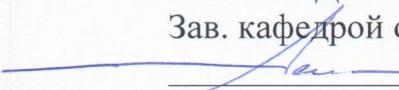


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

"19" 02 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-29

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ВИДЕ ПРОДОЛЬНЫХ И
ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу "Общая физика" по теме "Колебания и волны"
для студентов всех направлений и специальностей

Томск - 2016

УДК 53.01

Определение скорости звука, распространяющегося в виде продольных и поперечных волн в твердых телах. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2-29 по курсу "Общая физика" по теме "Колебания и волны" для студентов всех направлений и специальностей.

Составитель Пак В.В.

Рецензент В.В. Ларионов

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики *18.02* 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ А.М. Лидер.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ВИДЕ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Цель работы: 1. Определение скорости звука в случае продольных волн в полиакриловом теле по времени распространения ультразвукового сигнала с частотой 1 МГц.

2. Измерение передачи продольных и поперечных звуковых волн в твердых телах с помощью наклонной плоскопараллельной пластины.

3. Определение скорости звука в случае продольных и поперечных волн по критическому углу полного отражения.

4. Определение модуля упругости E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона твердого тела μ по двум значениям скорости.

Приборы и принадлежности: Ультразвуковой эхоскоп, ультразвуковые измерительные датчики-преобразователи с частотой 1 МГц, комплект оборудования для исследования продольных и поперечных волн, алюминиевый брусок для опытов со шкалой транспортира, набор из 3-х цилиндров, связующий гель для опытов с ультразвуком, ПК с операционной системой Microsoft Windows.

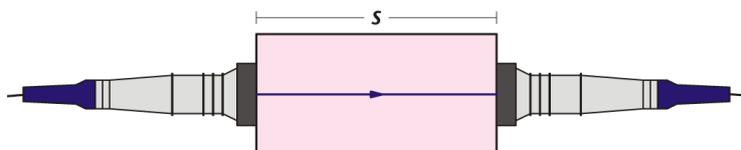


Рис.1. Экспериментальная установка для измерения времени прохождения ультразвуковым сигналом твердого тела длиной S .

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Иначе говоря, фазы колебаний частиц среды и источника тем больше отличаются друг от друга, чем больше это расстояние. При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (атомно-молекулярное) строение среды и среда рассматривается как **сплошная**, т. е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется **волновым процессом** (или **волной**). При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих

положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Среди разнообразных волн, встречающихся в природе и технике, выделяются следующие их типы: **волны на поверхности жидкости, упругие и электромагнитные волны**. Упругими (или механическими) волнами называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают **продольные** и **поперечные**. В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в поперечных — в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т.е. твердых, жидких и газообразных телах. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т.е. фактически только в твердых телах; в жидкостях и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные.

Упругая волна называется **гармонической**, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 2 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью v вдоль оси x (т.е. зависимость между смещением ξ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц, например, частицы B , до плоскости, в которой располагается источник колебаний O), для какого-то фиксированного момента времени t . Хотя приведенный график функции $\xi(x, t)$ похож на график гармонического колебания, тем не менее эти графики различны по существу. График волны дает зависимость смещения всех частиц среды от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний — зависимость смещения данной частицы от времени.

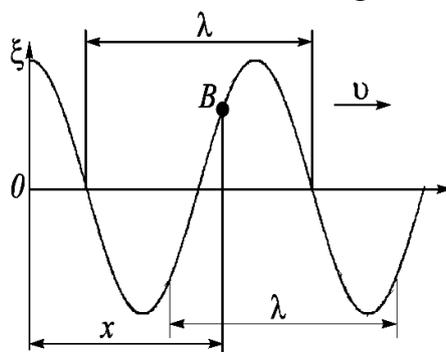


Рис. 2. Зависимость смещения частицы от времени

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны** λ (рис.2). Длина волны равна тому расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период T , т.е.

$$\lambda = \upsilon t,$$

или, учитывая, что $T = 1/\nu$, (где ν – частота колебаний), получим:

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}.$$

Если рассмотреть волновой процесс подробнее, то ясно, что колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси x , а колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме. Волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t , называется **волновым фронтом**. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью**. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени — один. Волновой фронт также является волновой поверхностью в данный момент времени. В принципе волновые поверхности могут быть любой формы, а в простейшем случае они представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер. Соответственно волна называется плоской или сферической.

Продольные и поперечные волны. Если частицы колеблются параллельно направлению распространения волны, то волна называется продольной. Если же они колеблются перпендикулярно направлению распространения, то волна называется поперечной. Звуковые волны в газах и жидкостях – продольные. В твердых же телах существуют волны обоих типов. Поперечная волна в твердом теле возможна благодаря его жесткости (сопротивлению к изменению формы). Самая существенная разница между этими двумя типами волн заключается в том, что поперечная волна обладает свойством поляризации (колебания происходят в определенной плоскости), а продольная - нет. В некоторых явлениях, таких, как отражение и прохождение звука через кристаллы, многое зависит от направления смещения частиц, так же как и в случае световых волн.

Скорость звуковых волн. Скорость звука – это характеристика среды, в которой распространяется волна. Она определяется двумя факторами: упругостью и плотностью материала.

В газах и жидкостях звук распространяется исключительно в виде продольных волн. В этом опыте звуковое давление колеблется вокруг равновесного значения и создает колеблющиеся области сжатия и разрежения. Звук также проникает в твердые тела в виде поперечных волн, в которых колеблется напряжение сдвига.

Поперечные волны способны распространяться в твердых телах, потому что твердые тела обладают необходимым сопротивлением сдвигу, требующимся для того, чтобы проводить звук.

Продольные и поперечные волны обладают разными скоростями, которые зависят от плотности ρ и модуля упругости твердого тела. Скорость продольных волн v_l , определяемая выражением

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, больше, чем скорость поперечных волн v_h

$$v_h = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига.

Связь между модулем упругости E , модулем сдвига G твердого тела и коэффициентом Пуассона определяется следующим равенством:

$$\frac{E}{G} = 2(1 + \mu). \quad (3)$$

Поэтому можно рассчитать все три величины, характеризующие упругость, зная две скорости звука v_l и v_h .

В этом опыте сначала измеряется время распространения t ультразвукового сигнала с частотой 1 МГц через три полиакриловых цилиндра различной длины S . Значения наносятся на график в системе координат $S-t$ (рис. 3). По наклону линии наилучшего соответствия измеренным значениям получаем скорость продольной волны звука в полиакриловом теле.

Затем резервуар наполняется водой и помещается на пути распространения волны. Измеряется время прохождения. Время прохождения уменьшается путем помещения на пути волны тонкой плоскопараллельной пластины из полиакрила или алюминия. Это происходит, потому что **в материале пластины звук**

распространяется быстрее, чем в воде. Снятие точных показаний осуществляется позади резервуара с водой при двух отчетливо различающихся ультразвуковых сигналах, что вызвано различными временами распространения продольных и поперечных звуковых волн в твердых телах (рис. 3).

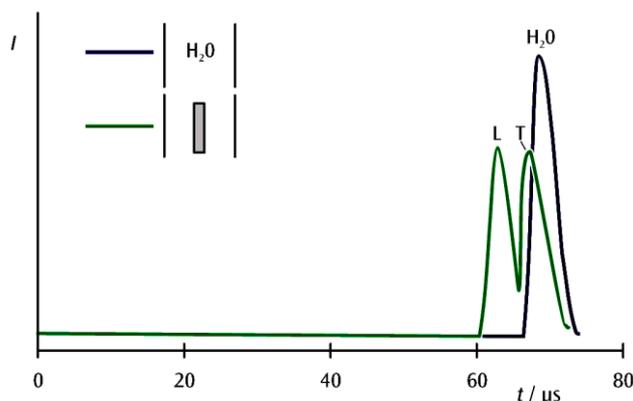


Рис. 3. Ультразвуковой сигнал после проникновения в водяной резервуар (синий: без плоскопараллельной пластины, зеленый: с плоскопараллельной пластиной)

Если пластину отклонить на угол α относительно падающей волны, то, согласно **закону Снеллиуса**, волна преломится, и мы получим две преломленные волны под углами β_l и β_h (рис. 4).

$$\frac{c}{\sin \alpha} = \frac{v_l}{\sin \beta_l} = \frac{v_h}{\sin \beta_h}, \quad (4)$$

где c – скорость звука в воде.

Поскольку две скорости звука, v_l и v_h , в твердом теле больше, чем скорость звука c в воде, мы можем в итоге наблюдать **явление полного отражения** – отдельно для продольных и поперечных волн – при котором передаваемый сигнал полностью исчезает. Соответствующие скорости можно измерить по критическим углам α_l для продольных волн и α_h для поперечных волн:

$$v_l = \frac{c}{\sin \alpha_l} \quad \text{и} \quad v_h = \frac{c}{\sin \alpha_h}. \quad (5)$$

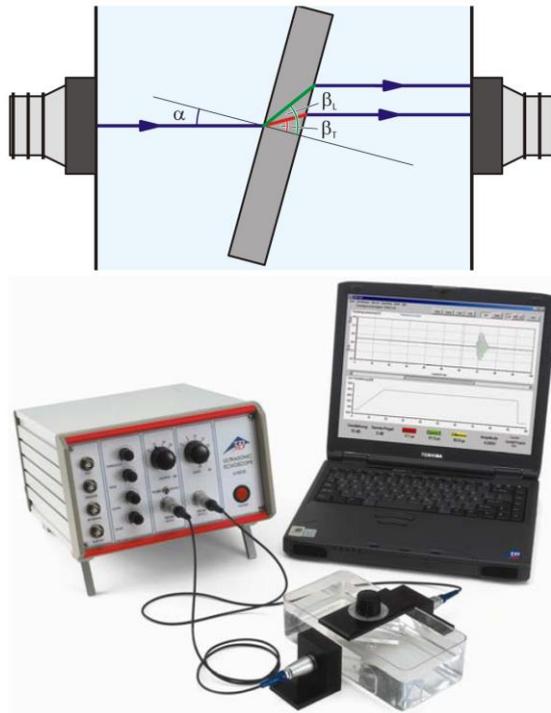


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения скорости звука в случае продольных и поперечных волн по критическим углам полного отражения.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Подключить ультразвуковой эхоскоп к ПК.
2. При необходимости установить на ПК программу обработки данных.
3. Установить два ультразвуковых датчика-преобразователя в соответствующие держатели.
4. Подключить первый преобразователь к выходу PROBE (TRANS) ультразвукового эхоскопа, а второй преобразователь – к выходу PROBE (REFLEC), что соответствует испускаемой и отраженной волне.
5. Установить переключатель режима в положение TRANS.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Включить ультразвуковой эхоскоп и запустить программу обработки данных.

а) Измерить время прохождения продольных волн:

1. Нанести на передние поверхности ультразвуковых датчиков-преобразователей слой связующего геля и плотно прижать

преобразователи к торцевым поверхностям длинного полиакрилового цилиндра.

2. На ультразвуковом эхоскопе установить регуляторы OUTPUT *dB* (выходной сигнал, дБ) и GAIN *dB* (коэффициент усиления, дБ), а также THRESHOLD (порог), WIDE (ширина) и SLOPE (наклон) в такие положения, чтобы получить максимальный уровень звукового сигнала, однако без перегрузки.
3. Измерить время прохождения t с момента начала подачи импульса преобразователем до момента начала приема импульса приемником и внести значение в таблицу 1.
4. Аналогичным образом измерить время прохождения сигнала в среднем и коротком полиакриловых цилиндрах и внести измеренные значения в таблицу 1.

б) Сравнить время прохождения продольных и поперечных волн:

1. Заменить полиакриловый цилиндр акустическим резервуаром и плотно прижать ультразвуковые преобразователи к двум длинным сторонам резервуара.
2. Заполнить резервуар водой.
3. На ультразвуковом эхоскопе установить регуляторы OUTPUT *dB* (выходной сигнал, дБ) и GAIN *dB* (коэффициент усиления, дБ), а также THRESHOLD (порог), WIDE (ширина) и SLOPE (наклон) в такие положения, чтобы получить максимальный уровень звукового сигнала, однако без перегрузки.
4. В окне программы эхоскопа при помощи курсора отметить момент начала регистрации импульса приемником.
5. Установить алюминиевую пластину с держателем образца перпендикулярно направлению распространения звука и пронаблюдать за разделением и сдвигом сигнала, по которому определяется время прохождения.
6. Повернуть алюминиевую пластину и определить угол поворота α_1 , при котором исчезает сигнал продольной волны (слева).
7. Продолжать поворачивать алюминиевую пластину и определить угол поворота α_2 , при котором исчезает сигнал поперечной волны (справа).
8. Заменить алюминиевую пластину с держателем образца полиакриловой пластиной с держателем образца, которую установить перпендикулярно направлению распространения звука.

9. Повернуть полиакриловую пластину и определить угол поворота α_l , при котором исчезает сигнал продольной волны (слева).
10. Продолжать поворачивать полиакриловую пластину и определить угол поворота α_h , при котором исчезает сигнал поперечной волны (справа).

ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

а) Измерение времени прохождения t в полиакриловых цилиндрах длиной S :

Таблица 1

S , мм	t , мкс
40	
80	
120	

Постройте график зависимости $S = f(t)$, рис. 5.

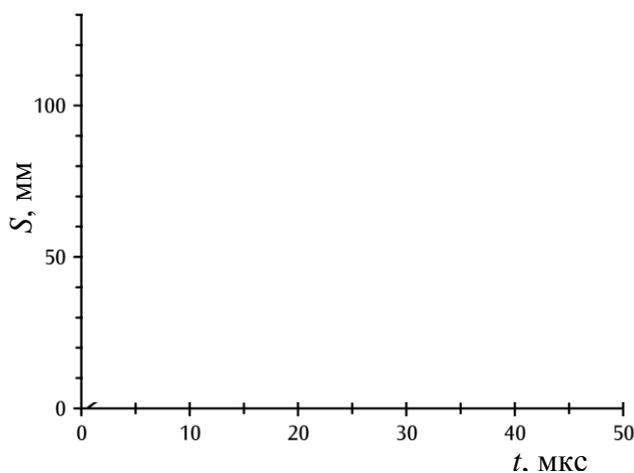


Рис. 5: График S - t ультразвукового сигнала в полиакриловом теле

По углу наклона прямой рассчитайте скорость звука в случае продольных волн.

$$v_l = \underline{\hspace{2cm}}$$

б) Сравнение времени прохождения продольных и поперечных волн:

Таблица 2.

Критические углы α_l и α_h , при которых происходит полное отражение продольных и поперечных звуковых волн

	Полиакрил	Алюминий
α_l		
$\sin \alpha_l$		
v_l , м/с		
α_h		
$\sin \alpha_h$		
v_h , м/с		
μ		
G , МПа		
E , МПа		
ρ , г/см ³	1.2	2.7

В таблице 2 скорости распространения продольных и поперечных звуковых волн в полиакриле и алюминии рассчитываются по критическим углам полного отражения с использованием уравнения (5)

$$v_l = \frac{c}{\sin \alpha_l} \quad \text{и} \quad v_h = \frac{c}{\sin \alpha_h} \quad .$$

Для расчетов скорости подставьте в уравнение(5) значение **скорости звука c** в воде равное:

$$c = 1485 \text{ м/с.}$$

Из уравнений 1 - 3 получаем характеристическое уравнение для коэффициента Пуассона μ

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{v_l}{v_h} \right)^2 - 1}{\left(\frac{v_l}{v_h} \right)^2 - 1} .$$

Рассчитайте его значение и запишите в таблицу 2.

При известных значениях плотности ρ рассчитайте постоянные упругости, используя формулы (1), (2), (3)

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad v_h = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad \frac{E}{G} = 2(1+\mu).$$

Результаты занесите в таблицу 2.

Сделайте выводы по работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.

Скорость звука в газах (0 °С; 101325 Па), м/с

Газ	Скорость звука, м/с	Газ	Скорость звука, м/с
Азот	334	Кислород	316
Аммиак	415	Метан	430
Ацетилен	327	Окись углерода	338
Водород	1284	Углекислый газ	259
Воздух	331,46	Хлор	206
Гелий	965	-	-

Таблица 2.

Скорость звука в жидкостях, м/с

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	Скорость звука, м/с	Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	Скорость звука, м/с
Бензин	17	1166	Нефть	15	1330
Вода:			Раствор (5%) поваренной соли	15	1540
- обычная	25	1497	Ртуть	20	1451
- морская	20	1490	Спирт этиловый	20	1180
- тяжёлая	25	1399	Толуол	20	1382
Глицерин	20	1923	Эфир этиловый	20	1008
Керосин	20	1330	-	-	-
Кислород жидкий	-210	1130	-	-	-

Таблица 3.

Скорость звука в твёрдых веществах (при 20 °С), м/с

Вещество	Скорость звука, м/с	Вещество	Скорость звука, м/с
Алюминий	6260	Мрамор	6100
Дюралюминий	6400	Никель	4780
Бетон (в среднем)	4500	Олово	3320
Бумага натянутая	2100	Пробка	430-530
Вольфрам	5460	Ртуть (при -40 °С)	2670
Гранит	3850	Свинец	2160
Дерево:	около 3000 до 5000	Серебро	3620
- мягких пород - твёрдых пород		Сталь:	около 5000 до 6000
Железо	5850	- мягкая - твёрдая	
Каменная соль	4400	Стекло:	4450
Кирпич	3600	- флинт	
Латунь	4280-4700	- крон	5220
Лёд (при -4 °С)	3980	- органическое	2550
Магний	4600	Эбонит	2400
Медь	4700	-	-

Таблица 4.

Температурный коэффициент скорости звука в газах, м/с

Газ	м/с	Газ	м/с
Азот	0,6	Кислород	0,56
Аммиак	0,7	Окись углерода	0,6
Воздух	0,59	Углекислый газ	0,4
Гелий	0,8	-	-

Таблица 5.

Температурный коэффициент скорости звука в жидкостях, м/с

Жидкость	м/с	Жидкость	м/с
Вода:	2,5 2,8	Раствор соли (5%-ный)	2,9
- обычная		Ртуть	-0,5
- тяжёлая		Спирт этиловый	-3,6
Глицерин	-1,8	Эфир этиловый	-5,4
Кислород жидкий (при 210 °С)	-8,3	-	-

Примечание. Температурный коэффициент скорости звука показывает, на сколько метров в секунду увеличивается скорость звука в веществе при повышении его температуры на 1 °С.

Знак минус показывает, что данная жидкость имеет отрицательный температурный коэффициент скорости. Это значит, что при увеличении температуры скорость звука в жидкости уменьшается. Исключение – вода, при повышении температуры от 0 до 74 °С скорость звука в ней увеличивается. Наибольшая скорость звука в воде при 74 °С равна 1555,5 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюрин Ю.И. Физика. Ч. 3, Оптика. Квантовая физика: Учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005.–740 с.
2. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. Учебник. 4-е изд., испр.–М.: В.Ш., 2002.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – Рипол Классик, 2005.
4. Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Наука, 1987.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение волны.
2. Какая волна называется гармонической?
3. Что называется длиной волны?
4. Что такое волновой фронт?
5. Дайте определение волновой поверхности.
6. Какую волну называют плоской? Сферической?
7. Какие волны распространяются в газах и в жидкостях? Почему?
8. Какие колебания называются акустическими?
9. Дайте определение продольных и поперечных волн.
10. Как распространяются продольные и поперечные волны в разных средах (в жидкостях, в твердых телах)?
11. Какие факторы определяют скорость звука в среде?
12. Чем определяется громкость звука и его высота?
13. В чем проявляется явление полного отражения?
14. Как ведет себя звуковая волна на границе раздела двух сред?
15. Сформулируйте закон Снеллиуса.
16. Что такое модуль упругости?
17. Что характеризует коэффициент Пуассона?
18. В чем заключается явление рефракции звука?
19. Влияет ли температура на распространение звуковых волн?
20. Запишите формулу для вычисления скорости звука в среде.
21. Запишите формулу для определения скорости продольных волн.
Дайте пояснения.

22. Представьте в виде схемы экспериментальную установку для определения скорости звука в случае продольных и поперечных волн по критическим углам полного отражения.
23. Запишите уравнение плоской бегущей волны. Какими параметрами характеризуется волна? Нарисуйте графики зависимости $\xi = f(x)$ при $t = \text{const}$ и $\xi = f(t)$ при $x = \text{const}$.
24. Запишите уравнение стоячей волны. Нарисуйте графики зависимости $\xi = f(x)$ при $t = \text{const}$ и $\xi = f(t)$ при $x = \text{const}$.
25. В чем заключается явление интерференции волн? Как амплитуда результирующей волны зависит от разности хода интерферирующих волн?

ГЛОССАРИЙ

1. **Бегущими волнами** называются волны, которые переносят в пространстве энергию.
2. **Внутреннее отражение** — явление отражения электромагнитных или звуковых волн от границы раздела двух сред при условии, что волна падает из среды, где скорость ее распространения меньше (в случае световых лучей это соответствует большему показателю преломления).
3. **Высота звука** — свойство звука, определяемое человеком на слух и зависящее в основном от его частоты, т. е. от числа колебаний среды (обычно воздуха) в секунду, которые воздействуют на барабанную перепонку. С увеличением частоты колебаний растёт высота звука. Звук, обладающий определённой высотой, в музыке называется тоном.
4. **Громкость звука** — субъективное восприятие силы звука (абсолютная величина слухового ощущения). Громкость главным образом зависит от звукового давления и частоты звуковых колебаний. Единицей абсолютной шкалы громкости является сон. Громкость в 1 сон — это громкость непрерывного чистого синусоидального тона частотой 1 кГц, создающего звуковое давление 2 мПа.
5. **Длина волны** — расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах.
6. **Волновая поверхность** — геометрическое место точек, испытывающих возмущение обобщенной координаты в одинаковой фазе. Если источником волны является точка, то волновые поверхности в однородном и изотропном пространстве представляют собой концентрические сферы.

7. **Волновой фронт** — это поверхность, до которой дошли колебания к данному моменту времени.
8. **Закон Снеллиуса** (также Снелля или Снелла) описывает преломление света на границе двух прозрачных сред. Также применим и для описания преломления волн другой природы, например звуковых. Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Здесь: n_1 — показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела; θ_1 — угол падения света — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности; n_2 — показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела; θ_2 — угол преломления света — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.
9. **Звуковые волны** — это возмущения, распространяющиеся в материальной среде, и связанные с колебаниями частиц этой среды. Звуковые волны охватывают диапазон частот от 10—20 Гц (низкие звуки — басы) до 20 кГц (высокие звуки) и распространяются в воздухе со скоростью около 340 м/с.
10. **Коэффициент Пуассона** — абсолютная величина отношения поперечной и продольной относительной деформации образца материала. Этот коэффициент зависит не от размеров тела, а от природы материала, из которого изготовлен образец. Коэффициент Пуассона показывает, во сколько раз поперечная деформация деформируемого тела больше продольной деформации, при его растяжении или сжатии.
11. **Модуль упругости** — физическая величина, характеризующая способность твёрдого тела (материала, вещества) упруго деформироваться при приложении к нему силы.
12. **Модулем сдвига** называется отношение касательного напряжения к сдвиговой деформации.
13. **Плоская волна** — волна постоянной частоты, волновые фронты которой являются бесконечными плоскостями, нормальными к вектору фазовой скорости. Такие волны в реальности не существуют, так как плоская волна начинается в точке $-\infty$ и заканчивается в точке $+\infty$, чего, очевидно, быть не может. Тем не менее, конечная плоская волна существует и называется «квазиплоской». Если квазиплоская волна обладает достаточной длиной, то её приближённо можно считать плоской (под длиной здесь подразумевается протяжённость волны, длина же волны λ

здесь будет называться «пространственным периодом колебаний»).

14. **Поперечная волна** – волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой происходят колебания частиц среды (в случае упругой волны) или в которой лежат векторы электрического и магнитного поля (для электромагнитной волны).
15. **Продольными волнами** называются волны, в которых колебания совершаются вдоль направления распространения.
16. **Рефракция звука** – изменение направления звуковых колебаний из-за неоднородности среды.
17. **Сферическая волна** — волна, радиально расходящаяся от источника. Её волновой фронт представляет собой сферу. Простейшим примером почти сферической волны является световая волна, испускаемая лампочкой.