

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Ленинградский ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
электротехнический институт имени В.И.Ульянова (Ленина)

Методические указания
к лабораторным работам по дисциплине
"КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ"

Ленинград
1986

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

I. I. Цель работы

Ознакомиться с методикой определения параметров механической колебательной системы с одной степенью свободы.

I. 2. Методика исследований и описание измерительной установки

Механическая колебательная система с одной степенью свободы характеризуется тремя параметрами: массой m , гибкостью C_m и активным механическим сопротивлением γ . Последнее называют также сопротивлением трения.

При воздействии на систему внешней механической силы, изменяющейся по гармоническому закону с круговой частотой ω , система совершает вынужденные колебания с той же частотой, причем амплитуда вынужденных колебаний определяется соотношениями

$$\dot{x}_m = F_m / |z_m|; \quad z_m = j(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}) + \gamma, \quad (I. I)$$

где $\dot{x}_m$ - амплитуда колебательной скорости; F_m - амплитуда внешней силы; z_m - модуль полного механического сопротивления системы. При изменении частоты внешней возбуждающей силы амплитуда колебаний изменяется и достигает максимального значения, равного F_m / γ , на частоте $\omega = \omega_0$, называемой собственной частотой колебаний системы:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_m}} \quad (I. 2)$$

Как следует из выражений (I. I), графическая зависимость амплитуды колебаний от частоты внешней силы (при ее неизменной амплитуде) изображается резонансной кривой, показанной на рис. I. I.

Ширина $2\Delta f = f_2 - f_1$ резонансной кривой на уровне, лежащем на 3 дБ ниже ее максимального значения, зависит от механической добротности Q колебательной системы и связана с ней соотношениями

$$Q \nu_{1,2} = 1; \quad \nu_1 = \frac{f_0}{f_1} - \frac{f_1}{f_0}; \quad \nu_2 = \frac{f_2}{f_0} - \frac{f_0}{f_2} \quad (I.3)$$

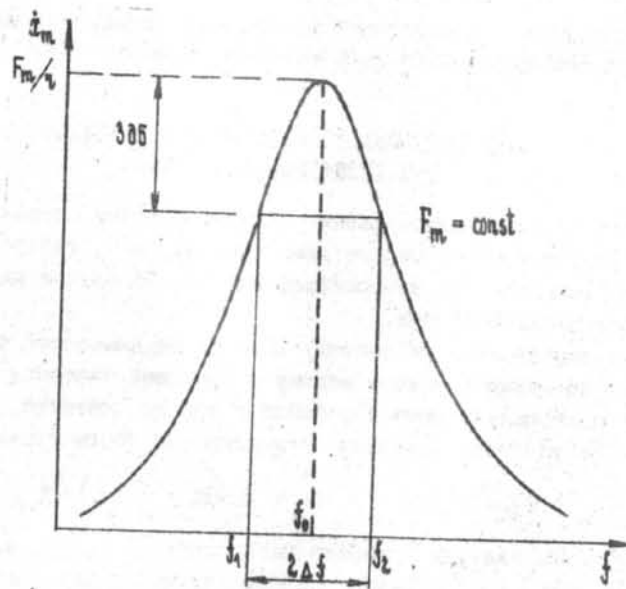


Рис. I. I

При высоких значениях добротности ($Q \geq 5$) соотношения (I.3) приобретают более простой вид:

$$\nu_1 \approx \nu_2 \approx \frac{2\Delta f}{f_0}; \quad Q \approx \frac{f_0}{2\Delta f} \quad (I.4)$$

Численное значение механической добротности системы определяется ее параметрами в соответствии с формулами

$$Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma} = \frac{1}{\omega_0 C_M \gamma} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{m}{C_M}} \quad (I.5)$$

Методика экспериментального определения параметров m , C_M и γ исследуемой колебательной системы опирается на представленные

выше соотношения (I.2) - (I.5). В процессе эксперимента необходимо измерить значения частот f_0 , f_1 и f_2 (см. рис. I. I), что позволит рассчитать добротность Q по формулам (I.3) или (I.4). Однако, этого еще недостаточно для расчета остальных параметров. Полностью задача может быть решена, если нагрузить систему известной дополнительной массой m' и выполнить аналогичные измерения для нагруженной системы. Поскольку для системы с присоединенной массой m собственная частота

$$f_{0n} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(m+m')C_M}} \quad (I.6)$$

из выражений (I.2) и (I.6) нетрудно определить массу m системы:

$$m = m' / \left(\frac{f_0^2}{f_{0n}^2} - 1 \right) \quad (I.7)$$

Затем можно рассчитать параметры C_M и γ , используя соотношения (I.2) и (I.5).

Исследуемая в данной работе механическая колебательная система выполнена на базе генератора механических колебаний ГМК-I (рис. I.2). Система состоит из поршня I, дающего основной вклад в массу системы, и плоской пружины 2, характеризующейся некоторой гибкостью C_M . Активное сопротивление γ в системе обусловлено, главным образом, вязким трением при движении поршня в полом цилиндре 3 с малым зазором между ними. В ходе эксперимента к поршню могут присоединяться дополнительные грузики с различной массой m' .

Колебания в системе возбуждаются электродинамическим преобразователем, состоящим из цилиндрической катушки 4, жестко присоединенной к поршню, и магнитной системы, включающей в себя постоянный магнит 5, kern 6 и фланцы 7, 8. Катушка расположена в кольцевом воздушном зазоре между kernом и верхним фланцем и может вместе с поршнем легко перемещаться в направлении оси системы. Колебания возбуждаются силой Ампера, действующей на катушку при протекании по ней электрического тока:

$$F_m = B l I_m \quad (I.8)$$

где B - магнитная индукция в кольцевом зазоре магнитной системы;

l - длина провода катушки,

I_m - амплитуда тока в катушке.

Измерение частот f_0 , f_1 и f_2 осуществляется с помощью дифференциальной схемы, изображенной на рис. I.3. Схема содержит

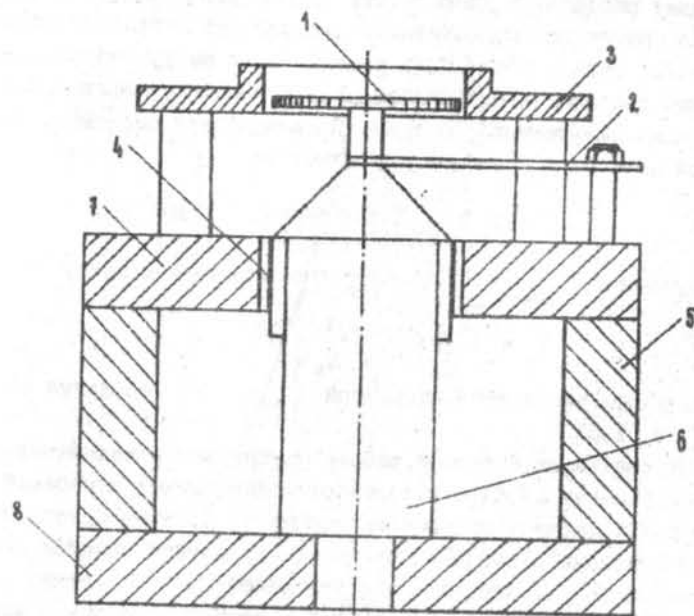


Рис. I.2

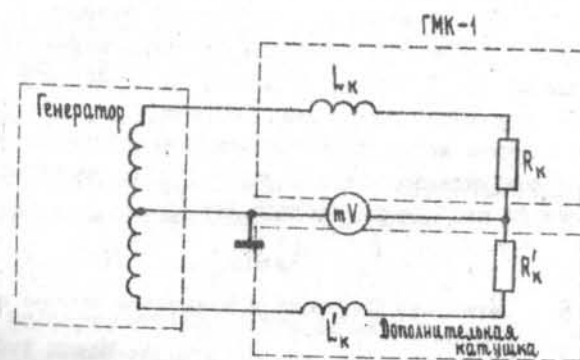


Рис. I.3

- 6 -

генератор, вырабатывающий электрическое напряжение синусоидальной формы, катушку генератора механических колебаний ГМК-I с параметрами L_K , R_K , дополнительную неподвижную катушку с параметрами $L'_K = L_K$ и $R'_K = R_K$, а также милливольтметр. К выходу генератора подсоединен частотомер (на рис. I.3 не показан).

В отсутствие колебаний в силу полной симметрии дифференциальной схемы электрическое напряжение на входе милливольтметра равно нулю при любом напряжении генератора.

При колебаниях катушки ГМК-I (вместе с поршнем) в ней возникает ЭДС индукции с амплитудой

$$U = B l \dot{x}_m \quad (I.9)$$

Эта ЭДС регистрируется милливольтметром и служит мерой амплитуды колебаний исследуемой системы.

Подставляя в формулу (I.9) выражения (I.1) и (I.8), находим

$$U = \frac{(B l)^2}{|Z_m|} I_m \quad (I.10)$$

Амплитуда тока I_m в установке поддерживается постоянной при изменении частоты за счет большого внутреннего сопротивления генератора. Поэтому в соответствии с выражением (I.10) кривая зависимости напряжения U от частоты повторяет резонансную кривую, изображенную на рис. I.1 и описываемую формулой (I.1). Таким образом, изменяя частоту генератора и наблюдая за показаниями милливольтметра, можно определить интересующие нас частоты f_0 , f_1 и f_2 .

I.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы, рекомендованную литературу и используемую в работе аппаратуру.
2. Собрать схему для определения параметров исследуемой механической колебательной системы.
3. Установить ручку регулятора выходного напряжения генератора в положение, соответствующее минимальному напряжению, а переключатель выходного сопротивления - в положение "600 Ом".

Включить приборы и дать им прогреться в течение 10-15 мин.

4. Установить выходное напряжение генератора равным ~ 5 В.
5. Измерить значения частот f_0 , f_1 , f_2 (для исследуемой системы они лежат в области десятков герц).
6. Уменьшить выходное напряжение генератора до минимума и присоединить к порту исследуемой системы дополнительный грузик известной массы m' (по указанию преподавателя).
7. Повторить процедуру измерения в соответствии с пп.4-5.

8. Для каждого грузика m' рассчитать значения добротности $Q_1 = 1/\gamma_1$ и $Q_2 = 1/\gamma_2$ и вычислить среднее значение $Q = (Q_1 + Q_2)/2$. Затем определить параметры системы m , C_m и γ .

9. Выполнить анализ погрешностей измерений и расчетов. Оценить погрешность определения величин m , C_m и γ .

I.4. Обработка данных и требования к отчету

Результаты измерений и расчетов следует представить в виде таблицы.

m' , кг	f_0 , Гц	f_1 , Гц	f_2 , Гц	γ_1	γ_2	Q_1	Q_2	Q	$m \pm \Delta m$, кг	$C_m \pm \Delta C_m$, м/Н	$\gamma \pm \Delta \gamma$, кг/с

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание конструкции исследуемой колебательной системы и измерительной схемы.
2. Расчетные формулы и примеры численных расчетов.
3. Анализ погрешностей измерений и вычислений, оценки погрешностей определения параметров исследуемой колебательной системы.
4. Таблицу с результатами наблюдений и вычислений.

I.5. Контрольные вопросы

1. Почему для определения параметров исследуемой системы нужны измерения с дополнительным грузиком m' ?
2. Какие параметры системы определяют частоту ее собственных колебаний?
3. Какую зависимость отображает резонансная кривая?
4. Каким способом приводится в колебания исследуемая система?

Список литературы

Лепендин Л.Ф. Акустика. - М.: Высш. школа, 1978.

Лабораторная работа № 2

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

2.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы ультразвукового интерферометра и получить навыки измерения скорости распространения ультразвука в жидкости интерферометрическим методом.

2.2. Описание измерительной установки

Среди известных методов измерения скорости распространения ультразвука в жидкостях и газах одним из наиболее точных является интерферометрический. В ультразвуковых интерферометрах используется явление образования в исследуемом объеме жидкости (газа) стоячих волн в результате наложения двух ультразвуковых волн с одинаковыми амплитудами, распространяющихся в противоположных направлениях. Полученное пространственное распределение амплитудных характеристик акустического поля (звукового давления, колебательной скорости частиц и др.) оказывается периодическим, причем период равен половине длины волны ультразвука в исследуемом веществе. Измерив расстояние l между соседними экстремаль-

ными точками (пучностями либо узлами) стоячей волны, можно определить значение скорости распространения ультразвуковых колебаний с помощью формулы

$$c = \lambda f, \quad (2.1)$$

где f - частота ультразвуковых колебаний.

Для повышения точности измерений используют несколько периодов. Формула (2.1) при этом принимает вид

$$c = 2 \frac{L}{n} f,$$

где L - расстояние между соответствующими экстремумами первого и последнего периодов; n - число периодов.

Простейший интерферометр для газов и жидкостей представляет собой цилиндрический сосуд, в дно которого встроен плоский излучатель ультразвуковых колебаний, а на другом конце сосуда расположен перемещаемый плоский отражатель, выполненный из акустически жесткого материала. Поверхности излучателя и отражателя должны быть плоскими и параллельными, чтобы обеспечить эффективное образование стоячих волн в пространстве между ними (в рабочем объеме интерферометра). По мере передвижения отражателя, что осуществляется с помощью микрометрического винта, изменяется входное акустическое сопротивление рабочего объема, являющееся акустической нагрузкой для излучателя, и, следовательно, входное электрическое сопротивление излучателя. Оно достигает максимума, если расстояние между излучателем и отражателем равно целому числу полуволи, и становится максимальным, когда это расстояние равно нечетному числу четвертей длин волн. Эти изменения могут быть зафиксированы электрическим путем, например по изменению высокочастотного напряжения на излучателе, если он питается от источника высокой частоты с большим внутренним сопротивлением. В этом случае зависимость напряжения U на излучателе от расстояния L между излучателем и отражателем должна иметь вид, показанный на рис.2.1. Максимумы и минимумы на этой зависимости повторяются через половину длины волны.

Зависимость, изображенная на рис. 2.1, является идеализированной. В действительности при практических изменениях наблюдается более сложная зависимость, отличающаяся от идеальной наличием сателлитов - дополнительных экстремумов. Пример такой зависимости показан на рис.2.2, где сателлиты располагаются по одну

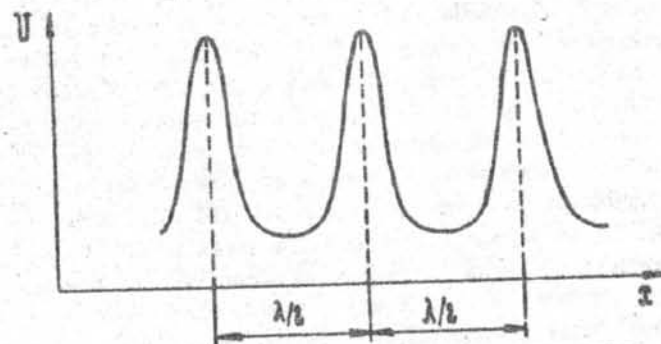


Рис.2.1

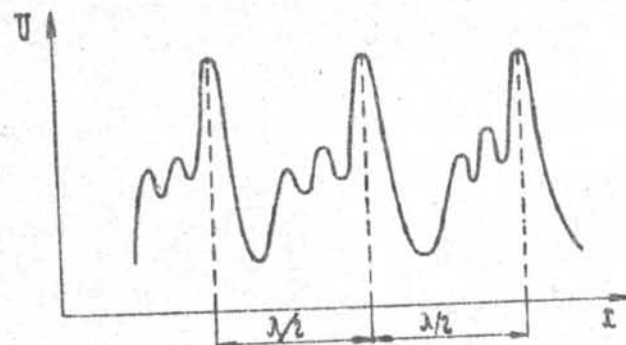


Рис.2.2

сторону от главных максимумов кривой. В других случаях сателлиты могут располагаться иначе, в частности могут накладываться на главные максимумы или минимумы. Ясно, что наличие сателлитов затрудняет нахождение положений главных максимумов и может привести к значительным ошибкам при определении расстояния между ними, а следовательно, и при определении скорости распространения ультразвука. Поэтому перед началом измерений целесообразно подробно измерить указанную зависимость и выбрать для дальнейших отсчетов экстремумы, четко выделяющиеся на фоне сателлитов.

Основными причинами появления сателлитов является непараллельность поверхностей отражателя и излучателя, неоднородность акустического поля в пространстве между ними, связанная с конечными размерами излучателя и отражателя, наличие пузырьков воздуха или других неоднородностей в исследуемой жидкости.

Ультразвуковые интерферометры позволяют измерять скорость распространения ультразвука с малой погрешностью, равной 0,05–0,01%. Однако для получения столь точных результатов необходимо осуществлять термостатирование рабочей камеры интерферометра, чтобы обеспечить постоянство и однородность температуры исследуемой жидкости.

Функциональная схема используемого в работе интерферометра изображена на рис.2.3. Колебания высокой частоты с выхода генера-

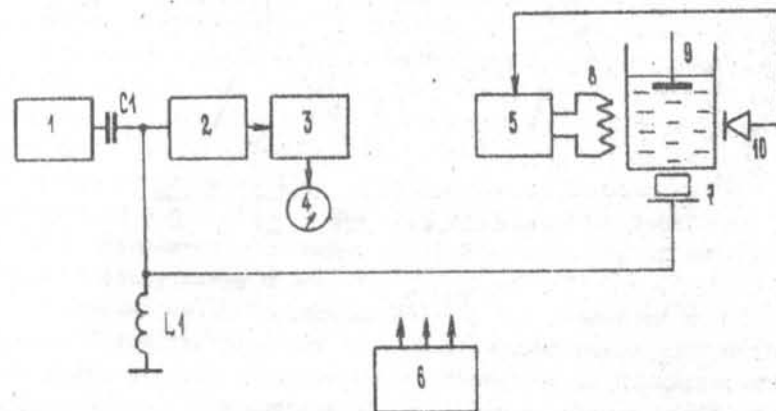


Рис.2.3

- 12 -

тора 1 через конденсатор C_1 подаются на колебательный контур, состоящий из индуктивности L_1 и излучателя 7, установленного на дне интерферометрической камеры. Для обеспечения большого выходного сопротивления источника электрического напряжения емкостное сопротивление $1/\omega C_1$ должно быть много больше входного сопротивления контура. Изменение входного электрического сопротивления излучателя при перемещении отражателя 9 вызывает изменение напряжения высокой частоты на контуре. Максимумы и минимумы этого напряжения при перемещении отражателя повторяются через $\lambda/2$. Напряжение детектируется детектором 2 и подается на усилитель 3, к выходу которого подключен стрелочный индикатор 4. По показаниям стрелочного индикатора можно следить за изменением высокочастотного напряжения на контуре.

При помощи электрического термостата можно поддерживать температуру исследуемой жидкости в диапазоне 24–70°C с погрешностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. В качестве датчика температуры используется германиевый диод 10, укрепленный на стенке камеры. Последний подключен к блоку 5, который позволяет регулировать и стабилизировать температуру жидкости в интерферометре с помощью нагревателя 8. Точное значение температуры контролирует термометром. Все узлы прибора питаются от блока питания 6.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Установить микрометрический винт в верхнее положение (25 мм).
2. Снять измерительную камеру интерферометра и заполнить ее исследуемой жидкостью. В случае необходимости стеклянной палочкой устранить воздушные пузырьки на дне камеры. Установить измерительную камеру на держатель. При этом во избежание появления пузырьков воздуха на отражателе держатель следует слегка наклонить.
3. Кабель измерительной камеры подключить к гнезду на правой стенке прибора.
4. Ручки "W" и "T" поставить в крайние левые положения.
5. Ручку "P" повернуть до упора против часовой стрелки.
6. Прибор включить в сеть.
7. Установить указанную преподавателем температуру исследуемой жидкости.

С этой целью поставить ручки " $\sim$ " и " T^0 " в крайние правые положения. Указанные положения соответствуют максимуму тока подогрева (индикатором нагрева служит горящая неоновая лампочка, установленная на передней панели прибора). При достижении температуры примерно на 5°C меньше заданной ручку " $\sim$ " перевести в положение, при котором индикатор нагрева гаснет. В течение 5-10 мин с помощью ручки " T^0 " откорректировать температуру в соответствии с заданной. Измерения скорости можно проводить, когда колебания температуры не будут превышать $0,3-0,5^{\circ}\text{C}$. В отчете приводится действительное значение температуры (по термометру).

8. Ручкой " $\longleftrightarrow$ " установить стрелку индикатора на середину шкалы.

9. Ввинчивая микрометрический винт, найти 2-3 максимума и минимума. Ручкой " $\curvearrowright$ " установить такую чувствительность, чтобы размах показаний стрелочного индикатора при переходе от максимума к минимуму составлял не менее 30-40 делений. Ручкой " $\longleftrightarrow$ " откорректировать положение стрелки так, чтобы стрелка колебалась в средней части шкалы.

10. Снять зависимость показаний стрелочного индикатора от положения отражателя на протяжении 0,5 мм через 0,02 мм. Построить по снятым показаниям график и выбрать по нему, какие экстремумы - минимумы или максимумы - лучше использовать для отсчета.

11. Ввинчивая микрометрический винт, найти такое положение отражателя l_1 , при котором стрелка указывает на выбранный экстремум. Записать отсчет по микрометрическому винту.

12. Ввинчивая микрометрический винт, сосчитать n интервалов между выбранными экстремумами. Записать n и отсчет l_2 по микрометрическому винту для последнего экстремума (n удобно брать равным восьми).

13. Повторить измерения l_1 и l_2 на разных участках шкалы микрометрического винта не менее трех раз. При этом во всех измерениях n должно быть одним и тем же.

2.4. Обработка данных и требования к отчету

Для расчета скорости распространения ультразвука по результатам измерений необходимо знать частоту колебаний. В данном при-

боре $f = 4 \cdot 10^6 \text{ Гц}$.

По значениям скорости, найденным из отдельных измерений, определить среднее значение $C_{\text{ф}}$ и оценить ошибки измерений. Результаты измерений и расчетов представить в форме таблицы.

$T, ^{\circ}\text{C}$	$l_1,$ мм	$l_2,$ мм	n	$l_1 - l_2,$ мм	$C,$ м/с	$C_{\text{ф}} \pm \Delta C,$ м/с

Отчет должен содержать:

1. Структурную схему интерферометра и ее краткое описание.
2. График зависимости показаний индикатора от положения микрометрического винта по п.10 (с.14).
3. Расчетные формулы и примеры численных расчетов.
4. Оценку ошибок измерений.
5. Таблицу с результатами измерений и расчетов.

2.5. Контрольные вопросы

1. Рассказать о принципе работы ультразвукового интерферометра?
2. Что такое сателлиты и чем вызывается их появление?
3. Пояснить устройство простейшего интерферометра.
4. Чем может быть вызван разброс значений скорости в отдельных измерениях?

Список литературы

Колесников А.Е. Акустические измерения. - Л.: Судостроение, 1983.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ СРЕДАХ

3.1. Цель работы

Ознакомиться с методикой измерения скоростей распространения продольных (поперечных) ультразвуковых волн и определения модулей упругости по найденным значениям скоростей. Приобрести практические навыки измерений с помощью прибора УЗИС-ЛЭТИ.

3.2. Принцип работы прибора УЗИС-ЛЭТИ

Измерение скоростей упругих волн в образцах твердых тел прибором УЗИС-ЛЭТИ основано на сравнении времени распространения ультразвуковых импульсов в испытуемом образце и в эталонной жидкости, скорость ультразвука в которой известна.

Функциональная схема прибора показана на рис.3.1, а соответствующие временные диаграммы электрических напряжений изображены на рис.3.2. Обратимся к рис.3.1. Синхронизатор вырабатывает остроконечные импульсы U_1 с периодом следования $T_c \approx 2$ мс. Эти импульсы используются для запуска генератора высокочастотных импульсов и блока ждущей развертки. Радиопульсы U_2 генератора имеют несущую частоту $f_0 = 1,5$ МГц, длительность $\tau_u \approx 10$ мкс и частоту следования $F_c = 1/T_c \approx 500$ Гц. Вырабатываемые высокочастотным генератором сигналы одновременно возбуждают пьезоизлучатели $И$ измерительной (ИЛ) и эталонной (ЭЛ) линий. В состав измерительной линии входит образец $О$. Прошедшие через измерительную и эталонную линии ультразвуковые сигналы превращаются пьезоприемниками $П$ в радиопульсы U_3 , показанные на диаграмме (см. рис.3.2) как $U_{из}$ и U_3 . После усиления импульсы $U_{из}$ и U_3 подаются на вертикально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. С помощью пилообразных напряжений U_3 и U_4 блока ждущей развертки, подаваемых на горизонтально-отклоняющиеся пластины электронно-лучевой трубки, на экране можно наблюдать временную последовательность импульсов, прошедших через измерительную и эталонную линии. Благодаря тому, что момент срабатывания блока развертки задержан на регулируемое время τ_y относительно t_0 ,

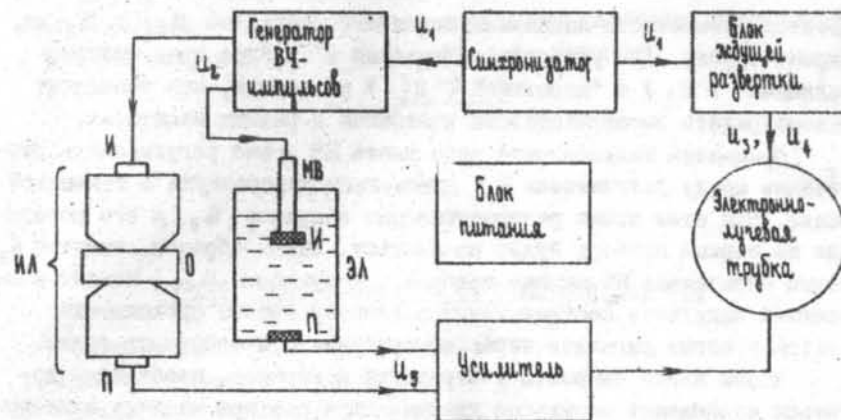


Рис.3.1

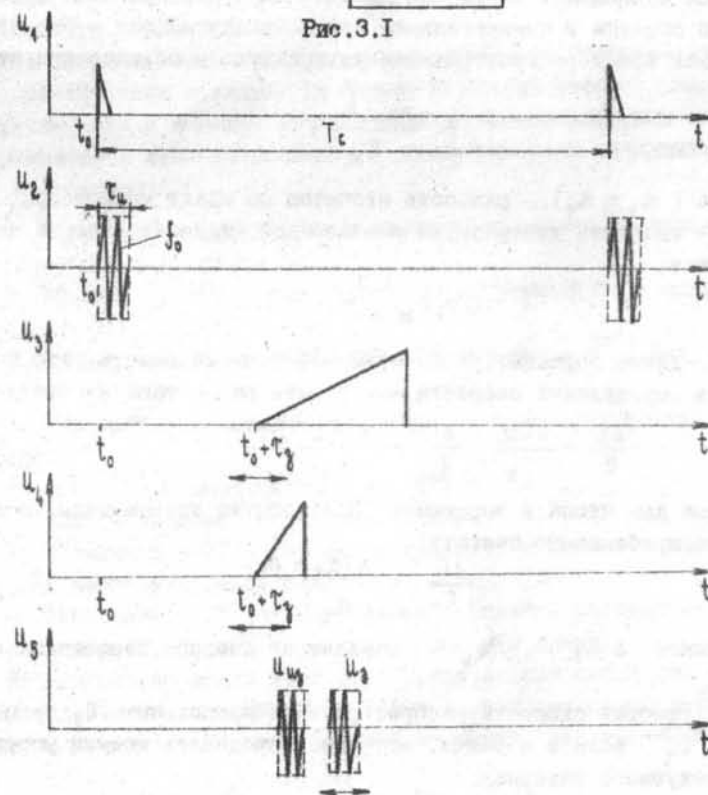


Рис.3.2

имеется возможность изменения положения импульсов $U_{из}$ и U_3 на экране трубки. Для удобства наблюдений в приборе предусмотрена "длинная" (U_3) и "короткая" (U_6) развертки, что позволяет рассматривать высокочастотные колебания в разных масштабах.

Вращением микрометрического винта ИВ можно регулировать расстояние между излучателем И и приемником ультразвука в эталонной линии. При этом время распространения импульса U_3 и его положение на экране прибора будут изменяться. Таким образом, импульс U_3 можно совместить на экране прибора с импульсом $U_{из}$. Момент совмещения импульсов соответствует равенству времен прохождения ультразвуковых сигналов через измерительную и эталонную линии.

Чтобы найти скорость ультразвука в образце, необходимо добиться совмещения импульсов дважды: один раз при наличии исследуемого образца в измерительной линии, а другой раз - без него. Искомое время распространения ультразвука в образце при этом

$$\tau_x = \frac{n_2 - n_1}{c_x}, \quad (3.1)$$

Здесь ($n_2 - n_1$) - разность отсчетов по шкале микрометра;
 c_x - скорость ультразвука в эталонной жидкости. Отсюда искомая скорость

$$c = c_x \frac{L}{n_2 - n_1}, \quad (3.2)$$

где L - длина образца. Из формулы (3.2) легко видеть, что погрешность определения скорости может быть рассчитана из соотношения

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta c_x}{c_x} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta(n_2 - n_1)}{n_2 - n_1}. \quad (3.3)$$

Первые два члена в выражении (3.3) обычно весьма малы, поэтому можно приближенно считать:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta(n_2 - n_1)}{n_2 - n_1} \quad (3.4)$$

Значение $\Delta(n_2 - n_1)/(n_2 - n_1)$ зависит от способа совмещения импульсов.

Измерив скорости распространения продольных c_l и поперечных c_t волн в образце, нетрудно определить модули упругости исследуемого материала:

$$\lambda + 2\mu = \rho c_l^2, \quad \mu = \rho c_t^2 \quad (3.5)$$

где λ, μ - постоянная Ламе; ρ - известная плотность материала. Постоянные Ламе однозначно определяют наиболее применяемые в технике модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (3.6)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (3.7)$$

3.2. Конструктивные особенности прибора

Прибор УЗИС-ЛЭТИ включает в себя:

1. Блок электронной схемы.
2. Измерительную линию.
3. Жидкостную эталонную линию.

Все элементы схемы прибора смонтированы на горизонтальном шасси, заключенном в кожух. На передней панели имеются разъемы для подключения с помощью соединительных высокочастотных кабелей измерительной и эталонной линий, а также выведены следующие элементы управления:

1. "Яркость" - регулирует яркость изображения на экране электронно-лучевой трубки.
2. "Фокус" - регулирует четкость изображения на экране трубки.
3. "Задержка", "Грубо-плавно" - устанавливает момент запуска развертки.
4. "Развертка", "Длинная-короткая" - изменяет масштаб изображения.
5. "Сеть" - подает напряжение сети в прибор.
6. "ЭЛ" - включает жидкостную линию.
7. "Усиление - ЭЛ" - плавно регулирует величину сигналов, прошедших через эталонную линию.
8. "Усиление - ИЛ", "Грубо-плавно" - плавно регулирует величину сигналов, прошедших через измерительную линию.

Измерительная линия (рис.3.3) представляет собой два титановых цилиндрических стержня 3, которые служат постоянными ультразвуковыми линиями задержки. Верхний стержень, закрепленный на

подвижной traverse 2, имеет возможность вертикального перемещения по направляющим 1, оставаясь при этом соосным с нижним стержнем. Каждый стержень имеет плоскопараллельные шлифованные торцы, к одному из которых приклеивается излучатель (приемник) ультразвука 4. Для измерения скорости распространения продольных и поперечных волн прибор комплектуется двумя парами стержней с соответствующими типами излучателей и приемников. Для того чтобы можно было использовать одну и ту же эталонную линию, стержни для продольных волн длиннее стержней для поперечных волн ($C_p > C_t$).

Эталонная линия (рис.3.4) состоит из цилиндрического полиэтиленового сосуда 1, залитого эталонной жидкостью с малым температурным коэффициентом скорости в области комнатных температур.

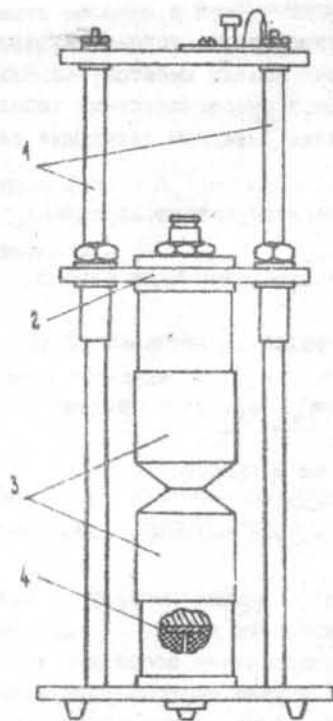


Рис.3.3

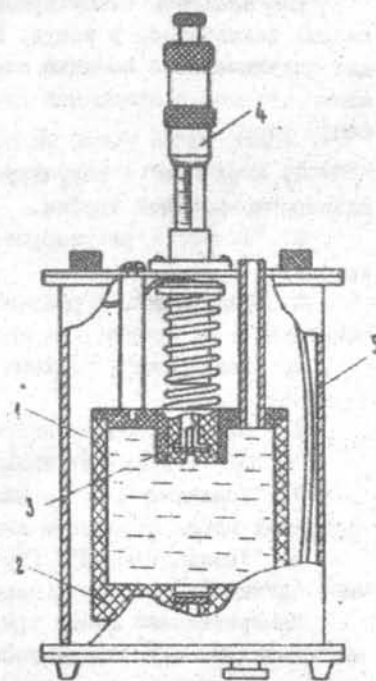


Рис.3.4

В жидкость помещены излучатель 3 и приемник 2. Перемещение излучателя осуществляется микрометрическим винтом 4, максимальный ход которого - 25 мм. Полиэтиленовый сосуд размещен в металлическом корпусе 5.

В качестве эталонной жидкости в приборе применен 18%-ный раствор этилового спирта в дистиллированной воде (22 см³ спирта на 100 см³ воды). На рис.3.5 приведены температурные зависимости скорости ультразвука для трех различных концентраций спирта (кривая 1 соответствует дистиллированной воде; кривая 2 - раствору, содержащему 16 см³ спирта и 100 см³ воды; кривая 3 - 22 см³ спирта и 100 см³ воды).

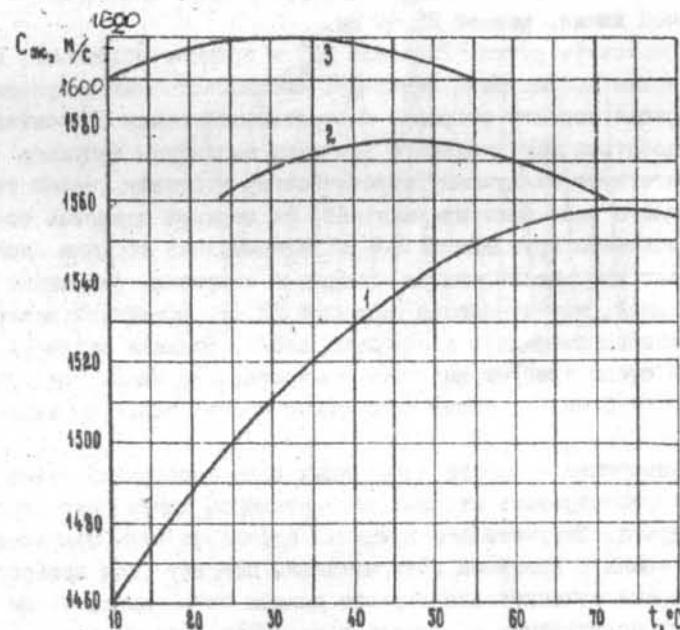


Рис.3.5

3.3. Порядок выполнения работы

1. Включить прибор, отрегулировать яркость и четкость изображения, включить длинную развертку.

2. Осторожно ввести в соприкосновение стержни измерительной линии, нанеся предварительно контактную смазку на их торцовые поверхности. При измерении скорости продольных волн для обеспечения акустического контакта следует использовать смазочные вещества (глицерин, машинное масло и др.), а в случае поперечных волн — вещества, обладающие световой упругостью. В данной работе рекс индуется использовать эпоксидную смолу без отвердителя, которая в силу значительной вязкости имеет достаточную динамическую сдвиговую упругость.

3. Вращая ручку "Усиление — ЭЛ", установить амплитуду импульса эталонной линии, равной 25–40 мм.

4. Установить ручки "Усиление ИЛ" в среднее положение. При этом на экране должны быть видны два высокочастотных импульса.

5. Вращая верхний стержень измерительной линии относительно нижнего, добиться максимального значения амплитуды импульса $U_{из}$, что соответствует наилучшему акустическому контакту. Чтобы толщина контактного слоя была минимальной, на верхний стержень дополнительно положить груз массой 3–5 кг. Минимальная толщина слоя обеспечивает уменьшение ошибок измерений скорости, связанных с дополнительной, неучитываемой формулой (3.1) временной задержкой ультразвукового сигнала в контактных слоях. Большая вязкость эпоксидной смолы требует выдержки измерительной линии под грузом в течение ~ 5 мин, после чего можно брать отсчет по шкале микрометра.

При измерении скорости поперечных волн необходимо также правильно ориентировать стержни измерительной линии друг относительно друга. Излучатель и приемник сдвиговых волн излучают и принимают волны с линейной поляризацией, поэтому угол поворота одного стержня относительно другого должен быть таким, чтобы направления поляризации приемника и излучателя совпадали.

6. Совместить импульсы измерительной и эталонной линий. Взять отсчет по шкале микрометра. Процедура совмещения импульсов требует проведения следующих операций:

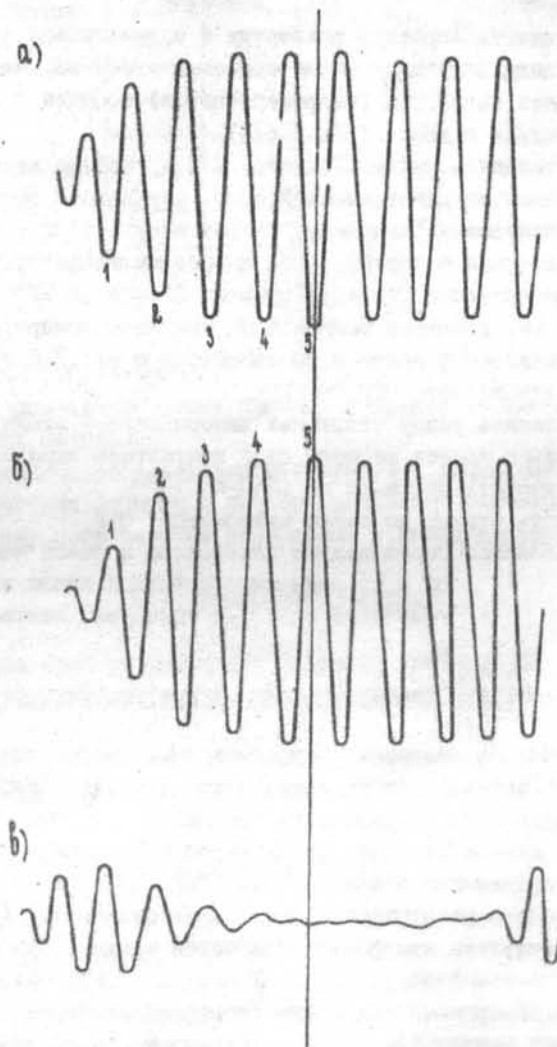


Рис. 3.6

а) вращая ручки "Задержка", сместить импульс $U_{\text{из}}$ к левому краю развертки;

б) включить короткую развертку и окончательно отрегулировать положение импульса $U_{\text{из}}$ таким образом, чтобы заранее выбранная отрицательная полуволна (например, пятая) совпала с вертикальной линией на шкале прибора (рис.3.6,а);

в) установить ручки "Усиление ИЛ" в крайние левые положения;

г) вращая микрометрический винт, установить выбранную положительную полуволну (например, пятую) импульса $U_{\text{з}}$ таким образом, чтобы она совпала с вертикальной линией на шкале прибора (рис.3.6,б);

д) одновременно оперируя ручками "Усиление ИЛ" и микрометрическим винтом, добиться компенсации импульса измерительной линии импульсом эталонной линии в соответствии с рис.3.6,в);

е) взять отсчет n_1 .

7. Вставить между стержнями измерительной линии образец, предварительно нанеся на него слой контактной смазки.

8. Повторить операции по пп.2-6.

9. Взять отсчет по шкале микрометра n_2 .

УКАЗАНИЕ: Перед каждым измерением и после измерений образцы и стержни измерительной линии должны быть тщательно протерты тампоном, смоченным в ацетоне.

3.4. Обработка данных и требования к отчету

1. Измерить скорости распространения продольных и поперечных волн в двух образцах по указанию преподавателя. Процедуру измерения на каждом образце выполнить трижды.

2. По данным разброса результатов трех измерений найти погрешность определения значения $n_2 - n_1$.

3. Оценить погрешности определения скоростей C_l и C_t .

4. Результаты измерений и расчетов представить в виде таблицы.

5. По измеренным значениям скоростей распространения рассчитать упругие модули λ , μ , E и ν и оценить погрешности найденных значений.

Образец	Длина образца L	Измеренные величины		$(n_2 - n_1)_{\text{ф}}$	$\frac{\Delta(n_1 - n_2)_{\text{ф}}}{(n_2 - n_1)_{\text{ф}}}$	Скорости	
		n_1	n_2			$C_l \pm \Delta C$	$C_t \pm \Delta C$
1							
2							

Отчет должен содержать:

1. Функциональную схему прибора и временные диаграммы электрических напряжений.
2. Таблицу с результатами наблюдений и вычислений.
3. Расчетные формулы и примеры численных расчетов.
4. Оценку погрешностей измеряемых и рассчитываемых величин.

3.5. Контрольные вопросы

1. Каков принцип измерения скорости прибором УЗИС-ЛЭТИ?
2. Почему комплекты стержней измерительных линий имеют разные длины?
3. Зачем используется контактная смазка в измерительной линии и почему толщина смазки должна быть минимальна?

Список литературы

1. Колесников А.Е. Акустические измерения. - Л.: Судостроение, 1983.
2. Гурович Е.А., Яковлев Л.А. Импульсно-фазовый прибор для измерения скорости ультразвука в твердых телах // - Изв.ЛЭТИ: Сб науч. тр./Ленингр.электротех.ин-т им.В.И.Ульянова (Ленина). - Л., 1972.-Вып. II 2.-С.61-64.

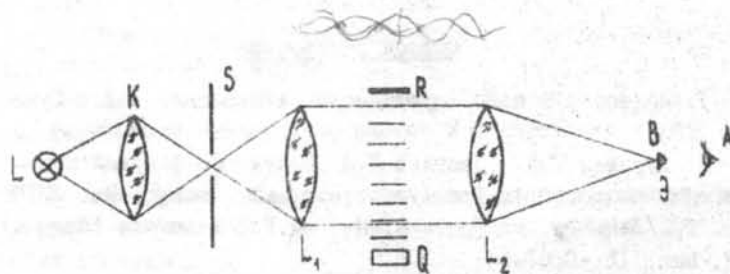
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ОПТИЧЕСКИ
ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ

4.1. Цель работы

Ознакомиться с теневым методом (методом Теплера) визуализации ультразвуковых полей в оптически прозрачных средах. Приобрести практические навыки использования установки Теплера для исследования распространения ультразвуковых волн в жидких и твердых средах.

4.2. Принцип работы и описание установки
для визуализации ультразвуковых полей

Теневой метод, впервые примененный Теплером (1886 г.), позволяет непосредственно наблюдать изображение ультразвуковой волны. Упрощенная схема оптической установки, применяемой для таких наблюдений, изображена на рис. 4.1. Источник света L через конденсорную линзу K освещает диафрагму S , имеющую малое отверстие в форме круга или узкой щели. Диафрагма расположена в фокальной плоскости линзы L_1 , поэтому за линзой L_1 свет распространяется параллельным пучком. Линза L_2 фокусирует световой пучок в своей фокальной плоскости и формирует в точке B оптическое изображение отверстия диафрагмы. Это изображение закрыва-

Рис. 4.1
- 26 -

ется непрозрачным экраном $З$, размеры которого должны быть минимальны, но в то же время достаточны для перекрытия лучей света. Таким образом, в области за экраном свет отсутствует и не доходит до наблюдателя A .

Если в пространстве между линзами L_1 и L_2 поместить исследуемый прозрачный объект (например, кофету с водой) и возбудить в нем с помощью излучателя Q и отражателя R стоячую ультразвуковую волну, то траектории световых лучей уже не будут параллельными. Часть лучей, отклонившихся от прямолинейного распространения, минует экран $З$ и дойдет до наблюдателя, вследствие чего наблюдатель будет видеть оптическое изображение ультразвуковой волны. Это изображение может быть сфотографировано, если глаз наблюдателя заменить фотоаппаратом.

Причиной искривления траекторий световых лучей в области, занятой ультразвуковой волной, является оптоупругий эффект, заключающийся в том, что показатель преломления среды и скорость распространения света в ней зависят от упругих напряжений (давлений). Стоячая ультразвуковая волна создает в среде давление, которое периодически изменяется вдоль направления нормали к поверхности излучателя. При этом вследствие оптоупругого эффекта среда становится оптически неоднородной с периодически изменяющимся вдоль того же направления показателем преломления. В неоднородной среде свет распространяется по искривленным траекториям (известное в оптике явление рефракции), причем отклонение луча от прямолинейного распространения будет тем сильнее, чем больше градиент показателя преломления. В стоячей ультразвуковой волне градиент давления (а следовательно, и градиент показателя преломления) равен нулю в пучностях давления и достигает максимума в узлах. Поэтому оптическое изображение стоячей волны представляет собой чередование темных и светлых полос, причем светлые полосы соответствуют узлам давления, а темные — пучностям. Яркость изображения определяется количеством света, прошедшего мимо экрана $З$, т.е. зависит от степени искривления траекторий световых лучей и, в конечном счете, от значения давления в ультразвуковой волне. Кроме того, для получения достаточно яркого изображения необходимо, чтобы направления распространения света и ультразвука были взаимно перпендикулярны.

Теневым методом можно получать изображение и бегущих ультразвуковых волн. Отличие состоит только в том, что картина пространственно периодического изменения давления (и показателя преломления) в этом случае не фиксирована в пространстве, а перемещается со скоростью ультразвука. При этом темные и светлые полосы на оптическом изображении ультразвуковой волны также движутся, образуя равномерно засвеченное изображение ультразвукового пучка.

В данной лабораторной работе используется серийно выпускаемая оптическая система ИАВ-45I. Она включает в себя (рис.4.2) коллиматорную трубу 1 с осветителем 2, которая формирует параллельный пучок света, и наблюдательную трубу 3 с окуляром 4 для наблюдения и фотографирования изображений ультразвуковых волн. Обе трубы установлены на специальных суппортах-подставках 5, а между ними располагается исследуемая акустическая система 6. На подставках укреплены также выключатель 7 осветителя и высокочастотный генератор 8, который подключается к пьезоэлектрическим излучателям ультразвука, входящим в состав исследуемых акустических систем.

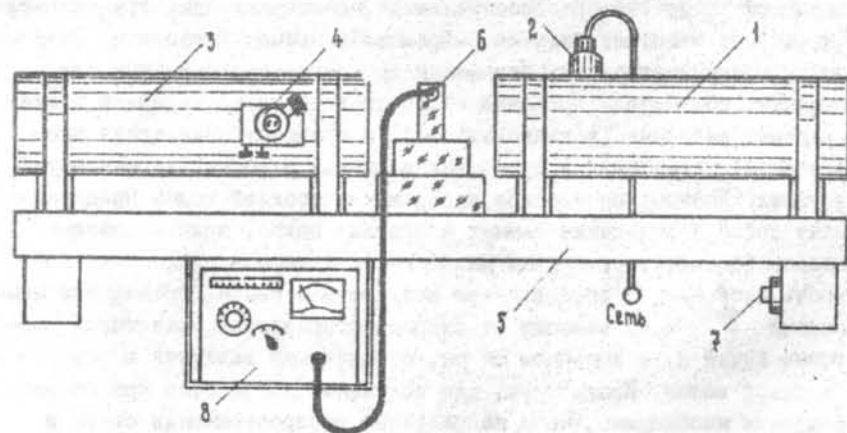


Рис.4.2

4.3. Программа и порядок выполнения работы

1. Изучить описание работы и ознакомиться с рекомендованной литературой.

2. Изучить используемую оптическую установку и исследуемые акустические системы:

а) заполненную водой кювету с пьезоизлучателем и устройством для его поворота относительно стенок кюветы; кварцевые пластинки с полуволновой и четвертьволновой толщинами;

б) монокристаллический прямоугольный образец из синтетического кварца с пьезоэлектрической пластинкой, которая возбуждает в образце квазипродольную и квазипоперечную ультразвуковые волны с волновым вектором, направленным вдоль кристаллографической оси Y . Подирированные плоскопараллельные грани образца перпендикулярны оси X .

3. Установить кювету с водой и пьезоизлучателем между коллиматорной и наблюдательной трубами таким образом, чтобы ось пьезоизлучателя была перпендикулярна световому пучку; с помощью кабеля подключить пьезоизлучатель к генератору.

4. Установить угол поворота пьезоизлучателя, указанный преподавателем; включить осветитель и генератор.

5. Наблюдая в окуляр за изображением ультразвуковых пучков, добиться его достаточной яркости и однородности. Для этого необходимы: настройка генератора на частоту пьезоизлучателя, достаточно большая амплитуда выходного напряжения генератора, перпендикулярность направлений распространения света и ультразвуковой волны.

6. С помощью двухкоординатного измерительного устройства определить координаты центра излучателя и "точек" выхода ультразвуковых пучков на стенки и дно кюветы, а также на поверхность воды. Для отсчета координат следует, наблюдая за изображением и перемещая точечный индикатор измерительного устройства, совместить индикатор на изображении с "точкой" выхода ультразвукового пучка.

7. Сориентировать излучатель в кювете перпендикулярно поверхности воды. С помощью специальных приспособлений поместить на пути ультразвукового пучка и перпендикулярно к нему полуволновую кварцевую пластину. Наблюдая за изображением, выполнить подстрой-

ку по п.5, если это необходимо, и зарисовать полученную картину. Выполнить аналогичные исследования с четвертьволновой кварцевой пластиной.

8. Выключить генератор и осветитель. Отсоединить пьезоизлучатель кюветы от генератора.

9. Поставить на место кюветы кварцевый образец, ориентируя его так, чтобы свет был перпендикулярен полированным граням. Подсоединить пьезопластинку к генератору.

10. Включить генератор и осветитель. Выполнить настройку согласно п.5.

11. Аналогично п.6 определить координаты центра излучающей пьезопластинки и "точек" выхода ультразвуковых пучков на грани образца.

12. Выключить генератор и осветитель.

13. По измеренным координатам излучателей и "точек" выхода ультразвуковых пучков на границы исследуемых акустических систем построить траектории ультразвуковых лучей в кювете и в кварцевом образце.

14. Определить углы отклонения ультразвуковых лучей, наблюдаемых в кварцевом образце, от направления волнового вектора (волновой нормали).

4.4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Схему измерительной установки вместе с исследуемыми акустическими системами и ее краткое описание.

2. Сведенные в таблицу результаты измерения координат излучателей и "точек" выхода ультразвуковых пучков.

3. Рисунки траекторий ультразвуковых лучей в исследуемых акустических системах.

4. Значения измеренных углов отклонения ультразвуковых лучей от волновой нормали.

4.5. Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип визуализации ультразвуковых полей теневым методом?

2. От чего зависит яркость наблюдаемого изображения ультра-

звуковых волн?

3. Как по виду изображения отличить стоячую ультразвуковую волну от бегущей?

Список литературы

1. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - С.208-210.

2. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. - М.: Наука, 1965.

Оглавление

Лабораторная работа № 1. Исследование механической колебательной системы.	3
Лабораторная работа № 2. Ультразвуковой интерферометр	9
Лабораторная работа № 3. Измерение скоростей распространения упругих волн в твердых средах	16
Лабораторная работа № 4. Визуализация ультразвуковых полей в оптически прозрачных средах.	26

Редактор И.И.Лейкина

Подп. и печ. 13.06.86. Формат 60x84 1/16.
Бумага оберточная. Офсетная печать. Печ.л.2,0; уч.-изд.л.2,0.
Тираж 150 экз. План 1986 г. Изд.№12. Зак.№ 98 Бесплатно.
Редакционно-издательский отдел ЛЭТИ им.В.И.Ульянова (Ленина)

Ротапринт ЛЭТИ

197022, Ленинград, ул.Проф.Попова, д.5