

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОКД
_____ Суржиков А.П.
«__» _____ 2018 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА
В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Методические указания
к проведению лабораторной работы по курсу:
«Акустический контроль и диагностика»
для студентов, обучающихся по направлению:
12.04.01 – «Приборостроение»

Томск 2018

УДК 620.179.14

Определение скорости распространения звука в металлических и неметаллических материалах. Методические указания к проведению лабораторной работы по курсу: «Акустический контроль и диагностика» для студентов, обучающихся по направлению: 12.04.01 – «Приборостроение».

Составители: ведущий эксперт ОКД ИШНКБ ТПУ Капранов Б.И.
 доцент ОКД ИШНКБ ТПУ Калиниченко А.Н.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании
ОКД ИШНКБ «___» _____ 201__ г. протокол №__.

Руководитель ОКД

д.ф.-м.н. _____ А.П.Суржиков

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить скорость распространения звука в металлических и неметаллических материалах.
2. Вычислить характеристический импеданс для материалов используемых образцов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Скорость звука

Под скоростью звука в среде понимают скорость перемещения в этой среде упругой волны при условии, что форма ее профиля остается неизменной. Для гармонической волны $P = A \cdot \cos(\omega t + Kx + \varphi)$ скорость звука выражается через круговую частоту ω и волновое число K формулой:

$$C = \frac{\omega}{K}; C = \lambda f \quad (1)$$

где: $\omega = 2\pi f$;

$$K = \frac{2\pi}{\lambda}; \lambda - \text{длина волны.}$$

Скорость гармонической волны называется также **ФАЗОВОЙ СКОРОСТЬЮ ЗВУКА**. Если форма волны меняется по мере ее движения, то фазовая скорость оказывается различной для различных частот, т.е. имеет место **ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА**. В этих случаях пользуются также понятием **ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА**.

Газы и жидкости

В газах и жидкостях звук распространяется в виде объемных волн разрежения-сжатия, причем процесс происходит обычно адиабатически, т.е. изменение температуры в звуковой волне не успевает выравняться, т.к. за $1/2$ периода тепло из нагретых (сжатых) участков не успевает перейти к холодным (разреженным) участкам. Адиабатическая скорость звука определяется скоростью передачи давления:

$$C = \sqrt{\left(\frac{dF}{d\rho}\right)_S} \quad (2)$$

где: P – давление в веществе;

ρ – плотность вещества;

S – обозначает, что производная берется при постоянной энтропии.

Скорость может быть записана в одной из следующих формул:

$$C = \sqrt{\frac{K_{ad}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad} \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\beta_{из} \cdot \rho}} \quad (3)$$

где: K_{ad} – адиабатический модуль всестороннего сжатия;

$$\beta_{ad} = \frac{1}{K_{ad}} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_S - \text{адиабатическая сжимаемость;}$$

$\beta_{из} = \gamma \cdot \beta_{ад}$ – изотермическая сжимаемость;

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и при

постоянном объеме.

В идеальном газе:

$$C = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \quad (4)$$

где: $P = 8,31 \frac{Дж}{моль \cdot К}$ – универсальная газовая постоянная;

μ – молекулярный вес газа.

Это, так называемая, ЛАПЛАСОВА СКОРОСТЬ ЗВУКА. В газе она совпадает по порядку величины со средней тепловой скоростью движения молекул. Величина $C' = \sqrt{\frac{P}{\rho}}$ называется НЬЮТОНОВОЙ СКОРОСТЬЮ ЗВУКА.

Она давала бы скорость звука при бесконечной теплопроводности, при которой сжатия и разрежения происходили бы изотермически. В действительных средах имеет место лапласова скорость звука.

Скорость звука в газах меньше, чем в жидкостях, как правило, меньше, чем в твердых телах. В табл. 1 и табл. 2 приведены значения скоростей звука для некоторых газов и жидкостей.

Скорость звука в идеальных газах не зависит от давления и растет с ростом температуры как \sqrt{T} . Изменение C , отнесенное к 1 градусу, равно $\frac{\Delta C}{\Delta T} = \frac{C}{2T}$.

Относительное изменение скорости звука в воздухе при изменении температуры на 1 градус составляет примерно 0,17%. В жидкостях скорость звука, как правило, уменьшается с ростом температуры и изменение скорости на один градус составляет, например, $-5,5 \left[\frac{м}{с \cdot град} \right]$ для ацетона и $-3,6 \left[\frac{м}{с \cdot град} \right]$ для

этилового спирта. Исключением из этого правила является вода, в которой скорость звука при комнатной температуре увеличивается с ростом температуры на $2,5 \left[\frac{м}{с \cdot град} \right]$ и достигает максимума при температуре 74°C и с дальнейшим

ростом температуры уменьшается. Скорость звука в воде растет при увеличении давления примерно на 0,01% на 1 атмосферу; кроме того, скорость звука в воде растет с увеличением содержания растворенных в ней солей.

В сжиженных газах скорость звука больше, чем в газах при той же температуре.

Скорость звука в смесях газов или жидкостей зависит от концентрации компонентов смеси, в газовых смесях скорость звука хорошо описывается формулой:

$$C = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

в которой в качестве μ взят молекулярный вес смеси, определяемый молекулярными весами компонент с учетом их концентрации.

В жидких смесях зависимость СЗ, от концентрации компонент имеет довольно сложный характер, который связан с видом молекулярных взаимодействий. Так, например, в спиртоводных, кислото-водных смесях при некоторой концентрации имеется максимум скорости звука, а в таких смесях как ацетон с углеродом, бензол с четыреххлористым углеродом и др., при некоторой концентрации скорость звука имеет минимум. В водных растворах солей скорость звука растет с ростом концентрации во всем интервале концентраций. Таким образом, измерения скорости звука могут служить для определения контроля концентрации компонент смесей и растворов.

В жидком гелии скорость звука увеличивается при понижении температуры. При фазовом переходе в сверхтекучее состояние имеется излом на кривой зависимости скорости звука от температуры; кривые подходят к точке перехода с наклоном разного знака. Скорости звука в некоторых жидкостях и газах приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1 – Скорость звука в газах при 0°С

Газ	С (м/с)
Азот	334
Кислород	316
Воздух	331
Гелий	965
Водород	1284
неон	435
Метан	430
Аммиак	415
СО ₂	259

Таблица 2 – Скорость звука в жидкостях при 20°С

Жидкость	С (м/с)
Вода	1490
Ацетон	1190
Бензол	1324
Спирт этиловый	1180
Толуол	1324
Четыреххлористый углерод	920
Ртуть	1453
Глицерин	1923

Твердые тела

Скорость звука в изотропных твердых телах определяется модулями упругости вещества. В неограниченной твердой среде распространяются продольные и сдвиговые (поперечные) упругие волны, причем фазовая скорость звука для продольной волны равна:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}},$$

а для сдвиговой:

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где: E – модуль Юнга;

G – модуль сдвига;

σ – коэффициент Пуассона;

K – модуль объемного сжатия.

Скорость распространения продольных волн всегда больше, чем скорость сдвиговых волн, а именно выполняется соотношение $C_l > C_t \sqrt{2}$. Значения продольной и поперечной скорости звука для некоторых твердых тел приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Плотности, скорости звука и акустический импеданс некоторых распространенных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Акустический импеданс, $10^6 \frac{кг}{м^2 \cdot с}$
Акрил	1180	2670	-	3,15
Воздух	0,129	330	-	0,00033
Алюминий	2700	6320	3130	17,064
Оксид алюминия	3600	9000	5500	32,400
Бериллий	1820	12800	-	23,3
Висмут	9800	2180	1100	21,364
Латунь	8100	4430	2120	35,883
Кадмий	8600	2780	1500	23,908
Чугун	6900	5300	2200	24,150
Бетон	2000	4600	-	9,200
Медь	8900	4700	2260	41,830
Стекло	3600	4260	2560	15,336
Глицерин	1300	1920	-	2,496
Золото	19300	3240	1200	62,532
Серое литье	7200	4600	2650	33,120
Твердый сплав	11000	6800	4000	74,800
Свинец	11400	2160	700	24,824

Магний	1700	5770	3050	9,809
Моторное масло	870	1740	-	1,514
Никель	8800	5630	2960	49,544
Люцит (оргстекло)	1180	2730	1430	3,221
Платина	21400	3960	1670	84,744
Полиамид (нейлон)	1100	2620	1080	2,882
Полиэтилен	940	2340	925	2,200
Полистирол	1060	2380	1150	2,523
Поливинил- хлорид (ПВХ твердый)	1400	2395	1060	3,353
Фарфор	2400	5600	3500	13,440
Кварц	2650	5760	-	15,264
Кварцевое стекло	2600	5570	3515	14,482
Серебро	10500	3600	1590	37,800
Сталь (низколеги- рованный сплав)	7850	5940	3250	46,629
Сталь (калиброванный блок)	7850	5920	3250	46,472
Олово	7300	3320	1670	24,236
Титан	4540	6230	3180	26,284
Вольфрам	19100	5460	2620	104,286
Уран	18700	3200	-	59,840
Вода (293 К)	1000	1480	-	1,480
Цинк	7100	4170	2410	29,607

В монокристаллических твердых телах скорость звука зависит от направления распространения волны. В тех направлениях, в которых возможно распространение чистых продольных и чистых поперечных волн, в общем случае имеется одно значение C_l и два C_t . Если значение C_t различны, то соответствующие волны иногда называют быстрой и медленной поперечными волнами. В общем случае для каждого направления распространения волны в кристалле могут существовать три волны с разными скоростями распространения, которые определяются соответствующими комбинациями модулей упругости, причем векторы колебательного смещения частиц в этих трех волнах взаимно перпендикулярны.

Во многих веществах скорость звука зависит от наличия посторонних примесей. В полупроводниках и диэлектриках скорость звука чувствительна к концентрации примесей. Так при легировании полупроводника примесью, увеличивающей число носителей тока, скорость звука уменьшается с

увеличением концентрации; скорость звука в полупроводниках слабо возрастает при уменьшении температуры.

В металлах и сплавах скорость звука существенно зависит от обработки, которой был подвергнут металл: прокат, ковка, отжиг и т.д. Частично это явление связано с дислокациями, наличие которых так же влияет на скорость звука. В металлах, как правило, скорость звука уменьшается с ростом температуры. При переходе металла в сверхпроводящее состояние этот характер зависимости меняется: в точке перехода изменяется знак величины $\frac{\partial C}{\partial T}$. В сильных магнитных

полях появляются некоторые тонкие эффекты в зависимости скорости звука от магнитного поля, которые отражают особенности поведения электронов в монокристалле металла. Так, при распространении звука по некоторым направлениям в кристалле появляются осцилляции скорости звука как функции магнитного поля. Измерение зависимости скорости звука от магнитного поля являются чувствительным методом исследования внутренней структуры металлов.

В пьезоэлектриках и сегнетоэлектриках скорость звука определяется не только модулями упругости, но и пьезомодулем и проводимостью вещества: наличие электромеханической связи делает вещество менее жестким и, следовательно, уменьшает его скорость звука.

Аналогичное явление наблюдается в магнито-стрикционных материалах. Наличие магнитоупругой связи приводит для них, кроме того, к появлению заметной зависимости скорости звука от напряженности магнитного поля, обусловленной так называемый дельта E-эффектом, т.е. зависимостью модуля Юнга от величины поля. Эти изменения скорости звука могут быть порядка нескольких процентов (иногда до десятков процентов). В сегнетоэлектриках имеется аналогичная зависимость скорости звука от напряженности электрического поля.

В ограниченных твердых телах, кроме продольной и поперечной волн, имеются и другие типы волн. Так, вдоль свободной поверхности твердого тела или вдоль границы его с другой средой распространяется специфический вид волн – поверхностные волны, скорость которых меньше, чем все остальные скорости звука для данного твердого тела. В пластинах, стержнях и других твердых акустических волноводах распространяются нормальные волны, скорость которых определяется не только упругими характеристиками вещества, но и геометрией тела. Так, например, скорость звука для продольной волны в стержне, поперечные размеры которого много меньше длины волны, равна:

$$C_{cm} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

Методы изменения скорости звука можно подразделить на резонансные методы, метод интерферометра, импульсные методы, оптические методы.

Наибольшую точность измерения можно получить, используя импульсно-фазовые методы. Оптические методы дают возможность измерять скорость на гиперзвуковых частотах, вплоть до 10^{11} - 10^{12} Гц. Точность измерения скорости звука зависит от того, надо ли получить абсолютные значения скорости звука (как, например, при определении модулей упругости твердого тела), или же можно ограничиваться относительными измерениями скорости звука при измерении каких-либо внешних параметров, например, в зависимости от температуры или магнитного поля или же в зависимости от наличия примесей и дефектов. Точность абсолютных измерений на лучшей аппаратуре составляет около 10-13 %, тогда как точность относительных измерений достигает порядка 10-15%.

Измерение скорости звука используют для определения многих свойств вещества, таких, как величина отношения теплоемкостей для газов, сжижаемости газов и жидкостей, модулей упругости твердых тел, дебаевской температуры и др. (см. молекулярная акустика). Измерение малых изменений скорости звука является чувствительным методом определения наличия примесей в газах и жидкостях. В твердых телах измерения скорости звука и ее зависимости от разных факторов позволяет исследовать строение вещества: зонную структуру полупроводников, строение поверхности Ферми в металлах и пр. Ряд контрольно-измерительных применений ультразвука в технике основан на измерениях скорости звука.

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

В данной работе используется импульсный метод измерения скорости звука, основанный на измерении времени прихода отраженного импульса от задней границы образца известной толщины. При этом скорость звука определяется как:

$$C = 2 \frac{d}{t}; \left(\frac{m}{c} \right),$$

где: d – толщина образца (мм);

t – время прихода донного импульса (мкс).

Для измерения времени прихода импульса используется глубиномер прибора, откалиброванный по эталону из стали СО-2 с временем прохождения сигнала 20 мкс.

1. Произвести настройку аппаратуры для получения донного импульса.
2. Произвести калибровку глубиномера в микросекундах по СО-2 с масштабом 5 мкс/дел.
3. Измерить время прихода t донного импульса от образца по шкале глубиномера в микросекундах. Скорость звука в материале определить как:

$$C = \frac{2d}{t}; \left(\frac{\text{мм}}{\text{мкс}} \right),$$

где: d – толщина измеряемого образца (мм);

t – показания глубиномера (мкс)

4. Перевести значение скорости в единицы (м/с).
5. Произвести по 10 измерений скорости звука для стали (C_{cm}), оргстекла ($C_{орг.ст}$) и алюминия (C_{Al}). Определить среднее значение скоростей и их среднеквадратические погрешности.
6. Сравнить полученные результаты с табличными значениями.
7. Оформить результаты измерений.

Сталь

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, (мкс)										
C()										

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i^{10} (C_i - \bar{C})^2}{10}} = \bar{C} =$$

Оргстекло

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, (мкс)										
C()										

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i^{10} (C_i - \bar{C})^2}{10}} = \bar{C} =$$

Дюралюминий

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, (мкс)	25,0	25,1	25,1	24,8	25,3	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
C()	6400	6374,50	6374,50	6451,61	6324,11	6400	6400	6400	6400	6400

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i^{10} (C_i - \bar{C})^2}{10}} = \bar{C} =$$

Выводы: