне на расстоянии половины длины волны (т.е. во времени — за полпериода) не успевает выравниваться. Скорость звука в идеальном газе не зависит от давления газа (поскольку при изменении P таком же отношении изменяется ρ), но зависит от температуры T . При увеличении на 1 °С увеличивается в воздухе примерно на 0,5 м/с и выражается формулой

$$c \approx 20\sqrt{T} \text{ м/с}, \quad (1.2)$$

где T выражается в Кельвинах (К). Эту формулу получаем, если воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$$PV = \frac{P}{\rho} = RT, \quad (1.3)$$

где $R = C_p - C_v$ — газовая постоянная. Отметим, что скорость звука в газах по порядку величины совпадает со средней скоростью движения молекул. Приведем значения скорости звука в некоторых газах (температура $t = 0$ °С) и жидкостях ($t = 20$ °С; кроме водорода и гелия)

ГАЗЫ		ЖИДКОСТИ	
<i>Воздух</i>	331 м/с	<i>Вода</i>	1490 м/с
<i>Азот</i>	334 м/с	<i>Этиловый спирт</i>	1180 м/с
<i>Кислород</i>	316 м/с	<i>Ртуть</i>	1453 м/с
<i>Углекислота</i>	216 м/с	<i>Водород</i>	1127 м/с
<i>Гелий</i>	965 м/с	<i>Гелий</i>	180 м/с
<i>Водород</i>	1265 м/с		

Интересно, что Ньютон, давший первый теоретический расчет скорости звука в газе, исходил из уравнения Бойля — Мариотта для давления газа; это равносильно предположению об изотермичности процесса распространения звука. Соответственное значение: