

МРНТИ 29.03.47

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЛАДШИХ КУРСОВ

Н.А. Сандибаева¹, В.В. Пак²

¹ к.п.н., и.о.ассоциированного профессора

² доцент кафедры общей и экспериментальной физики

¹Казахский национальный женский педагогический университет,

Алматы, Казахстан, nazirasandibaeva@gmail.com

² Томский государственный университет, Томск, Россия

В статье приведен пример опыта определения скорости звука в твердых телах. Для этого 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 $S-t$.

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.

Ключевые слова: тело, скорость звука, график, ультразвуковой эхоскоп

Образовательный процесс в современном университете направлен на формирование ряда компетенций, необходимых выпускникам в будущей профессиональной деятельности. К таким компетенциям относятся общекультурные и профессиональные компетенции. Согласно А.В. Хуторскому [1], формируемые компетенции могут быть представлены достаточно широким спектром знаний и умений. Разработка лабораторной работы по определению скорости звука в твердых телах способствует развитию многих из них. В ходе лабораторной работы студенты могут осуществлять автономное научное исследование, используя образцы разной природы. Такое исследование позволяет последовательно отработать каждый из этапов от постановки целей и формирования гипотезы исследования до выводов и анализа полученных результатов. К лабораторной работе были созданы методические указания, включающие в себя описание установки, краткое теоретическое обоснование и поэтапный алгоритм действий. Ниже приведена часть методических указаний [2].

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 [3].

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.

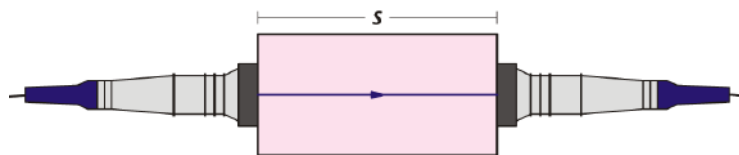


Рис.1. Экспериментальная установка для измерения времени прохождения ультразвуковым сигналом твердого тела длиной S .

Краткая теория. Любая исследуемая система может быть описана некоторой физической величиной, чье отклонение от равновесного значения зависит от координат и времени. В случае механических систем такой физической величиной является масса. Процесс колебаний является следствием таких свойств физической системы, как возвращающая сила и инерция. Возвращающая сила стремится вернуть движущийся элемент в положение равновесия, в результате чего он приобретает некоторую скорость. Инерция системы противодействует любому изменению скорости [4].

Если колебания начинаются при положительном смещении и скорости равной нулю, то возвращающая сила создает ускорение, которое вызывает появление скорости, обратной по знаку смещению. Эта скорость достигает максимума к моменту возвращения в положение равновесия. При этом возвращающая сила станет равной нулю, а наличие отрицательной скорости вызовет увеличение смещения в обратном направлении. Возвращающая сила при этом вынуждена преодолевать инерцию, обусловленную обратным направлением скорости. Наконец, скорость становится равной нулю, а смещение – максимальным в обратном направлении, и процесс повторится в обратной последовательности. Такой повторяющийся процесс называют колебательным процессом. А процесс распространения колебаний в пространстве – волновым.

Волны, образованные внешним воздействием, приложенным к открытой среде (не имеющей внешних границ), называются бегущими волнами. Одним их важных свойств таких волн является их способность переносить энергию и импульс. При распространении волны в двухмерной или трехмерной среде амплитуда движения будет тем меньше, чем дальше от источника находится движущийся элемент. Опыт показывает, что бегущие волны распространяются с постоянной скоростью, пока свойства среды остаются постоянными. В зависимости от вида распространения волны различают 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 [5]. 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).

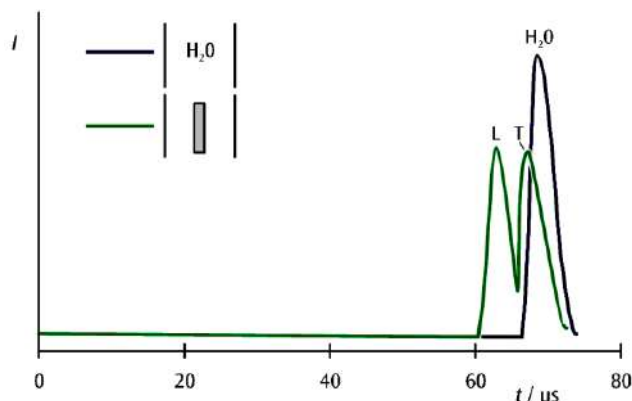


Рис. 3. Ультразвуковой сигнал после проникновения в водяной резервуар (синий: без плоскопараллельной пластины, зеленый: с плоскопараллельной пластиной)

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:

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

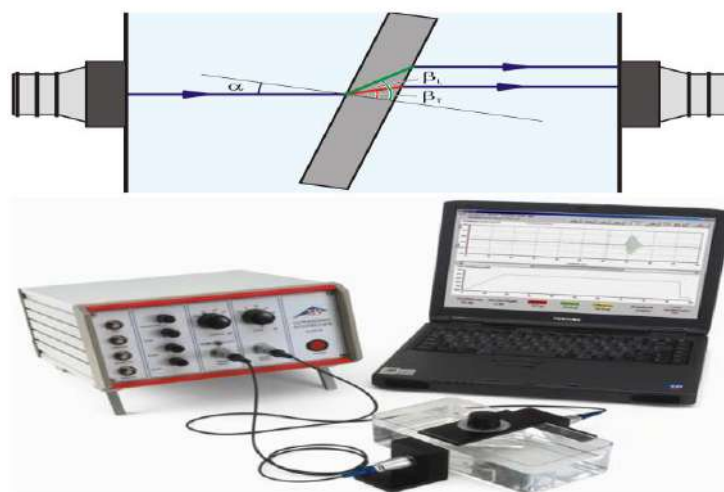


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения скорости звука в случае продольных и поперечных волн по критическим углам полного отражения.

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 [6]:
 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 наблюдать за разделением и сдвигом сигнала, по которому определяется время прохождения.

6. Повернуть алюминиевую пластину и определить угол поворота α_l , при котором исчезает сигнал продольной волны (слева).

7. Продолжать поворачивать алюминиевую пластину и определить угол поворота α_h , 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. Измерение времени прохождения t

S , мм	t , мкс
40	
80	
120	

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

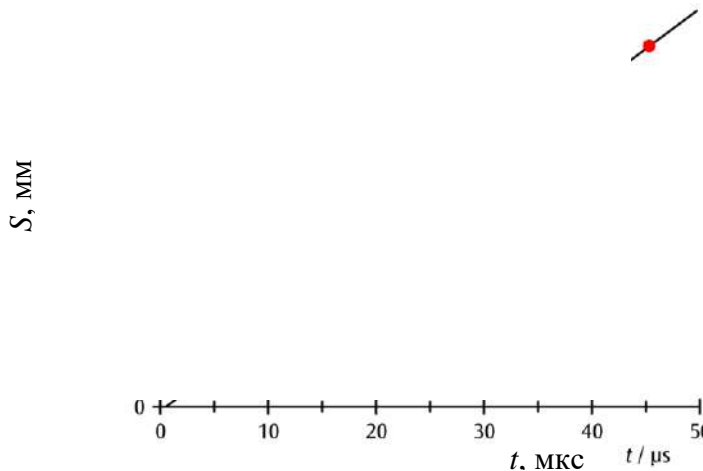


Рис. 5: График $S-t$ ультразвукового сигнала в полиакриловом теле

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		
$\sin \alpha_l$		
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)

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

Для расчетов скорости подставьте в уравнение(5) значение скорости звука c в воде равное:
 $c = 1485$ 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.

Список литературы

1. Etkina E. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers // Physical Review Special Topics Physics Education Research. V.6, 20110-1-020110-26, 2010.
2. Pak V.V. The development of engineering students' innovative thinking by the means of project activities / Pak V.V., Melnikova T.N., Fedin S., Zdanovich S.A. // // Международный научно-исследовательский журнал : научный журнал. — 2014. — № 11 (30). — с. 34-35.

3. Сурувикина С. А. Теория деятельностного развития естественнонаучного мышления учащихся в процессе обучения физике: теоретический аспект: монография / С. А. Сурувикина. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2005. – 260 с.
4. Тулькибаева Н. Н. Теория и практика обучения решению задач: монография. – Челябинск: изд-во ЧГПУ. – 2000. – 239 с.
5. Тютюрев В.Г. Развитие навыков научного исследования в рамках курса общей физики / В.Г. Тютюрев // Вестн. Томского гос. пед. ун-та (Tomsk State Pedagogical University Bulletin). – 2011. – вып.13 (115). – С. 214–217.
6. Хуторской, А. В. Практикум по дидактике и методике обучения / А. В. Хуторской. – СПб.: Питер, 2004. – 541 с.

ЖОО ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУДА ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕРДЕГІ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫН АНЫҚТАУДЫ ҚОЛДАНУ

Н.А. Сандибаева¹, В.В. Пак²

¹ п.ғ.к., физика кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а.,

² Жалпы және эксперименттік физика кафедрасының доценті

¹ Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
email: nazirasandibaeva@gmail.com

² Томск мемлекеттік университеті Томск, Ресей

Мақалада қатты денелердегі дыбыс жылдамдығын анықтау тәжірибесі көрсетілген. Жиілігі 1 МГц ультрадыбыстық сигналдың әртүрлі S ұзындықтағы полиакрил цилиндр арқылы тарау t уақыты есептеледі. Алынған мәндер $S-t$ координатына графикке енгізіледі.

Өту уақыты азая түседі. Ол пластина материалында дыбыс таралуы судағы дыбыс таралуымен ерекшеленетінін көруге болады.

Түйін сөздер: дене, дыбыс жылдамдығы, график, ультрадыбыстық эхоскоп

APPLICATION OF SOUND VELOCITY DETERMINATION IN SOLIDS FOR TEACHING PHYSICS IN UNIVERSITIES

N.A. Sandibaeva¹, V.V. Pak²

¹ Cand.Sci. (Pedagogy), acting associate Professor

² Associate Professor of General and experimental physics

¹ Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

² Tomsk State University, Tomsk, Russia email: nazirasandibaeva@gmail.com

The article gives an example of the experience of determining the speed of sound in solids. To do this, the propagation time t of the ultrasonic signal with a frequency of 1 MHz is first measured through three polyacrylic cylinders of different lengths S . The values are plotted in the coordinate system $S-t$. The travel time is reduced by placing a thin plane-parallel plate of polyacrylic or aluminum in the path of the wave. This is because sound travels faster in the plate material than in water.

Keywords: body, sound velocity, graph, ultrasonic echoscope

Статья поступила в редакцию 29.11.2019