

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Раздел «Упругие волны»

Под редакцией В.Н. Игнатова и Д.А. Самарченко

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2011

УДК 535+537.86/87(076.5)
ББК 22.34я7
Л 12

Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «Упругие волны» /
Под ред. В.Н. Игнатова и Д.А. Самарченко: *Учебное пособие*. М.: НИЯУ МИФИ,
2011. – 68 с.

Авторы: Е.Д. Вовченко (работа 4-5А); Н.А. Иванова (работа 4-3А); В.Н. Игнатов (методические рекомендации); Э.В. Онищенко (работа 4-4А); Е.П. Потанин (работа 4-1А); Д.А. Самарченко (работы 4-1А, 4-2А, 4-3А, 4-4А); А.Н. Тюлюсов (работа 4-2А).

Дано описание пяти лабораторных работ по теме «Упругие волны» курса общей физики «Волны и оптика». Работы, представленные в практикуме, охватывают основные волновые явления, связанные с излучением и распространением упругих волн: эффект Доплера, интерференция и дифракция. В каждой работе приведено теоретическое введение с кратким изложением основных понятий и закономерностей акустики.

Цель практикума – знакомство с основными явлениями волновой акустики и методами работы как на современной акустической аппаратуре, так и на специально подготовленных для лаборатории учебных установках с использованием персонального компьютера. Также большое значение придается возможности самостоятельного наблюдения и изучения физических явлений и закономерностей.

Предназначено для студентов 2-го курса НИЯУ МИФИ всех факультетов.
Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. В.Ф. Федоров (НИЯУ МИФИ);
проф. Ю.А. Коровин (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

ISBN 978-5-7262-1562-4

© Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», 2011

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ КАФЕДРЫ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

I. На каждое лабораторное занятие студент должен приносить с собой:

- 1) лабораторный журнал (толстая тетрадь формата А4);
- 2) физический практикум, в котором приведено описание выполняемой лабораторной работы;
- 3) счетный прибор (калькулятор), на котором можно вычислять логарифмы и тригонометрические функции;
- 4) несколько листов миллиметровой бумаги размером А4 (210×297 мм) или А5 (148×210 мм);
- 5) ручку (с синими, фиолетовыми или черными чернилами);
- 6) карандаш (ТМ и М), линейку и ластик.

II. Студент обязан приходить в лабораторию подготовленным. Подготовка к лабораторной работе производится в часы самостоятельных занятий и включает в себя следующее.

1. Тщательное изучение описания лабораторной работы по физическому практикуму и расширенное знакомство по основной и дополнительной литературе, представленной в конце описания работы с теоретическим материалом, необходимым для сознательного выполнения работы. В результате студент должен понимать физическую сущность явлений, которые будут изучаться в предстоящем эксперименте; ясно представлять, что и каким методом будет измеряться, как устроена и работает экспериментальная установка. Необходимо иметь представление о порядках тех величин, которые будут измеряться в процессе работы.

Подготовленность к работе можно считать удовлетворительной, если студент может самостоятельно ответить на контрольные вопросы, которыми заканчивается описание каждой работы.

2. Оформление лабораторного журнала:

- а) на новой правой странице журнала должны быть написаны номер и название лабораторной работы;
- б) на следующей правой странице необходимо выписать основные формулы теории, выделив те, по которым производится вычисление определяемых в лабораторной работе величин; подгото-

вить формулы для вычисления погрешностей (см.: Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. М.: МИФИ, 2005);

в) изобразить с помощью карандаша и линейки схему экспериментальной установки (основные блоки и узлы без лишних подробностей);

г) подготовить таблицы для записи экспериментальных данных (таблицы нужно чертить с помощью карандаша и линейки; желательный размер клетки: 1,5х2,5 см).

Все записи в журнале аккуратно выполняются ручкой на правой странице журнала (левая предназначена для выполнения расчетов). Следует писать достаточно свободно, оставляя место для возможных исправлений.

Если в лабораторном практикуме изображен рекомендуемый вид таблицы, то она чертится для полного числа измерений (в практикуме обычно показана часть таблицы). Если в задании требуется выполнить измерения, но нет указаний на таблицу, то студент рисует таблицу самостоятельно. При этом следует обратить внимание на количество измерений и число измеряемых величин. Каждую таблицу желательно чертить на новой странице, оставляя место над таблицей (около 5 см) и под таблицей (около 10 см). Над таблицей – место для записи названий приборов и их характеристик: классов точности, полного числа делений шкалы и предела измерений шкалы, на которых производятся измерения. Место под таблицей необходимо на случай, если потребуется выполнить дополнительные измерения. Если необходимо составить несколько таблиц или построить несколько графиков (рисунков), то их необходимо пронумеровать.

III. Порядок выполнения лабораторной работы.

1. Выполнение работы начинается с детального изучения установки. Необходимо записать заводские номера и технические характеристики всех приборов (класс точности, пределы измерений и т.д.), определить цену деления прибора. При этом не разрешается крутить ручки приборов, так как можно сбить настройку. Включать установку и приступать к измерениям можно только с разрешения

преподавателя. Студент не допускается к выполнению работы, если:

- а) не оформлена предыдущая работа;
- б) имеется более одной несданной работы;
- в) отсутствуют необходимые записи в лабораторном журнале;
- г) студент не может удовлетворительно ответить на контрольные вопросы преподавателя.

2. Получив разрешение преподавателя, студент приступает к выполнению работы, соблюдая правила техники безопасности.

3. Все записи необходимо делать только в лабораторном журнале и только ручкой. Использование дополнительных листков и карандаша для записи результатов измерений категорически запрещается.

4. Прежде чем приступить к серии измерений, обычно проводят прикидочные измерения. При этом проверяется соответствие хода экспериментальной зависимости теоретической (качественно), определяются пределы измерений, выполняется оценочный расчет искомых величин (на левой странице журнала). Если оценки совпадают с ожидаемыми, то выполняется основной эксперимент. Если нет совпадения, то следует проверить схему экспериментальной установки.

5. Данные основной серии записываются в таблицы. Запрещаются всякие черновые записи исходных данных. Запись отчетов производится в делениях шкалы измерительного прибора (без каких-либо пересчетов).

6. Если был записан ошибочный результат, то его следует аккуратно зачеркнуть.

7. Выполнив измерения, студент проводит расчет искомых величин и их погрешностей, строит указанные в заданиях графики.

8. Работа завершается написанием заключения, в котором указывается:

- а) цель работы;
- б) что и каким методом определялось;
- в) окончательный результат измерений с указанием абсолютной и относительной погрешностей (для доверительной вероятности 0,7); пример записи – сопротивление проводника

$$R = (50,2 \pm 0,4) \text{ Ом}, E = 0,8\%$$

(где 50,2 Ом – среднее значение сопротивления; 0,4 Ом – абсолютная погрешность, которая указывается с одной значащей цифрой, а для случая, когда первая значащая цифра 1 – с двумя; 0,8 % – относительная погрешность);

г) краткое обсуждение полученных результатов (в том числе всех графиков) и анализ погрешностей; полученные значения следует сравнить с известными табличными значениями измеряемых величин; после заключения следует оставить около страницы свободного места на случай его возможной переделки.

9. Если студент не успевает получить зачет по работе в день ее выполнения, то необходимо получить подпись преподавателя в журнале, подтверждающую выполнение работы. В этом случае оформление работы необходимо закончить во внеаудиторное время.

Внимание! Какие бы результаты не были получены, студент обязан написать заключение по работе к следующему занятию.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Во многих работах составной частью установок является микрометрическая подача, фотография которой приведена на рис.1, она служит для малых (доли миллиметра) перемещений различных объектов, вставленных в крепежное отверстие столика 1. Стопорные винты 3 позволяют закреплять стойки с различными объектами на корпусе устройства.

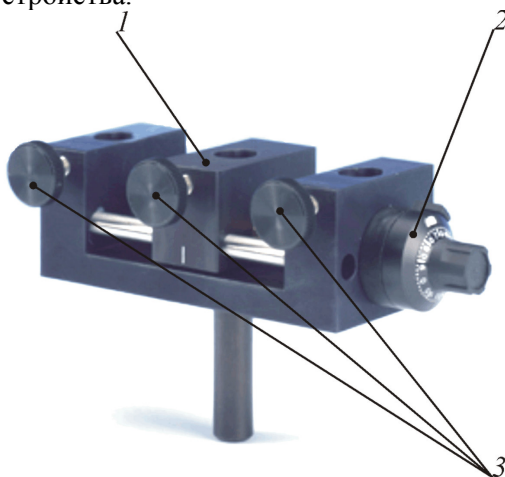


Рис. 1

Перемещение столика осуществляется вращением барабана 2.

Измерительным элементом является микрометрический винт, имеющий резьбу с точным шагом (шаг резьбы $P = 0,50$ мм). Микрометрическая пара конструктивно выполняется в виде резьбовой (микрометрической) гайки (столик 1), установленной на двух направляющих, и микрометрического винта, соединенного с отсчетным барабаном 2. Измеряемое перемещение определяется по углу поворота барабана. Для отсчета целого числа оборотов микрометрического винта служит круговая (основная) шкала, которая расположена на запрессованном в корпус кольце. Для отсчета долей оборота микрометрического винта, т. е. десятых и сотых долей миллиметра, служит круговая шкала с радиальными штрихами (50 делений), нанесенными на круглой части барабана (рис. 2). Указателем для отсчета по этой шкале является продольный штрих, нанесенный под окошком.

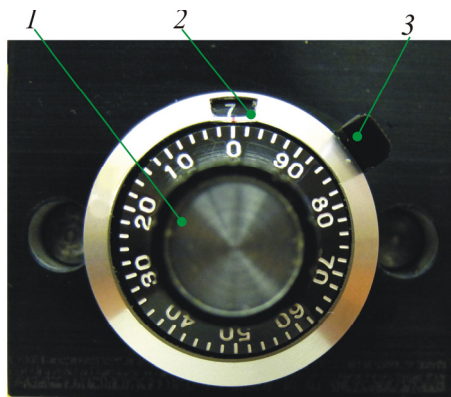


Рис. 2

Устройство барабана приведено на рис. 2. Ручка барабана 1 служит для приведения в движение микрометрического винта. Для предотвращения вращений ручки барабана в конструкции барабана предусмотрен стопор 3. Цена деления микрометрического винта на барабанном отсчетном устройстве 0,02 оборота микрометрического винта или 0,01 мм перемещения столика. Для удобства отсчета на барабане нанесены числа, обозначающие сотые доли оборота. Смена показаний на единицу в окне 2 соответствует перемещению столика на $50 \times 0,01 \text{ мм} = 0,5 \text{ мм}$.

Пример. На рис. 2 показание в окне равно 7, отсчет по барабанному отсчетному устройству – 0. Таким образом, отсчет равен $7,00 \text{ об.} = 3,50 \text{ мм}$.

Показания в окне могут меняться от 0 до 19, которые соответствуют перемещению столика на расстояние $20 \times 0,5 \text{ мм} = 10 \text{ мм}$. Так, период показаний отсчетного устройства микрометрической подачи равен 20 оборотам микрометрического винта (10 мм). Для измерения перемещений, превышающих этот период, можно воспользоваться миллиметровой линейкой, расположенной под белой риской столика 1 (на рис.1 не указана, но в некоторых работах имеется).

Из-за возможного люфта вращать барабан при проведении измерений рекомендуется в одном направлении.

Погрешность отсчета микрометрического винта – 0,01 мм.

Р а б о т а 4-1А

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Цель: исследование зависимости сдвига частоты ультразвука от скорости приемника относительно источника.

Оборудование: ультразвуковая установка; источник питания для ультразвуковой установки 5 В, 12 Вт; передатчик ультразвука на подставке; приемник ультразвука на подставке; тележка с мотором; универсальная установка «Кобра 3»; источник питания 12 В; информационный стандартный кабель RS 232 для таймера счетчика; световой барьер; персональный компьютер (ПК).

ВВЕДЕНИЕ

Звук – волновое распространение энергии в упругой среде, которую воспринимают слуховые органы человека. Звук обусловливается продольными механическими колебаниями. Эти колебания, охватывающие диапазон частот от 16 Гц до 20 кГц, принято называть *звуковыми*, или *акустическими* (*акустика* – учение о звуке). Колебания с частотами ниже звукового диапазона часто называют *инфразвуковыми*, а с частотами выше звукового диапазона, – *ультразвуковыми*. Ультразвуковые волны по своей природе не отличаются от волн звукового диапазона, однако человеческим ухом они уже не воспринимаются. Ультразвуку соответствует диапазон частот от $16 \div 20$ кГц до 1 ГГц.

Рассмотрим систему, состоящую из покоящейся упругой среды, в которой могут распространяться с некоторой скоростью V продольные звуковые (ультразвуковые) волны, источника И, генерирующего волны с частотой ν_0 , и приемника П, который можно называть наблюдателем. Как следует из эксперимента, измеряемая наблюдателем частота звука ν совпадает с частотой колебаний источника ν_0 в случае, когда наблюдатель и источник неподвижны относительно среды или покоятся относительно друг друга. В остальных случаях $\nu \neq \nu_0$. Эффект изменения частоты, восприни-

маемой приемником, при движении наблюдателя и приемника, называется *эффектом Доплера*.¹

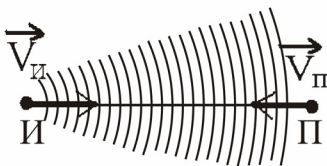


Рис. 4-1А.1

Найдем связь между частотой ν измеряемой наблюдателем и ν_0 для случая равномерного движения точечного источника звука И приемника П вдоль соединяющей их прямой (рис. 4-1А.1). Будем считать, что для указанных на рисунке направлений движения источника и приемника (они приближаются друг к другу) их скорости $V_{\text{И}}$ и $V_{\text{П}}$ относительно неподвижной среды положительны. Распространение продольных звуковых волн в упругой среде связано с периодическими колебаниями ее плотности. Области среды, в которых плотность в данный момент максимальна (минимальна), называются *сгущениями (разрежениями) волн*. Пусть период гармонических колебаний источника звука $T_0 = \frac{1}{\nu_0}$. За время Δt источник испустит $N = \Delta t/T_0$ волн (цуг волн) и переместится вправо на расстояние $V_{\text{И}}\Delta t$. В среде фронт волны пройдет относительно источника путь $l = (V - V_{\text{И}})\Delta t$. Тогда длина волны λ_1 , $\lambda_1 = \frac{(V - V_{\text{И}})\Delta t}{N} = (V - V_{\text{И}})T_0$, и частота ν_1 , регистрируемая неподвижным приемником,

$$\nu_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \nu_0 \frac{V}{V - V_{\text{И}}}. \quad (4-1А.1)$$

¹ Следует отметить, что в случае покоящегося источника и $\vec{V}_{\text{П}} \perp \vec{k}$, где $\vec{k}$ – волновой вектор, указывающий направление распространения волны, $\nu = \nu_0$, говорят об отсутствии *поперечного эффекта Доплера*.

Если, кроме того, приемник движется со скоростью V_{Π} навстречу источнику, то за время $\Delta t'$ он пройдет путь $V_{\Pi}\Delta t'$, а фронт волн пройдет путь $V\Delta t'$, таким образом, число сгущений волны, регистрируемых приемником за $\Delta t'$, равно

$$N = \frac{(V + V_{\Pi})\Delta t'}{\lambda_1},$$

а следовательно, частота $\nu = \frac{N}{\Delta t'} = \frac{V + V_{\Pi}}{\lambda_1}$.

Таким образом,

$$\nu = \nu_1 \left(1 + \frac{V_{\Pi}}{V}\right) = \nu_0 \frac{1 + \frac{V_{\Pi}}{V}}{1 - \frac{V_{\text{и}}}{V}}. \quad (4-1A.2)$$

Как следует из формулы (4-1A.2), при приближении к неподвижному наблюдателю (приемнику) движущегося источника ($V_{\Pi} = 0$, $V_{\text{и}} > 0$), воспринимаемая наблюдателем частота больше величины ν_0 .

Если величина $\frac{V_{\Pi}}{V} \ll 1$ и $\frac{V_{\text{и}}}{V} \ll 1$, формула (4-1A.2) принимает вид

$$\nu - \nu_0 \approx \nu_0 \frac{(V_{\Pi} + V_{\text{и}})}{V} \quad (4-1A.3)$$

Построив, например, зависимость $\nu - \nu_0$ от $V_{\text{и}}$ при $V_{\Pi} = 0$, по угловому коэффициенту $k = \frac{\nu - \nu_0}{V_{\text{и}}} = \frac{\nu_0}{V}$ прямой зависимости можно определить скорость звука V .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 4-1А.2 показано взаимное расположение основных элементов установки. Тележка с моторчиком *1* предназначена для перемещения источника или приемника ультразвука по треку *2*. На основах *3* крепятся датчики: приемник *4* и источник *9*. Световой барьер *7* предназначен для измерения скорости тележки, экран *8* – для прерывания светового луча.

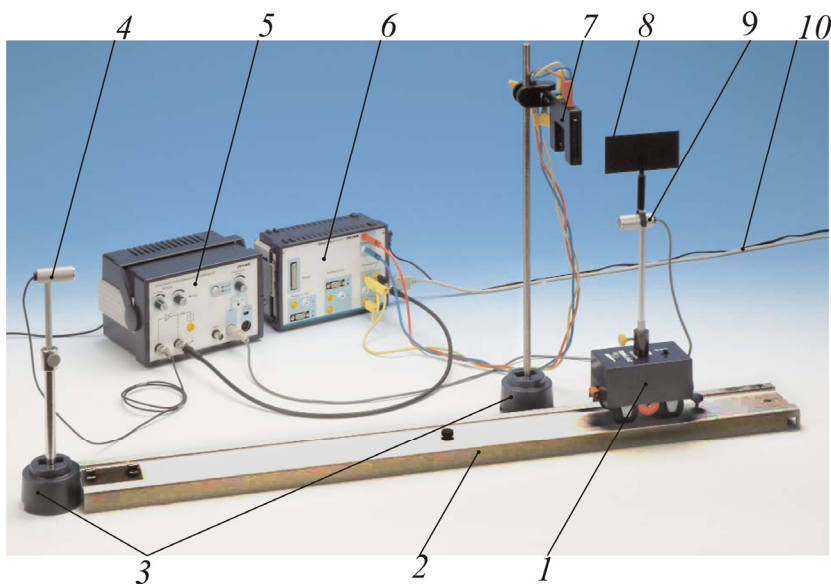


Рис. 4-1А.2

Микрофон *4* и источник *9* подключены к ультразвуковой установке *5*. В левой части ультразвуковой установки находится преобразователь выходного сигнала. Измерения датчиков *4* и *9* обрабатываются блоком «Кобра 3» (на рисунке показан цифрой *6*) и передаются на ПК (на рис. 4-1А.2 не показан) через информационный кабель *10*.

Обозначения к рис. 4-1А.3: *1* – модульный порт; *2* – аналоговый вход 1; *3* – порт для датчиков; *4* – аналоговый вход 2; *5* – световой

барьер; 6 – таймер-счетчик 1; 7 – таймер-счетчик 2; 8 – выход фиксированного напряжения.

Соберите установку согласно рис. 4-1А.2 и 4-1А.3 (может оказаться, что схема уже собрана, тогда нужно приступить к измерениям).

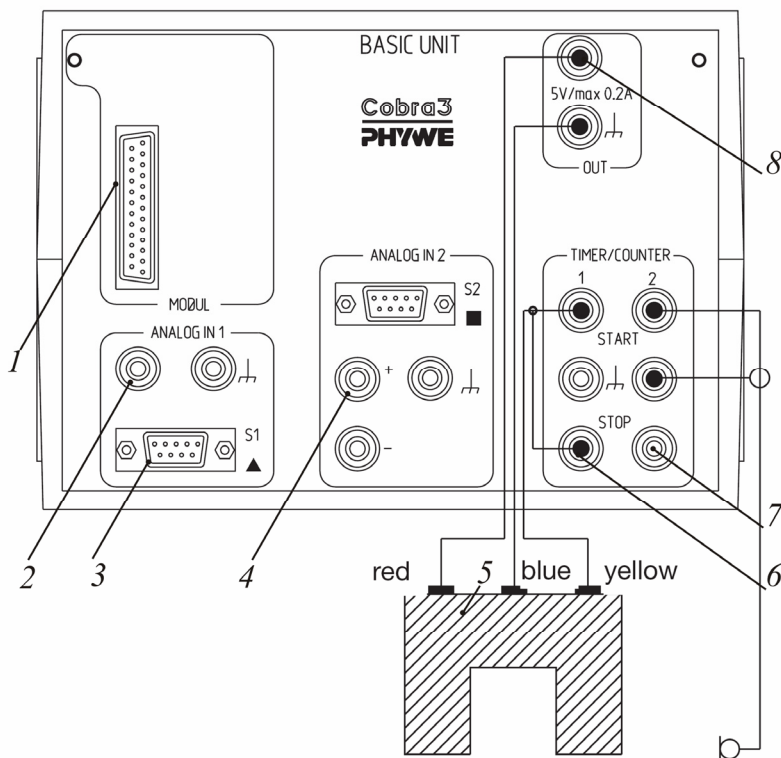


Рис. 4-1А.3

Включите генератор. Для получения стабильного сигнала генератор должен «прогреться» в течение не менее 10 мин.

1. Прежде чем включить питание схемы, необходимо проверить правильность ее монтажа, правильность начальных положений различных регулировок, а также подготовиться к проведению измерений. Не оставлять установку включенной без присмотра.

2. К установке прилагаются два источника тока. Внешне они очень похожи. Следует учитывать, что установка «Кобра 3» запитывается источником напряжением 12 В, генератор – напряжением 5 В.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Не касаться оголенных проводов.

Не допускать прямого направления источников звука на слуховые органы.

ЗАДАНИЕ 1

Изучение эффекта Доплера для случая неподвижного наблюдателя и движущегося источника

1. Расположите систему светового барьера так, чтобы он не мешал движению тележки с экраном. Запустите программу Measure и в ней «Время/Счетчик» и установите параметры для измерения частоты в соответствии с рис. 4-1А.4. Для этого войдите в меню «Прибор» и выделить опцию «Кобра 3 – Таймер/ Счетчик».

В верхнем меню нажать клавишу «Счетчик», после чего на экране появится панель для установки параметров (см. рис. 4-1А.4). На ней в разделе «Начало» активируйте опцию «Нажатием клавиши». В правом верхнем углу панели активируйте верхнюю клавишу «Триггер». Интервал времени выбрать 1 с, чтобы измеряемое число периодов соответствовало частоте. Нажмите клавишу «Далее». Поместите тележку с источником звука на некотором расстоянии правее приемника. Измерьте частоту колебаний источника ν_0 (при неподвижном источнике) $n = 5-7$ раз, нажимая на клавиатуре клавишу «Пробел». При этом на экране в правом столбце можно наблюдать измеренные значения частоты, результаты занести в заранее подготовленную табл. 4-1А.1 в строку ν_0 . Они должны быть практически одинаковыми.

2. Затем, с помощью специального рычажка на тележке установить небольшую мощность механизма, приводящего тележку в движение. Поместите тележку на правый конец трека и отпустите (для этого нужно перевести рычаг включения мотора в положение «Влево»). Когда скорость тележки станет примерно постоянной,

измерьте частоту звуковой волны, нажимая на клавиатуре клавишу «Начать». Область измерения не должна располагаться очень близко к источнику. Следите при этом за результатами измерений частоты в правой колонке на экране. Измерения проведите n раз. В моменты, когда тележка движется к неподвижному приемнику ультразвуковой волны, измеряемые частоты должны быть больше величины ν_0 на некоторую величину.

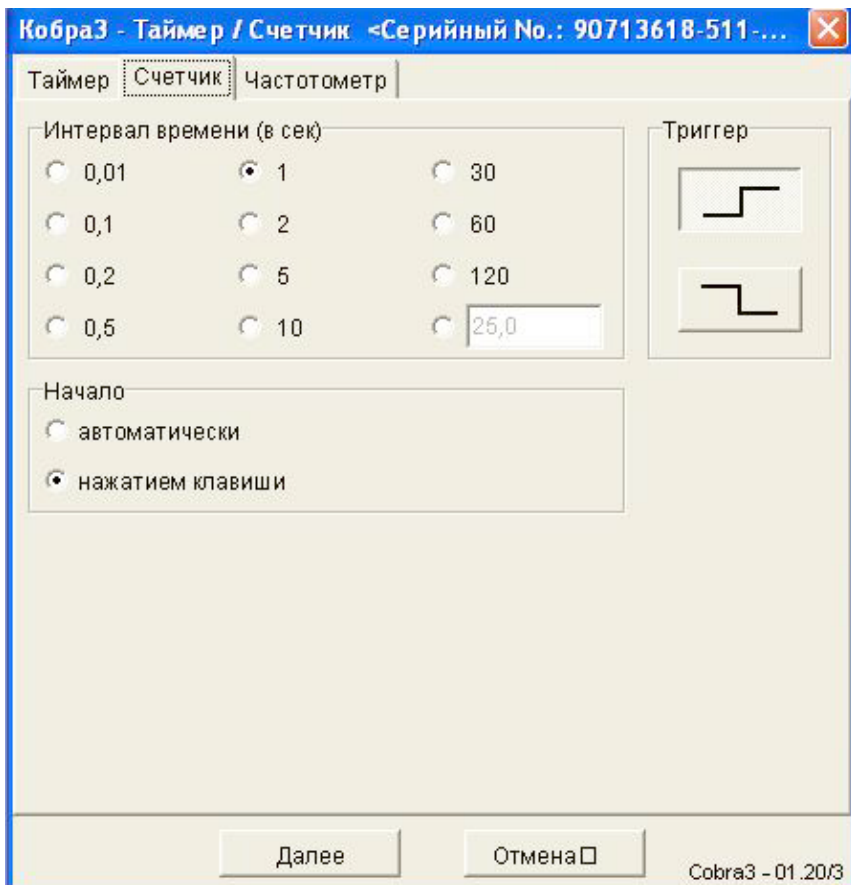


Рис. 4-1А.4

Таблица 4-1А.1

№	ν_0 , Гц	ν , Гц	V_T , м/с
1			
2			
...			

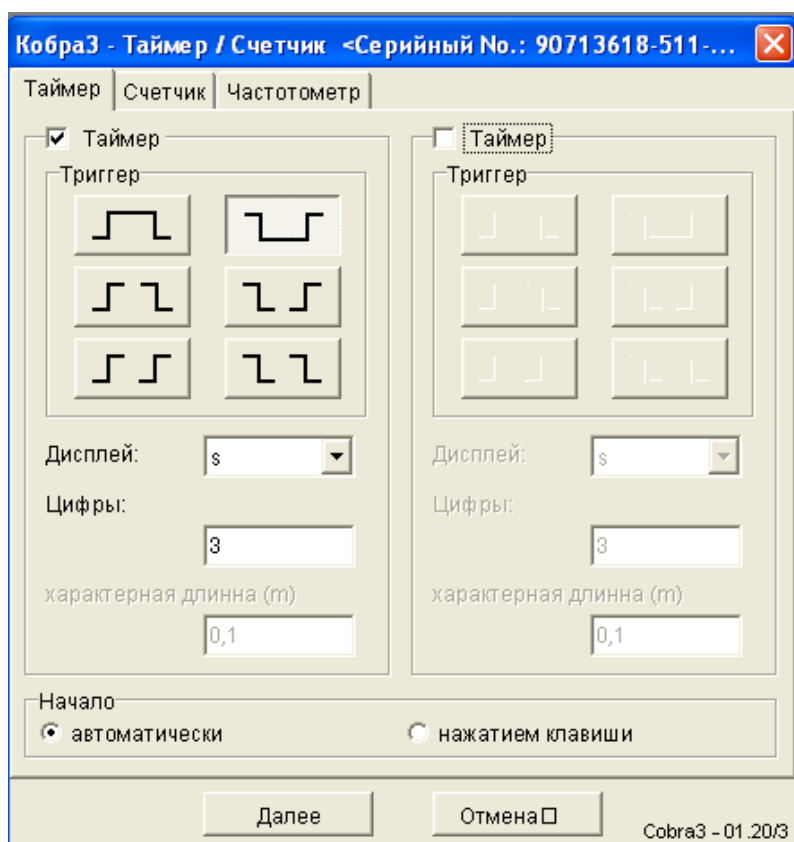


Рис. 4-1А.5

3. Полученные результаты занести в табл. 4-1А.1 (малая мощность) в строку v (отметим, что в рассматриваемой постановке опытов скорость тележки совпадает с относительной скоростью движения приемника и источника).

В случае сильного разброса в значениях скоростей замените батарейку тележки.

4. После проведения серии измерений частоты, не меняя положения рычага на тележке, выполните серию из n измерений скорости тележки. Для этого снова войдите в программу Measure, «Прибор», «Кобра 3 – Таймер/Счетчик», «Таймер». На экране появится панель для установки параметров, как показано на рис. 4-1А.5. Поставьте галочку напротив слова «Таймер» в левом верхнем углу панели, при этом активируйте правый верхний триггер, старт «Автоматический».

Установите световой барьер так, чтобы экран, расположенный на тележке, проходил в зазоре, не задевая края системы светового барьера. Установите тележку в правом конце скамьи, включите двигатель «Влево», тележка придет в движение и на экране автоматически запишется среднее значение скорости. Занесите полученные результаты в табл. 4-1А.1 в строку V_T .

5. Проведите измерения, аналогичные пп. 2–4, для движения источника от приемника. Для этого установите тележку в конце скамьи рядом с приемником, включите двигатель в положении «Вправо», не меняя мощности. Если тележка движется от неподвижного приемника, измеряемые частоты должны быть меньше v_0 . Результаты занесите в таблицу, построенную аналогично табл. 4-1А.1.

6. Проведите измерения, аналогичные пп.1–5, еще при двух различных скоростях тележки (средняя, высокая). Измерения эффекта сдвига частоты (эффект Доплера) и скорости тележки надо проводить при ее равномерном движении. Результаты занесите в таблицы, построенные аналогично табл. 4-1А.1 для средней и большой мощности соответственно.

ЗАДАНИЕ 2

Изучение эффекта Доплера для случая неподвижного источника и движущегося наблюдателя

Повторите процедуру измерения скорости тележки V_T и воспринимаемой приемником частоты ν , поменяв расположение источника и приемника (задание 2 аналогично заданию 1), т.е. соберите установку для случая неподвижного источника и подвижного наблюдателя. Для этого поменяйте местами приемник и излучатель. Повторите все измерения как в предыдущем задании. Занесите полученные результаты в таблицы, построенные аналогично табл. 4-1А.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Полученные в заданиях 1 и 2 результаты следует обработать, определив для каждой мощности двигателя (небольшой, средней и высокой) усредненные значения частоты при неподвижных источнике и приемнике ν_0 ; усредненные значения воспринимаемой приемником частоты в случае относительного движения приемника и источника ν ; а также усредненные значения скорости тележки V_T . Занесите полученные результаты в табл. 4-1А.2 и 4-1А.3.

Таблица 4-1А.2

Результаты	Движение к приемнику			Движение от приемника		
Усредненная частота (источник и приемник покоятся) $\langle v_0 \rangle$, Гц						
Усредненная скорость источника $V_{\text{и}} = \langle V_{\text{т}} \rangle$, м/с						
Усредненная частота, воспринимаемая приемником $\langle v \rangle$, Гц						

Таблица 4-1А.3

Результаты	Движение к источнику			Движение от источника		
Усредненная частота (источник и приемник покоятся) $\langle v_0 \rangle$, Гц						
Усредненная скорость приемника $V_{\Pi} = \langle V_T \rangle$, м/с						
Усредненная частота, воспринимаемая приемником $\langle v \rangle$, Гц						

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Результаты обработки экспериментальных данных занесите в таблицы, построенные в разделе «Обработка результатов измерения», соответственно, для трех значений скорости тележки. Произвести сопоставление полученных для частоты ν результатов с данными расчета по формуле (4-1А.2), считая известными величины исходной частоты ν_0 , скорости звука $V = 340$ м/с и относительной скорости источника и приемника V_T .

Построив графики зависимости $|\nu - \nu_0|$ от $V_{\text{и}}$ и $V_{\text{п}}$, определите величину скорости звука V по коэффициенту наклона прямых. Сравните ее величину с указанной ранее в практикуме.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое волна?
2. Что такое упругая среда?
3. Что такое звуковые волны?
4. Что такое ультразвук?
5. Напишите уравнение плоской звуковой волны с частотой ω , распространяющейся в положительном направлении оси x с фазовой скоростью V .

6. Покоящийся источник испускает в направлении приемника звуковую волну с частотой ν_0 . Какую частоту воспринимает приемник, если источник движется по направлению к приемнику со скоростью, равной половине скорости звука?

7. Покоящийся источник испускает в направлении приемника звуковую волну с частотой ν_0 . Какую частоту воспринимает приемник, если источник движется от приемника со скоростью, равной половине скорости звука?

8. Неподвижный приемник воспринимает звуковые колебания от движущегося источника. С какой скоростью и в каком направлении должен двигаться источник (к приемнику или от него), чтобы воспринимаемая частота была равна $1,5 \nu_0$?

9. Опишите порядок выполнения работы.

10. Что представляет собой график зависимости частоты, воспринимаемой неподвижным приемником, от скорости источника.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. М.: Дрофа, 2007.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Волны. Оптика. Кн.4. М.: АСТ Астрель, 2008.

Дополнительная

3. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы: учебное пособие для вузов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.

Р а б о т а 4-2А

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Цель: изучение явлений интерференции, отражения и стоячих звуковых волн.

Оборудование: динамик; микрофон; блок питания; генератор сигналов звуковой частоты; датчик линейных перемещений; блок «Кобра 3»; персональный компьютер (ПК); штативы; металлический экран; линейка.

ВВЕДЕНИЕ

Под *звуковыми волнами* обычно понимают упругие волны, распространяющиеся в воздухе или другой упругой среде под влиянием механических колебаний какого-либо тела. Человеческое ухо воспринимает распространяющиеся в среде упругие волны с частотой приблизительно от 16 Гц до $16 \div 20$ кГц – *звуковой диапазон*. Колебания с более высокой частотой, не воспринимаемые человеческим ухом, обычно называют *ультразвуком*. Колебания с частотами ниже звукового диапазона часто называют *инфразвуковыми*.

При распространении упругой волны частицы среды совершают движения около своих положений равновесия. Среду при этом следует рассматривать как сплошную и непрерывную, отвлекаясь от ее атомистического строения. Различают волны *продольные* и *поперечные*, в зависимости от того, движутся ли частицы вдоль или поперек направления распространения волны. Звуковые волны являются продольными, т.е. частицы воздуха колеблются вдоль направления распространения волны.

При распространении в упругой среде одновременно нескольких волн возникает их наложение, причем волны не возмущают друг друга: колебания частиц среды оказываются векторной суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности. Это называется *принципом суперпозиции* (наложением) волн. В результате наложения волн одинаковой частоты, возникает *интерференция*. Явление интерференции состоит в сложении двух (двухлучевая интерференция) или более (многолучевая интерференция) когерентных волн, в результате которого происходит перераспределение интенсивности волн.

нового поля. Так в некоторых местах области наложения волн интенсивность оказывается больше, в других – меньше суммы интенсивностей складываемых волн. В работе изучается двухлучевая интерференция.

Пусть в пространстве распространяется плоская звуковая волна, смещение слоев газа ξ в которой описывается следующим выражением:

$$\xi(x, t) = a \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (4-2A.1)$$

где ω – циклическая (круговая) частота; k – волновое число (эти две величины связаны между собой и скоростью распространения волны v соотношением $v = \omega/k$); φ_0 – начальная фаза. Аргумент косинуса

$$\varphi = \omega t - kx + \varphi_0$$

называется *фазой волны*.

Интенсивность упругой волны определяется амплитудой избыточного давления p'_m , которая прямо пропорциональна амплитуде смещения a :

$$I = \langle w \rangle_\tau v = \frac{\langle p'^2 \rangle_\tau}{\rho_0 v} = \frac{p_m'^2}{2\rho_0 v},$$

где время усреднения прибора $\tau \gg T$ ($T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период колебаний звуковой волны); ρ_0 – равновесная плотность среды.

При наложении двух волн смещение в точке, задаваемой радиусом-вектором $\vec{r}$, в силу малости возмущения среды определяется суперпозицией волн

$$\xi(\vec{r}, t) = a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2, \quad (4-2A.2)$$

где φ_1 и φ_2 – фазы колебаний волн в точке наблюдения.

Для волн с равными амплитудами $a_1 = a_2 = a$ и одинаковыми частотами интенсивность:

$$I = 2I_0 (1 + \cos \Delta\varphi), \quad (4-2A.3)$$

где I_0 – интенсивность одной волны.

В (4-2А.3) разность фаз $\Delta\varphi$ зависит только лишь от разности начальных фаз и разности хода $\Delta = r_2 - r_1$ первой и второй волн. При этом из (4-2А.1) разность фаз и разность хода связаны друг с другом:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - k\Delta.$$

Для наблюдения интерференции используется установка, схема которой представлена на рис. 4-2А.1, где изображены источники S_1 и S_2 , представляющие собой акустические излучатели (динамики), создающие звуковые волны, наблюдаемые в точке P , в которой помещен приемник. Если источники S_1 и S_2 синфазны, т.е. начальные фазы колебаний совпадают, разность фаз (4-2А.3) зависит исключительно от разности хода.

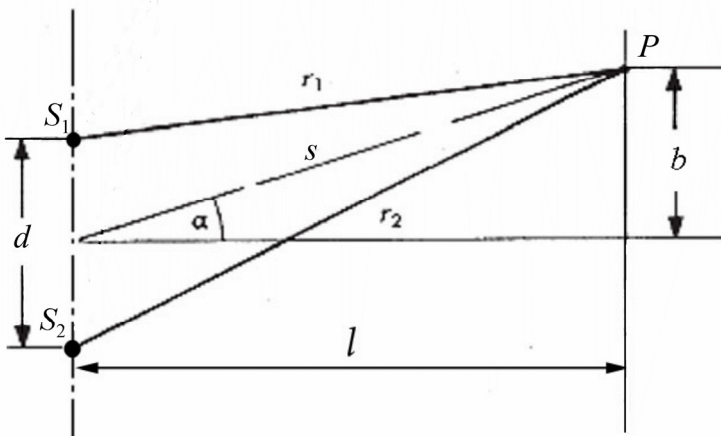


Рис. 4-2А.1

Из (4-2А.3) следует, что максимальная интенсивность будет наблюдаться в случае, если разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi n$, а разность хода

$$\Delta = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-2А.4)$$

где введено обозначение $\lambda = 2\pi/k$ – длина волны. Соответственно, минимумы –

$$\Delta = \frac{(2n+1)\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-2A.5)$$

Учитывая, что

$$\sin \alpha = a/s, \quad (4-2A.6)$$

найдем связь разности хода и положения точки наблюдения P :

$$\Delta = d \sin \alpha = \frac{bd}{s}. \quad (4-2A.7)$$

Интенсивность в точке наблюдения P

$$I = 2I_0 (1 + \cos(kd \sin \alpha)), \quad (4-2A.8)$$

где I_0 – интенсивность, создаваемая одним источником.

Комбинируя (4-2A.4) и (4-2A.5) с (4-2A.7) получим, что положения максимумов будет определяться соотношением

$$b_{\max} = l \operatorname{tg} \arcsin\left(\frac{\lambda n}{d}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4-2A.9)$$

а минимумов

$$b_{\min} = l \operatorname{tg} \arcsin\left(\frac{\lambda(2n-1)}{2d}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4-2A.10)$$

соответственно.

Стоячие волны. Стоячие волны образуются при сложении двух бегущих в противоположных направлениях волн. Экспериментально такое явление наблюдается при сложении падающей на препятствие и отраженной от этого препятствия волны. Если отражение происходит без потерь энергии (внутри препятствия звуковая волна не распространяется), то амплитуды падающей и отраженных волн будут одинаковы. Таким образом, результирующая волна будет описываться следующим выражением:

$$\xi(x, t) = a \cos(\omega t - kx) + a \cos(\omega t + kx + \alpha), \quad (4-2A.11)$$

где сдвиг фазы α равен либо нулю, при отражении от границы с менее плотной средой, либо π при отражении от границы с более плотной средой. При отражении воздушной звуковой волны от металлического препятствия $\alpha = \pi$, используя правила сложения три-

гонометрических функций, преобразуем (4-2А.11) к следующему виду:

$$\xi(x, t) = 2a \sin(kx) \sin(\omega t). \quad (4-2А.12)$$

Полученное выражение можно интерпретировать как набор осцилляторов с амплитудой, зависящей от координаты, пропорционально выражению $\sin(kx) = \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$.

При этом из (4-2А.12) следует, что максимальные значения амплитуды будут наблюдаться (с точностью до выбора начала отсчета) в точках

$$x_{\max} = \frac{n+1/2}{2} \lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-2А.13)$$

Эти точки называются *пучностями* стоячей волны.

А минимальные значения амплитуды (так называемые узлы) будут наблюдаться в точках

$$x_{\min} = \frac{n}{2} \lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-2А.14)$$

Эти точки называются *узлами* стоячей волны.

Из формул (4-2А.13) и (4-2А.14) следует, что расстояние между соседними пучностями, так же как и расстояние между соседними узлами, равно $\lambda/2$. Пучности и узлы сдвинуты друг относительно друга на четверть длины волны.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для изучения волновых свойств звука представлена на рис. 4-2А.2

Два акустических излучателя, в качестве которых в работе используются динамики 1 и 2, подключаются параллельно или последовательно к генератору сигналов звуковой частоты 3. Сигнал детектируется высокочувствительным микрофоном 5. Крепление микрофона позволяет перемещать его в направлении, перпендикулярном направлению распространения волн вдоль линейки 8, которая кроме роли направляющей позволяет производить грубую

оценку величины линейного перемещения датчика. Точное измерение перемещения производится датчиком линейных перемещений 7, который представляет собой устройство, преобразующее линейные перемещения частей установки во вращение датчика. Таковое преобразование происходит за счет нити, перекинутой через ролик датчика, один конец которой прикреплен к перемещаемой части, а другой свободно свисает. Причем на свободном конце имеется грузик для предотвращения проскальзывания нити. Измерения датчиков 5 и 7 обрабатываются 6 – блоком «Кобра 3» и передаются на персональный компьютер (ПК) (на рис. 4-2А.2 не показан) по интерфейсу RS232, где визуализируются специализированным программным пакетом. Для получения стоячих звуковых волн используется металлический экран 4.

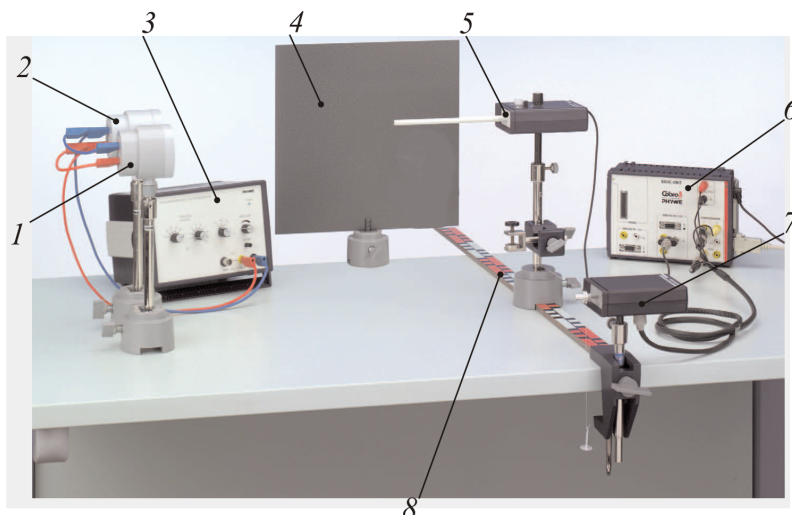


Рис. 4-2А.2

Внимание! Строго воспрещается:

прилагать излишние усилия при коммутации и отсоединение разъемов;

передвигать штатив с микрофоном с большой скоростью, во избежание разрыва нити;

запускать на ПК программное обеспечение, кроме рекомендованного в описании работы;

соединять с ПК носителей без прямого разрешения преподавателя или дежурного сотрудника;
допускать громкие звуки при проведении измерений.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Не касаться оголенных проводов.

Не допускать прямого направления источников звука на слуховые органы.

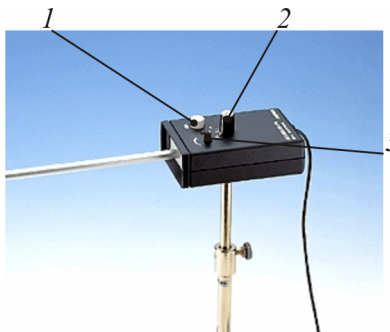
ЗАДАНИЕ 1

Изучение интерференции звуковых волн

1. Соберите экспериментальную схему для изучения интерференции, для чего расположить напротив линейки δ с приемником 5 излучатели 1 и 2 (см. рис. 4-2А.2).

2. Установите на генераторе 3 частоту 20 кГц. Обратите особое внимание на неизменность частоты в процессе проведения работы.

Рис. 4-2А.3



3. Включите микрофон кнопкой 1 (см. рис. 4-2А.3). Обратите внимание, что в процессе выполнения работы в случае длительного отсутствия сигнала на микрофоне он автоматически отключается. В таком случае необходимо его повторно включить нажатием кнопки 1. Переключатель 2 должен быть в положении **---**. Чувствительность регулируется рукояткой 3 в процессе выполнения работы таким образом, чтобы показания «Напряжение/V» не превышало 2,5 В.

4. Измерьте зависимость интенсивности от перемещения датчика. Для этого необходимо запустить программу  Measure и вы-

брать в меню «Прибор» вариант «Кобра 3 Сила/Тесла», после чего появится экран настроек (рис. 4-2А.4).

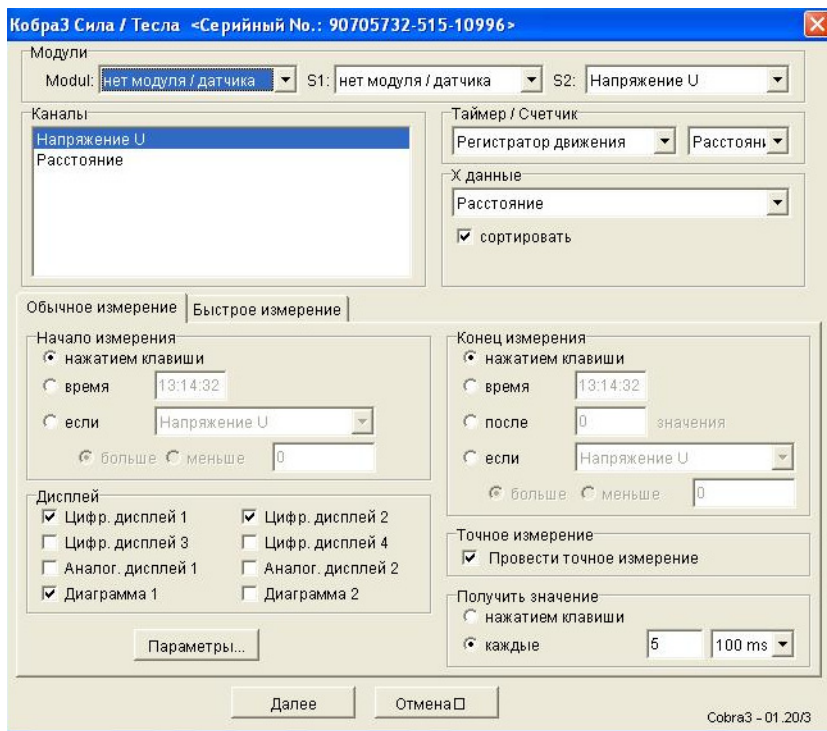


Рис. 4-2А.4

На рис. 4-2А.4 приведены настройки датчиков. После этого необходимо произвести калибровку датчика линейных перемещений. Для этого вызовите окно параметров, выбрав в окне настроек прибора кнопку «Параметры...» (рис. 4-2А.5).

В этом окне задайте параметр «Калибровочное расстояние» (пример на рис. 4-2А.5) и нажать «Старт». После это плавным движением переместите штатив с микрофоном 5, отсчитав по линейке 8 указанное калибровочное расстояние. После этого перейдите на вкладку «Калибрование» (рис. 4-2А.6), где нажать кнопку «Калиб-

ровать». В случае неудачного перемещения нажмите кнопку «Сброс» и повторите процедуру калибровки.

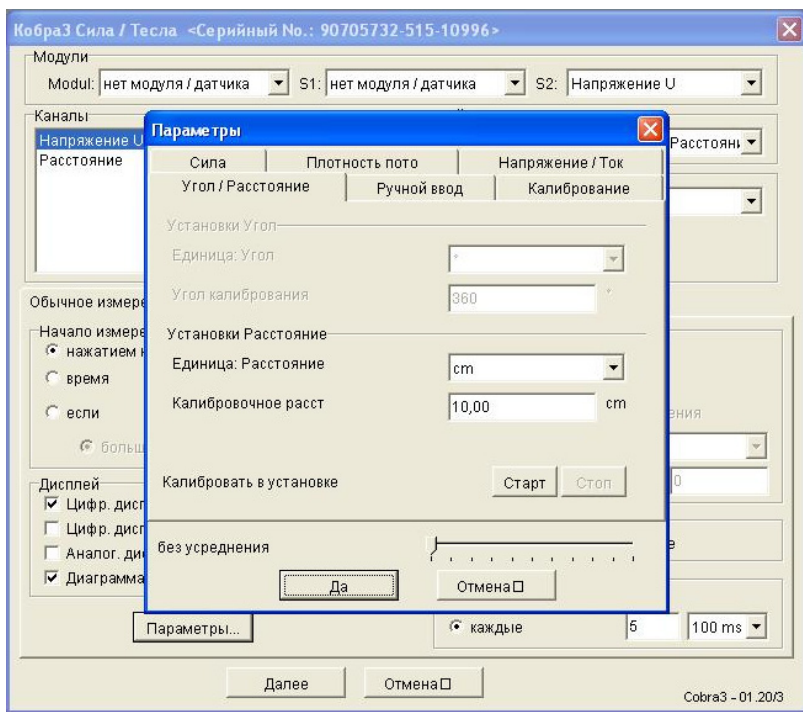


Рис. 4-2А.5

После удачной калибровки можно приступать к измерениям. Данная программа позволяет производить измерения двумя способами: снимая показания равномерно по времени, с заданными интервалами (чему соответствует выбор radio-button «Каждые» в блоке «Получить значение» на рис. 4-2А.4).

При выборе этой опции необходимо, нажав кнопку «Начать измерение» (рис. 4-2А.7), плавно перемещайте датчик 5 вдоль линейки δ , после чего нажмите кнопку «Закончить измерение». При этом на дисплее ПК отобразится график зависимости интенсивности от расстояния. Скорость перемещения подбирается опытным путем, исходя из критерия непрерывности и гладкости линии на графике.

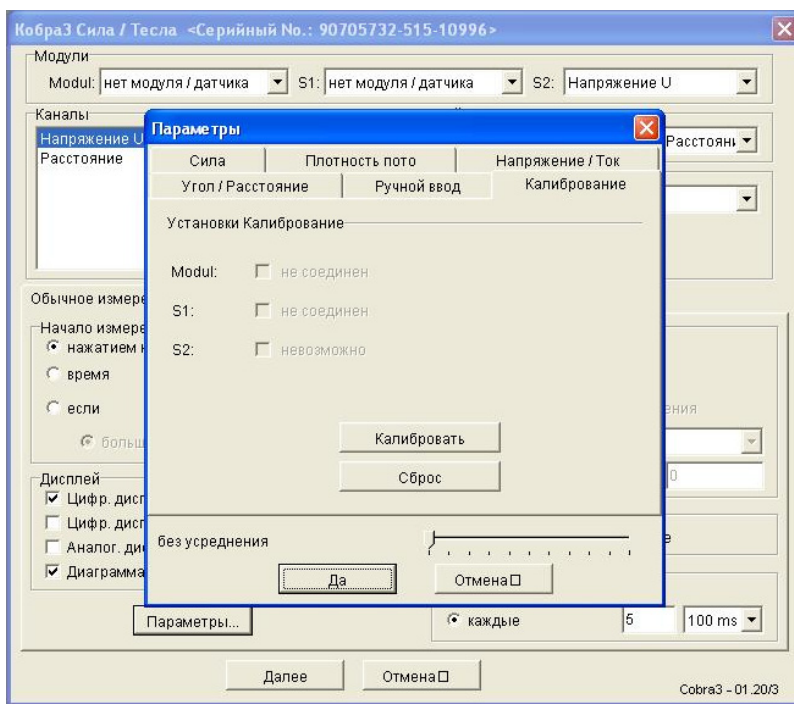


Рис. 4-2А.6

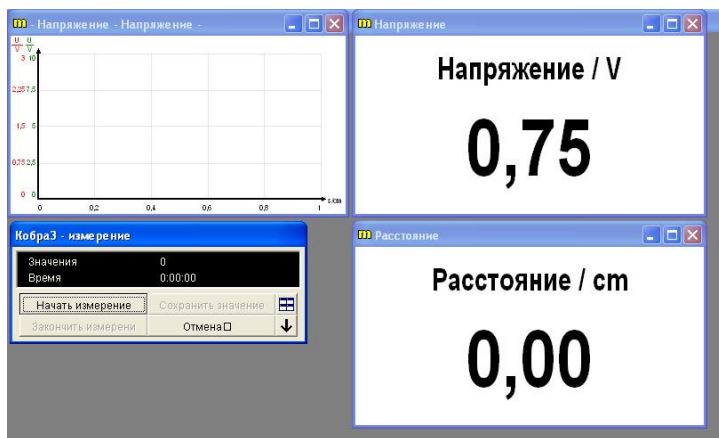


Рис. 4-2А.7

Если удовлетворительного вида графика достичь не удалось, рекомендуется выбрать radio-button нажатием клавиши в блоке «Получить значение» и проводить измерения, передвигая датчик на фиксированный интервал 3–5 мм, выжидая после каждого перемещения около 30 с для устранения влияния паразитных шумов, являющихся вследствие вибраций, возникающих при перемещении.

5. Измерьте линейкой расстояние между источниками d и расстояние l между осью S_1S_2 и линией, вдоль которой перемещается датчик.

ЗАДАНИЕ 2

Изучение стоячих звуковых волн

1. Соберите экспериментальную схему для изучения стоячих волн. Схема установки для изучения стоячих волн представлена на рис. 4-2А.8. В данном случае используется один динамик, установленный напротив экрана. Как и в предыдущем опыте, интенсивность фиксируется микрофоном 5, а перемещения – датчиком линейных перемещений 7. Роль блока «Кобра 3» и генератора остаются неизменными.

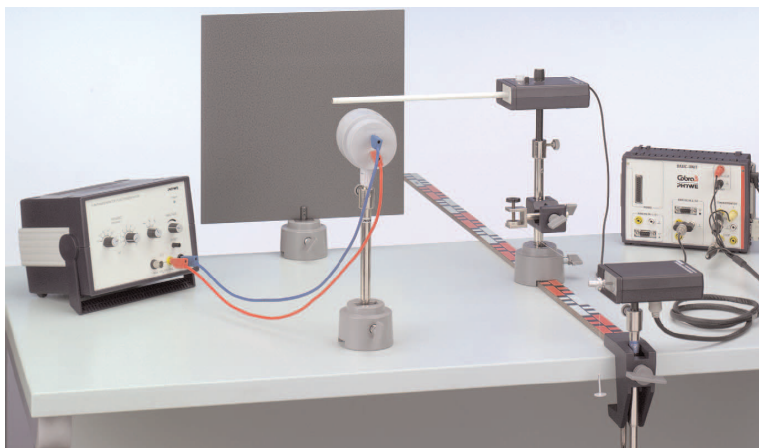


Рис. 4-2А.8

2. Измерьте зависимость интенсивности от перемещения датчика, аналогично п. 2 задания 1.

3. Что такое стоячая волна?
4. Что такое разность хода?
5. Как разность хода связана с разностью фаз?
6. Как изменится интерференционная картина, если на динамики подать сигнал с разных генераторов (частоты приблизительно одинаковы)?
7. Какое влияние оказывает на распределение интенсивности в стоячей волне изменение расстояния между динамиком и экраном?
8. Как изменится интерференционная картина, если увеличить расстояния между динамиками?
9. Можно ли получить стоячую волну, если экран оклеить мехом?
10. В чем состоит цель процедуры калибровки датчика перемещений?
11. Какие величины являются прямо измеряемыми в задании 1 настоящего эксперимента?
12. Какие величины являются прямо измеряемыми в задании 2 настоящего эксперимента?
13. Какие источники систематической погрешности имеются в работе?
14. Записать приближенное выражение для положения интерференционных максимумов для случая, когда расстояние от источников до экрана много больше расстояния между источниками.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы: учебное пособие для вузов. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Волны. Оптика. Т. 4. М.: АСТ Астрель, 2008.

Дополнительная

3. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 4. Кинетика. Теплота. Звук. М.: Либроком, 2009.

Работа 4-3А

ФАЗОВАЯ И ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТИ

Цель: изучение продольных волн, определение фазовой и групповой скорости ультразвука в жидкости.

Оборудование: ультразвуковой генератор; осциллограф; кювета с жидкостью; источник; стеклянная пластинка с микрофоном.

ВВЕДЕНИЕ

Если в каком-либо месте упругой среды возбудить колебание ее частиц, то вследствие взаимодействия между ними это колебание начнет распространяться в среде от частицы к частице. Процесс распространения колебаний в среде называется *волной*.

Звуковыми, или *акустическими*, называются волны, существование которых обусловлено упругими силами, возникающими при деформации среды. Звуковая волна сжатия и разрежения характеризуется рядом изменяющихся в пространстве с течением времени параметров. Это – избыточное давление $p' = p - p_0$, где p – давление в возмущенной среде, p_0 – среднее или равновесное давление;

смещение частиц среды $\vec{\xi}$; скорость этих частиц $\vec{u} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t}$. Звуковая волна сопровождается также отклонением плотности $\rho' = \rho - \rho_0$ от ее равновесного значения ρ_0 . При распространении возмущений в среде считается, что отклонения давления и плотности от их равновесных значений мало: $\rho' \ll \rho_0$, $p' \ll p_0$.

Уравнения гидродинамики идеальной сжимаемой жидкости, описывающие распространение малых возмущений, можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} &= -\frac{\nabla p'}{\rho_0}, \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{u} &= 0. \end{aligned} \tag{4-3А.1}$$

Легко увидеть физический смысл уравнений: первое уравнение представляет собой второй закон Ньютона, записанный для физически бесконечно малого объема жидкости; а второе – уравнение неразрывности, представляющее собой закон сохранения массы.

Давление в среде, в общем случае, является функцией не только плотности, но и температуры $p = p(\rho, T)$. Практически реализуется случай адиабатического распространения возмущений, т. е.

$$p' = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_S \rho' \quad (\text{где } S - \text{энтропия}).$$

Подставив связь избыточного давления с отклонением плотности в (4-3А.1), получим волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p', \quad (4-3А.2)$$

где $c = \sqrt{\left(\frac{dp}{d\rho} \right)_S}$ имеет смысл скорости распространения возмущения.

Волновому уравнению (4-3А.2) также удовлетворяют другие характеристики ξ , $\vec{u}$, ρ' .

Простейшим видом волнового движения является *плоская волна*: возмущение жидкости в этом случае одномерно, и волновое уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}. \quad (4-3А.3)$$

Его решение для плоской монохроматической волны, распространяющейся в положительном направлении оси x , примет вид

$$p' = p'_m \cos(\omega t - kx), \quad (4-3А.4)$$

где p'_m – амплитуда избыточного давления; $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

Дисперсия волн – явление, обусловленное зависимостью скорости распространения волны от длины волны (или частоты):

$$v = f(\lambda). \quad (4-3А.5)$$

Большинство веществ в той или иной степени обладают дисперсией.

Строго монохроматическая волна – это идеализация. Таких волн в природе нет. Любая реальная волна, согласно теореме Фурье, может быть представлена как суперпозиция монохроматических волн с различными амплитудами и частотами ω в некотором интервале $\Delta\omega$. Суперпозицию волн, мало отличающихся друг от друга по частотам ($\Delta\omega \ll \omega$), называют *волновым пакетом*, или *группой волн*. Вид волнового пакета в некоторый момент времени показан на рис. 4-3А.1. В его пределах монохроматические составляющие усиливают друг друга, вне пакета практически гасят друг друга.

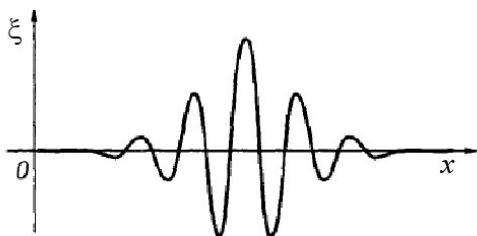


Рис. 4-3А.1

В отсутствии дисперсии все монохроматические волны, образующие пакет, распространяются с одинаковой *фазовой скоростью* v , с которой распространяется определенное значение фазы $(\omega t - kx)$ волны:

$$v = c = \frac{\omega}{k}, \quad (4-3А.6)$$

Если предположить среду совершенно бездисперсионной, то в такой среде именно с этой скоростью распространяется и сам волновой пакет, не изменяя своей формы.

В диспергирующей же среде волновой пакет расплывается, поскольку скорости его монохроматических составляющих отличаются друг от друга, и понятие скорости такой волны требует уточнения.

Если дисперсия достаточно мала, расплывание волнового пакета происходит не слишком быстро. В этом случае волновому пакету

можно приписать скорость u , с которой перемещается его «центр тяжести». Это так называемая *групповая скорость*. Соответствующий расчет дает, что групповая скорость определяется как:

$$u = \frac{d\omega}{dk}. \quad (4-3A.7)$$

Поясним эту формулу на примере суперпозиции двух волн с одинаковой амплитудой и несколько отличными друг от друга длинами волн (и частотами). На рис. 4-3A.2,*а* показано их относительное расположение в некоторый момент времени, а на рис. 4-3A.2,*б* – результат их суперпозиции – один период биения. Нас будет интересовать скорость, с которой перемещается место с максимальной амплитудой – это и будет скорость волнового пакета – групповая скорость. Определим ее величину.

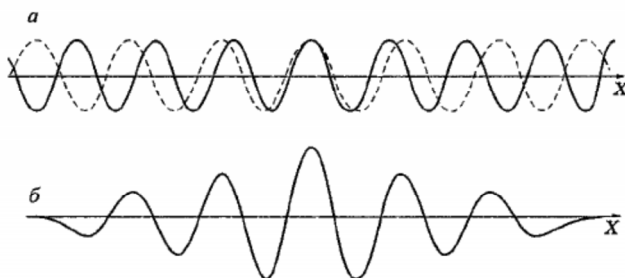


Рис. 4-3A.2

Пусть уравнения этих двух монохроматических волн имеют вид

$$\begin{aligned} \xi_1 &= A \cos(\omega t - kx), \\ \xi_2 &= A \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x]. \end{aligned}$$

В результате их наложения образуется суммарная волна:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos \frac{td\omega - xdk}{2} \cos(\omega t - kx). \quad (4-3A.8)$$

Выражение (4-3A.8) можно рассматривать как уравнение монохроматической волны, амплитуда которой меняется по закону:

$$A_0 = 2A \cos \frac{td\omega - xdk}{2}. \quad (4-3A.9)$$

Отсюда следует, что точки, соответствующие, например, максимуму амплитуды, движутся по закону:

$$td\omega - xdk = 0. \quad (4-3A.10)$$

Откуда $x = \left(\frac{d\omega}{dk} \right) t$. Величина в скобках и есть групповая скорость.

Выражение для групповой скорости можно представить в ином виде. Заменяя ω через $v k$ согласно (4-3A.6), получим:

$$u = \frac{d}{dk}(vk) = v + k \frac{dv}{dk}. \quad (4-3A.11)$$

Так как $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и $dk = -\left(\frac{2\pi}{\lambda^2} \right) d\lambda$, то выражение (4-3A.11) можно переписать так:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (4-3A.12)$$

Это так называемая *формула Релея*. Групповая скорость u оказывается меньше фазовой скорости v . В отсутствие дисперсии $\frac{dv}{d\lambda} = 0$, и групповая скорость совпадает с фазовой.

Групповая скорость имеет глубокий физический смысл скорости передачи информации.

Существует простой графический способ нахождения групповой скорости по кривой $v(\lambda)$. Он показан на рис. 4-3A.3. В случае группы волн роль играет только малый участок кривой $v(\lambda)$ в узком диапазоне $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda \ll \lambda$). Отрезок, который отсекает на оси ординат касательная к кривой $v(\lambda)$, проведенная через точку A , равен $v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$, т.е. групповой скорости при данной длине волны λ .

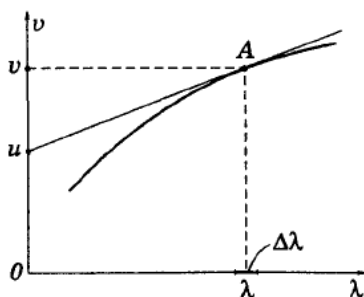


Рис. 4-3А.3

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки показан на рис. 4-3А.4. На оптической скамье 1 установлены рейтеры с держателями, в которых укреплены основные элементы установки. На подставке 2 находится кювета с жидкостью 5. Для предотвращения искажения измеряемых результатов за счет отражения волн задняя стенка кюветы покрыта звукоизолирующим материалом. Ультразвуковая волна в кювете возбуждается при помощи излучателя 4, штатив которого также установлен на оптической скамье. Электрический сигнал с ультразвукового генератора 7 подается на вход «СН1» осциллографа 3 и излучатель 4, который должен плотно прилегать к кювете 5. Необходимо отметить, что для снижения потерь звуковой энергии на пятно контакта между излучателем и кюветой должна быть нанесена вазелиновая смазка. В отверстие столика микрометрической подачи 9 установлен рейтер 8 со стойкой-держателем, на которой прикреплена стеклянная пластина, в которой находится пьезоэлектрический датчик (микрофон) 6.

Избыточное давление ультразвуковой волны создает в пьезоэлектрическом датчике 6 переменное напряжение, которое подается на вход «СН2» осциллографа 3.

Оптическая скамья обеспечивает строгую соосность перемещений элементов установки, а также за счет большой массы оптической скамьи и резиновых ножек – вибрационную защиту эксперимента. Перемещая рейтер 8 с помощью микрометрического винта 9, можно менять положение датчика 6 относительно излучателя. Рейтер 8 обладает необходимыми степенями свободы для юстировки установки, процедура которой описана в задании 1.

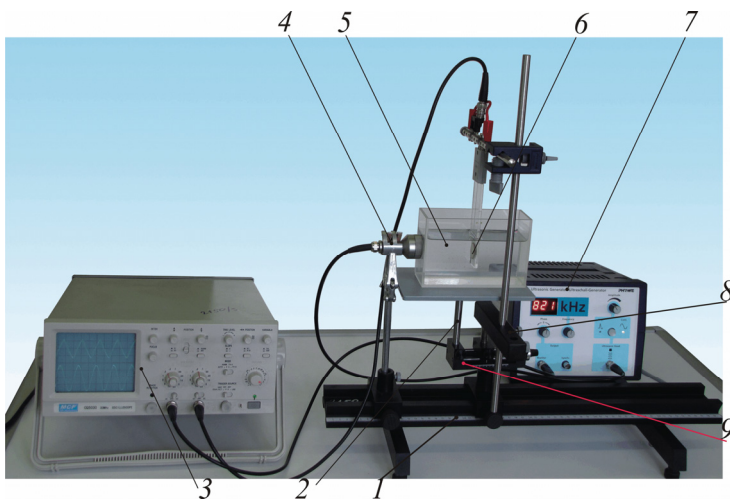


Рис. 4-3А.4

Излучатель 4 должен располагаться ниже уровня воды. Микрофон 6 опущен в воду, так чтобы центр микрофона и излучателя оказались на одной высоте (друг напротив друга).

Для определения фазовой скорости в этой работе используется метод резонанса. Поэтому необходимо отъюстировать положение частей установки таким образом, чтобы стеклянная пластинка с микрофоном 6 была строго параллельна той короткой стороне кюветы, к которой прижат излучатель 4.

Напомним, что *резонанс* – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при приближении частоты внешнего воздействия к некоторым значениям (резонансным частотам), определяемых свойствами системы.

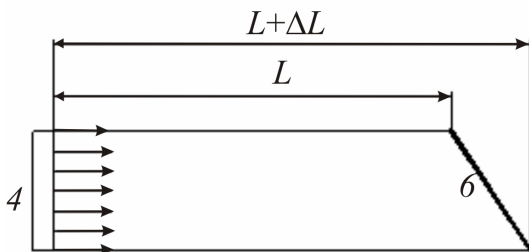


Рис. 4-3А.5

Если источник не параллелен микрофону, то волны отражаются от пластины, в которую закреплен микрофон 6, не обратно к излучателю, а в сторону от него. Следовательно, стоячая волна не образуется, и резонанс не наблюдается. Кроме того, разные точки микрофона находятся на разном удалении от микрофона, и тем самым интенсивность звуковой волны везде разная (рис.4-3А.5). Зрительно это будет выглядеть на осциллографе как искаженная синусоида. Таким образом, критерием юстировки является наблюдение синусоидального сигнала.

Если пластинка с микрофоном 6 параллельна внешней короткой стороне кюветы, между ними возникает стоячая волна, амплитуда которой максимальна, при выполнении условия $L = n\lambda/2$, где n – целое число. На пластине с микрофоном 6 наблюдается пучность давления. Так как на осциллограф подаются два сигнала (с генератора и микрофона), то на экране наблюдаются два колебания (синусоиды) «синфазные», если n – четные; и в «противофазе», если n – нечетные. Максимумам колебаний излучателя соответствуют в первом случае максимумы сигнала с микрофона, а во втором – минимумы.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Не вынимайте провода, не прикасайтесь к шине заземления.
2. Не прилагать больших усилий и резких движений при перемещении рейтеров и юстировки.
3. Не допускать падения кюветы с подставки.
4. Не допускать попадания посторонних предметов или частей одежды в кювету с жидкостью.
5. Не прислонять излучатель к телу.

ЗАДАНИЕ 1

Определение фазовой скорости ультразвука в жидкости

1. Сигнал с выхода «Monitor» ультразвукового генератора подайте на первый канал осциллографа («CH1»), с выхода «Ultrasonic Head» – на излучатель 4, а с датчика 6 – на «CH2» осциллографа. Включите осциллограф. Данный осциллограф имеет два переключателя режимов, обозначенных «MODE». Один из них находится в блоке синхронизации и отвечает за способы синхронизации. Вто-

рой – обеспечивает возможность выбора отображения и находится в блоке управления каналов. Переключатель режимов каналов («MODE», который находится в блоке «position») установите в положение «DUAL», что соответствует одновременному выводу на экран сигналов с обоих каналов, а тумблер «TRIGGER SOURCE» – в положение «CH1», таким образом, синхронизация развертки будет осуществляться по генератору. Переключатель «TIME/DIV» установите на «0,2 μ s».

2. Убедитесь, что излучатель смазан вазелиновой смазкой и прижат к внешней короткой стороне кюветы ниже уровня воды, а микрофон находится на одном уровне с излучателем (см. рис. 4-3А.4).

3. Включите генератор с помощью тумблера «СЕТЬ», который находится на задней панели прибора. Ручку «Amplitude» установите на max. Переключите генератор в синусоидальный режим. На экране осциллографа должно наблюдаться 3–4 периода колебаний.

Проверьте правильность юстировки положения частей установки, чтобы стеклянная пластинка с микрофоном была строго параллельна той короткой стороне кюветы, к которой прижат излучатель.

4. С помощью микровинта установите микрофон на минимально возможное расстояние (3–4 см) от излучателя. Затем, плавно перемещая стойку с микрофоном, с помощью микровинта снять по его шкале первый отсчет x_1 в дел., при котором размах достигает наибольшего значения, появление которого определяется на осциллографе (на экране колебания должны быть практически синфазны). Продолжая перемещать стойку с микрофоном микровинтом, наблюдайте, как максимум сменяется минимумом (при этом размах колебания снова достигает наибольшего значения), а затем обратно. Снимите отсчет x_2 , при котором снова отчетливо наблюдаются синфазные колебания – второй максимум и т.д.

Описание работы с отсчетным устройством микрометрического винта дано в разделе «Методические рекомендации».

Выполнив описанным выше способом десять измерений, верните стойку с микрофоном в исходное положение.

Результаты измерений занесите в табл. 4-3А.1.

5. Подобные измерения произведите при пяти различных частотах в интервале 780–860 кГц с шагом 20 кГц. Результаты измерений занесите в заранее подготовленные таблицы (по образцу табл. 4-3А.1).

Таблица 4-3А.1

$$f = 780 \text{ кГц}$$

№ п/п	i	x_i , дел.	x_i , мм	$\lambda_i = x_{i+1} - x_i$, мм
1	1			
2	2			
3	3			
4	4			
...	...			
10	10			

ЗАДАНИЕ 2

Определение групповой скорости ультразвука в жидкости

1. Подайте с генератора импульсный сигнал. Ручку «Amplitude» поверните против часовой стрелки до щелчка. В случае если на экране осциллографа наблюдается лишь один сигнал, то ручкой $\updownarrow$ «position» канала 1 или 2 передвигайте изображение так, чтобы на экране осциллографа появилось два сигнала одиночных импульсов. Переключателем «VOLTS/DIV» каналов 1 или 2 добейтесь четкого изображения сигналов. Рекомендуется установить переключатель «TIME/DIV» в положение «10 μ s».

2. С помощью микровинта установите микрофон на расстоянии 3–4 см от излучателя. Запишите отсчет этого положения l . Определите по шкале осциллографа время между сигналами с генератора и микрофона в делениях шкалы. Рассчитайте время прохождения импульса t как произведение числа делений на показания переключателя «TIME/DIV». Подобные измерения произведите при шести различных значениях x , через 5,00 мм. Результаты измерений занесите в заранее заготовленную табл. 4-3А.2.

Таблица 4-3А. 2

№ п/п	x , мм	Число делений, дел.	Показания переключателя, с/дел.	t , с	Δt , с
1					
2					
...					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. По полученным экспериментальным данным для каждой из частот вычислите среднее значение длины звуковой волны.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}. \quad (4-3A.13)$$

Оцените величину $\Delta\lambda$ методом Корнфельда:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}, \quad (4-3A.14)$$

где $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ – максимальное и минимальное значение длины волны λ_i соответственно.

Результаты вычислений занесите в табл. 4-3A.3.

Таблица 4-3A.3

№ п/п	f , кГц	$\langle \lambda \rangle$, мм	$\Delta\lambda$, мм	v , м/с	Δv , м/с
1					
2					
...					

2. По формуле

$$v = \langle \lambda \rangle \cdot f \quad (4-3A.15)$$

вычислите фазовую скорость ультразвука в жидкости.

Оцените относительную погрешность результата по формуле:

$$\varepsilon_v \equiv \frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2}. \quad (4-3A.16)$$

Найдите абсолютную погрешность результатов по формуле:

$$\Delta v = v \varepsilon_v. \quad (4-3A.17)$$

В качестве погрешности генератора возьмите 1 кГц.

3. Оцените погрешности микрометрического винта и Δt . В качестве погрешности микрометрического винта возьмите погрешность отсчета по шкале барабана, которая составляет половину цены деления (0,005 мм), а в качестве относительной погрешности t – приборную погрешность осциллографа, которая составляет 5 %.

4. Используя данные табл. 4-3A.2, постройте график зависимости положения микрофона x от времени прохождения импульса t и методом парных точек найдите групповую скорость ультразвука в жидкости u .

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Используя данные табл. 4-3А.3, сравните значения фазовой скорости для различных частот и сделайте вывод о дисперсионных свойствах среды.
2. Постройте график зависимости положения микрофона от времени прохождения импульса.
3. Сравните значения фазовой и групповой скоростей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение фазовой скорости.
2. Дать определение групповой скорости.
3. Фазовая скорость звука в некоторой среде пропорциональна квадрату частоты. Является ли данная среда дисперсионной?
4. В чем роль оптической скамьи?
5. Зачем задняя стенка кюветы покрыта звукоизолирующим материалом?
6. Почему так важна параллельность источника и микрофона?
7. Оценить угол между нормалью к плоскости микрофона и направлением распространения волны, начиная с которого максимумы станут неразличимы.
8. С какой целью используется канал 2 осциллографа в задании 2?
9. Волновой пакет представляет собой два импульса. Как изменится расстояние между этими импульсами после прохождения пакетом слоя дисперсионной среды?
10. Объясните, почему в задании 1 установка работает бесшумно, а при выполнении задания 2 слышится сильный звук?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. Волны. Оптика. М.: Астрель, 2003.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.

Дополнительная

3. Майер В.В. Простая демонстрация стоячей ультразвуковой волны в жидкости. Успехи физических наук. 1972. Т. 107. Вып. 6 С. 321 – 323.

Работа 4-4А

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКЕ

Цель: изучение дифракции Френеля ультразвуковой волны от преграды с кольцевыми отверстиями и определение ее длины волны.

Оборудование: источник ультразвука; зонная пластинка и приемник; расположенные в держателях на оптической скамье; электронный блок-источник питания и цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде, называются *упругими волнами*. В зависимости от частоты различают *инфразвуковые*, *звуковые* и *ультразвуковые* (УЗ) волны. Звуковые волны воспринимаются человеческим ухом и имеют частоту приблизительно от 16 Гц до $16 \div 20$ кГц. Колебания с более высокой частотой – ультразвуковые волны. В настоящее время ультразвук широко применяется в различных областях науки и техники (например, в эхолокации, дефектоскопии и др.).

Дифракция звука – отклонение распространения звука от законов геометрической акустики, обусловленное его волновой природой. Например, в результате дифракции наблюдается расхождение УЗ-пучков при удалении от излучателя или после прохождения через отверстие в экране, проникновение звуковых волн в область тени позади препятствий, больших по сравнению с длиной волны λ , отсутствие тени позади препятствий, малых по сравнению с λ , и т. п. Звуковые поля, создаваемые дифракцией исходной волны на препятствиях, помещенных в среду, на неоднородностях самой среды, а также на неровностях и неоднородностях границ среды, называются *рассеянными полями*. Для объектов, на которых происходит дифракция, больших по сравнению с λ , степень отклонений от геометрической картины зависит от значения волнового параметра $P = \sqrt{\lambda r} / D$, где D – поперечный размер объекта (например, УЗ-излучателя или препятствия); r – расстояние точки наблюдения от этого объекта. Так, вблизи поршневого излучателя звука при $P \ll 1$ («ближняя», или «пржекторная» зона) поле в основном об-

разовано цилиндрическим пучком лучей, исходящих из излучателя, и в пределах пучка имеет в целом характер плоской волны с интенсивностью, постоянной по сечению и не зависящей от расстояния, в соответствии с законами геометрической акустики, а дифракционные эффекты выражаются только в размытии границ пучка. По мере удаления от излучателя дифракционные эффекты усиливаются, и при $P \sim 1$ поле теряет характер плоской волны и представляет собой сложную интерференционную картину. На еще больших расстояниях, при $P \gg 1$ («дальняя» зона), пучок превращается в сферически расходящуюся волну с интенсивностью, убывающей как $1/r^2$, и с угловым распределением интенсивности, не зависящим от расстояния; в этой области поле снова подчиняется законам геометрической акустики. Аналогичная картина наблюдается в пучке, вырезаемом из плоской волны отверстием в экране. При размерах излучателя (или отверстия в экране), малых по сравнению с λ , «прожекторная» зона отсутствует, и звуковое поле представляет собой расходящуюся волну уже на расстояниях порядка λ .

Расчет дифракции звука обычно базируется на *принципе Гюйгенса–Френеля*, согласно которому каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн (принцип Гюйгенса), эти источники когерентны между собой, а испускаемые ими вторичные волны интерферируют.

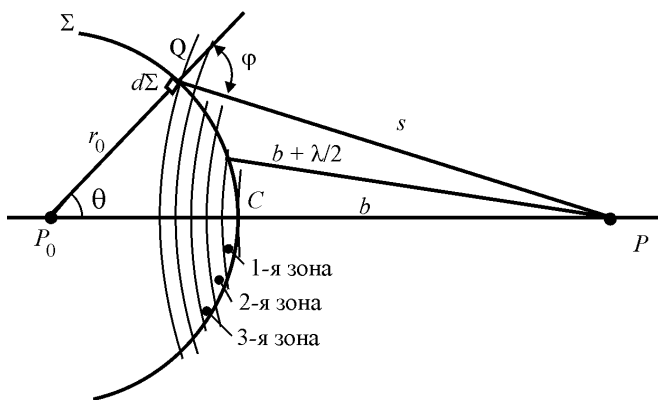


Рис. 4-4А.1

Пусть Σ – мгновенное положение сферического волнового фронта с радиусом r_0 , распространяющегося от точечного источника P_0 (рис. 4-4А.1). Определим амплитуду колебаний поля A_P в точке P .

Комплексную амплитуду колебаний в точке Q волнового сферического фронта представим в виде $a_0 \exp(ikr_0)/r_0$. В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля каждый элемент волнового фронта рассматривается как центр вторичных когерентных сферических волн; вклад в амплитуду dA_P , вносимый элементом поверхности $d\Sigma$, на котором располагается точка Q , запишем в виде

$$dA_P = K(\varphi) \frac{a_0}{r_0} e^{ikr_0} \frac{e^{iks}}{s} d\Sigma, \quad (4-4А.1)$$

где $s = QP$; $K(\varphi)$ – коэффициент наклона, описывающий изменение амплитуды вторичных волн в зависимости от направления; φ – угол между нормалью в точке Q и направлением QP (угол дифракции). При малых углах дифракции $\varphi \ll 1$ можно положить $\cos \varphi \approx 1$ и

$$K(\varphi) \approx K(0) = -ik/2\pi.$$

Разобьем поверхность Σ на такие области, чтобы расстояние от краев каждой области до точки P отличалось на половину длины волны $\lambda/2$ – такие участки волновой поверхности называются *зонами Френеля*. Построим вокруг точки P сферы с радиусами

$$b, b + \lambda/2, b + 2\lambda/2, b + 3\lambda/2, \dots, b + m\lambda/2, \dots \text{ и т.д.,}$$

где $b = CP$, а C – точка пересечения P_0P с волновым фронтом Σ ; m – номер зоны Френеля (см. рис. 4-4А.1).

Амплитуда колебаний A_{P_m} , созданная одной m -й зоной Френеля в точке P , приблизительно равна

$$A_{P_m} \approx (-1)^{m+1} 2A, \quad (4-4А.2)$$

т.е. приблизительно в два раза больше по модулю амплитуды колебаний A от всего волнового фронта. Множитель $(-1)^{m+1}$ в (4-4А.2) показывает, что четные и нечетные зоны создают в точке P противоположные по фазе колебания.

Принципа Гюйгенса–Френеля еще не достаточно для решения дифракционных задач, так как необходимо знать амплитуду A во всех точках замкнутой поверхности Σ .

Поэтому для решения дифракционных задач используются следующие приближения:

1) экран с отверстием (или отверстиями) будем считать плоским и непрозрачным, тогда в качестве поверхности Σ выберем поверхность, покрывающую заднюю неосвещенную сторону экрана;

2) примем, что на всех участках этой поверхности, которые прикрыты экраном, $-A = 0$, а на отверстиях амплитуда $A = A^{(0)}$ определяется законами геометрической оптики, т.е. такая, какая получилась бы в отсутствии экрана. Таким образом, амплитуда в точке P

$$A_P = \int_{\Sigma'} \frac{K(\varphi) \cdot A^{(0)}}{s} \cdot e^{iks} d\Sigma, \quad (4-4A.3)$$

где интегрирование проводится по площади отверстия Σ' .

Данное приближение справедливо, когда размеры отверстий и непрозрачных промежутков между ними велики по сравнению с длиной волны света $d \gg \lambda$ и при углах дифракции $\varphi \ll 1$. Тогда заметная интенсивность наблюдается при малых углах дифракции.

Рассмотрим дифракцию на экране – дифрагирующем элементе Э, имеющим вид квадрата с вырезанными концентрическими кольцами (рис. 4-4A.2). Источник ультразвука S расположен на расстоянии a от экрана Э перед ним, а за ним на удалении b приемник, регистрирующий интенсивность волны в точке S' .

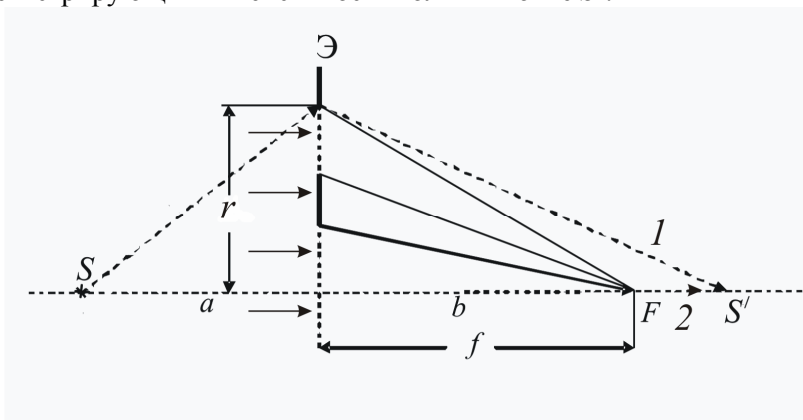


Рис. 4-4A.2

В оптике применение принципа Гюйгенса–Френеля упрощается тем, что длина волны излучения λ значительно меньше расстояний a и b . Как следствие, размеры экрана $\mathcal{E}$ также значительно меньше этих расстояний, поскольку заметный вклад в результирующую амплитуду дадут только амплитуды дифрагированных лучей, идущих от S к S' , незначительно отличающихся от прямого (недифрагированного луча). Как известно, существенным для результата интерференции является разность хода Δ двух лучей (на рис. 4-4А.2 они изображены пунктиром и обозначены 1 и 2): один идет из S в S' через край круглого отверстия радиусом r , а другой – прямо, т.е.

$$\Delta = \sqrt{a^2 + r^2} - a + \sqrt{b^2 + r^2} - b. \quad (4-4A.4)$$

В акустике так же, как и в оптике, выполняются условия:

$$\frac{r^2}{a^2} \ll 1 \text{ и } \frac{r^2}{b^2} \ll 1, \quad (4-4A.5)$$

которые позволяют разложить (4-4A.4) по формуле Тейлора и получить более приближенное выражение:

$$\Delta = \frac{r^2}{2a} + \frac{r^2}{2b}. \quad (4-4A.6)$$

Если по аналогии с тонкой линзой ввести понятие фокусного расстояния f зонной пластинки (экрана $\mathcal{E}$):

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (4-4A.7)$$

то выражение для разности хода приобретает более простой вид:

$$\Delta = \frac{r^2}{2f}. \quad (4-4A.8)$$

И тогда разность фаз двух рассматриваемых лучей $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$ связана с радиусом r соотношением:

$$r^2 = 2f^2 \Delta = 2f^2 \left(\frac{\lambda \delta}{2\pi f} \right). \quad (4-4A.9)$$

Вклад в комплексную амплитуду от элементарного участка фронта падающей волны, имеющей вид кольца радиусом r и шириной dr , в соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля, имеет вид

$$dA_{S'} = -\frac{i}{\lambda} \frac{a_0}{a} e^{ik(a+b)} \frac{e^{i\delta}}{b} 2\pi r dr = -\frac{i}{\lambda} A \frac{e^{i\delta}}{f} d(\pi r^2), \quad (4-4A.10)$$

где $A = a_0 \cdot \frac{e^{ik(a+b)}}{(a+b)}$ – амплитуды колебаний в точке S' в отсутствии экрана.

Амплитуда, соответствующая открытому отверстию радиусом R , есть сумма элементарных амплитуд (4-4A.10) и с учетом (4-4A.9) получим:

$$A_p = - \int_0^{\delta(R)} e^{i\delta} d\delta = A(1 - e^{i\delta}), \quad (4-4A.11)$$

где параметр $\delta(R)$ является запаздыванием по фазе луча, идущего через край отверстия радиусом R :

$$\delta(R) = \frac{\pi R^2}{f\lambda}.$$

Если $\delta_1 = \pi$, то говорят, что отверстие радиусом $R_1 = \sqrt{f\lambda}$ открывает первую зону Френеля так, что луч, идущий через ее край, имеет дополнительный ход $\frac{\lambda}{2}$ по сравнению с центральным лучом.

Для границы отверстия, содержащего n зон Френеля, получим аналогично:

$$\delta_n = \pi \cdot n, \text{ а } R_n = \sqrt{f\lambda n}. \quad (4-4A.12)$$

Отметим, что зависимости мнимой и действительной части комплексной амплитуды A от параметра δ дают параметрическое

уравнение спирали Френеля, которая позволяет найти комплексную амплитуду по известному параметру δ , значение которого определяется радиусом открытого отверстия R .

Если экран изготовить так, что открытым будут только некоторые зоны Френеля, то его называют *зонной пластинкой*.

В экспериментах с ультразвуком условия (4-4А.5) выполняются, но с недостаточной точностью. Поэтому радиус n -ой зоны теперь определяют так (см. рис. 4-4А.2):

$$r_n^2 = (f + n\lambda / 2)^2 - f^2 = nf\lambda + n^2\lambda^2 / 4, \quad (4-4А.13)$$

где f – фокусное расстояние зонной пластинки, величина которого по-прежнему определяется выражением (4-4А.7).

Если, однако, получить из выражения (4-4А.4) явную зависимость r^2 от фазового запаздывания $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$, то станет понятно, что приближенная система уравнений (4-4А.7) и (4-4А.13) будет справедлива, если выполняются условия:

$$\frac{f^2}{ab} \ll 1 \text{ и } \frac{r^2}{f^2} \ll 1, \quad (4-4А.14)$$

которые позволяют упростить зависимость (4-4А.13) и привести ее к виду

$$r^2 = 2f^2 \left(\frac{\lambda\delta}{2\pi f} \right) \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\lambda\delta}{2\pi f} \right]. \quad (4-4А.15)$$

Нетрудно видеть, что (4-4А.15) эквивалентно уравнению (4-4А.13).

В нашем эксперименте зонные пластинки (их две) изготовлены для фиксированного $f = 10,2$ см. Радиусы отверстий (зон) вычислены из соотношения (4-4А.13). У одной пластинки открыты пять нечетных зон (с первой по девятую), у второй – четные зоны (со второй по десятую).

Для небольшого числа N открытых нечетных (четных) зон приблизительно выполняется соотношение:

$$A_{S'} = A_1 + A_3 + \dots + A_{2N+1} \approx 2NA. \quad (4-4А.16)$$

Соответственно, интенсивность

$$I_{S'} \approx 4N^2 I_0, \quad (4-4A.17)$$

где I_0 – интенсивность в точке наблюдения без экрана.

Несмотря на то, что площади зон теперь – разные, использование зависимости (4-4A.15) при вычислении элементарной амплитуды (4-4A.11), не приведет к существенному искажению спирали Френеля. Тем не менее, для периферийных зон условия (4-4A.14) выполняются недостаточно хорошо, и надеяться на то, что в эксперименте будут наблюдаться известные в оптике соотношения между интенсивностями, измеряемыми с зонными пластинками и без них, нельзя.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис. 4-4A.3. На левом краю оптической скамьи 1 расположен источник ультразвука 2, а за ним на расстоянии a – зонная пластинка 5. Расстояние a целесообразно выбрать большим, например 95 см. Затем на удалении b находится приемник ультразвука 6. На лабораторном столе расположен выпрямитель, питающий постоянным напряжением 5 В электронный блок 3. Правая половина этого блока – генератор ультразвуковой частоты (несколько десятков килогерц). С помощью кабеля, подсоединенного к разъему TR1, этот генератор питает источник ультразвуковых волн. Генератор может работать в непрерывном или импульсном режимах. В данной работе используется непрерывный режим: кнопка на панели прибора утоплена и горит сигнальный красный светодиод «cont». Амплитуду выходного сигнала генератора можно изменять плавным регулятором «Transmitter Ampl.». В левой части электронного блока находится преобразователь выходного сигнала. Он содержит два входных разъема, но в данной работе используется только левый разъем, к которому подключают кабель от приемника ультразвуковых волн. Преобразователь имеет две ручки регулировки усиления входного сигнала: левую – ступенчатой, а правую – плавной регулировки. К выходным гнездам преобразователя (желтому и белому) подключают два провода (красный и синий соответственно) цифрового мультиметра 4, измеряющего постоянное напряжение, пропорциональное интенсивности ультразвуковой волны в точке наблюдения.

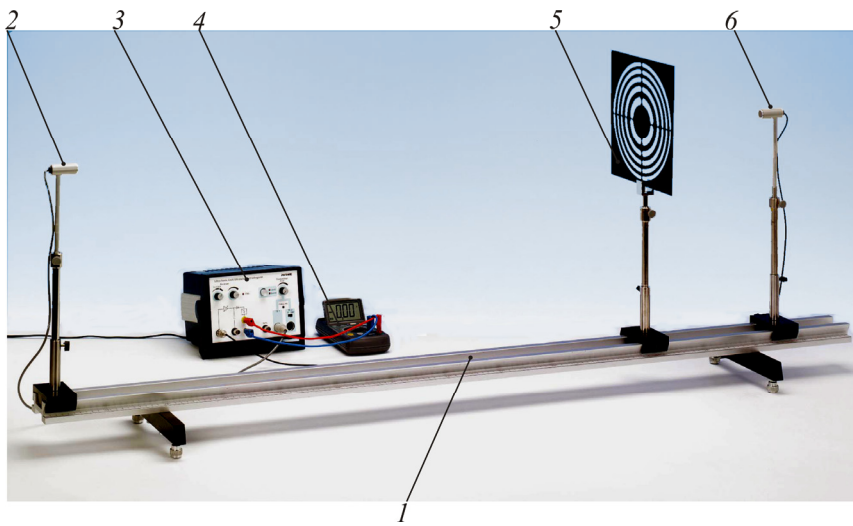


Рис. 4-4А.3

Внимание! Мультиметр работает в режиме DCV. Положения ручек регулировки выходного сигнала и преобразователя следует подбирать такими, чтобы усилитель преобразователя не входил в режим насыщения (при этом загорается сигнальный светодиод, обозначенный на панели электронного блока как OVL). Если это произошло, следует уменьшить либо величину сигнала генератора, либо усиление входного сигнала преобразователя ручками ступенчатой и плавной регулировки.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Опасность может представлять собой только сетевое напряжение, поэтому перед началом работы следует убедиться в исправности сетевого кабеля.

ЗАДАНИЕ

Измерение интенсивности ультразвука в зависимости от расстояния между зонной пластинкой и приемником

1. Подготовьте установку к измерениям. Для этого, подвинув приемник вплотную к источнику, убедитесь в том, что они нахо-

дятся на одной высоте, соответствующей центру зонной пластинки. Проверьте, что все соединения выполнены так, как это изложено в предыдущем разделе.

2. Вставьте шнур питания выпрямителя в розетку с напряжением 220 В. При этом автоматически включается электронный блок, содержащий генератор и преобразователь.

3. Поставьте держатель с зонной пластинкой на удалении 95 см от источника, расположенного в точке с координатой 3 см на оптической скамье и, отодвигая приемник от зонной пластинки, убедиться в том, что сигнальный светодиод OVL не загорается. После этого измерьте зависимость напряжения цифрового мультиметра (рекомендуемый предел мультиметра – 20 В) от координаты приемника в диапазоне 105-130 см с шагом 1 см. Результаты занесите в табл. 4-4А.1.

4. Снимите зонную пластинку с оптической скамьи и повторите измерения, перемещая приемник в той же области координат. Рекомендуемый предел мультиметра – 2 В. Результаты занесите в таблицу.

N	1	2	3	...									
x , см													
I , В													
I_0 , В													

5. В виду большого объема измерений, повторные серии измерений можно не проводить, но тогда для оценки погрешности разброса необходимо провести ряд однотипных измерений напряжения цифрового мультиметра при том значении x , при котором I имеет наибольшее значение с зонной пластинкой и без нее.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. По измерениям п. 3 постройте график зависимости интенсивности ультразвука $I(x)$ от координаты приемника и по этому графику определите расстояние b , для которого интенсивность

имеет максимум I_m . Далее для выбранного расстояния a и измеренного b рассчитайте фокусное расстояние f из (4-4А.7), а затем, зная радиус первой зоны $R_1 = 3,0$ см по формуле (4-4А.13) вычислите длину волны ультразвука. Оцените погрешность результата, исходя из того, что основной вклад в нее дает случайная погрешность измерения напряжения, которое по разным причинам флуктуирует. Всякий дополнительный шум в аудитории усиливает эти флуктуации. В качестве погрешности расстояния b можно принять половину шага.

2. По результатам п. 4 постройте для сравнения на том же рисунке, где помещен график $I(x)$, график зависимости интенсивности от координаты приемника в отсутствие зонной пластинки и по нему определить интенсивность I_0 в точке, в которой она была максимальной прежде. Вычислите отношение I_m/I_0 и сравните с теоретическим значением.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Результатами работы являются:

рисунок с графиками зависимостей $I(x)$ и $I_0(x)$;

вычисленное значение фокусного расстояния f , которое нужно сравнить с ее известным значением;

вычисленное значение длины волны ультразвука, которое нужно сравнить с ее известным значением $\lambda = 0,88$ см.

Следует также указать вычисленное отношение интенсивностей I_m/I_0 и обсудить его отличие от теоретического значения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяется n -я зона Френеля?
2. В каком приближении для ультразвука радиусы зон зависят не от расстояний a и b порознь, а от их комбинации, называемой фокусным расстоянием зонной пластинки?
3. Во сколько раз интенсивность от первой открытой зоны должна быть больше интенсивности при полностью открытом фронте?

4. Во сколько раз интенсивность от второй открытой зоны должна быть больше интенсивности при полностью открытом фронте, если затухание мало?

5. Если открыты четные зоны со вторую по десятую, то чему должно быть равно указанное отношение?

6. Если открыты нечетные зоны с первой по девятую, то чему равно отношение интенсивности к интенсивности при полностью открытом фронте?

7. Если напряжение мультиметра флуктуирует, что целесообразно выбрать в качестве погрешности?

8. Как оценить погрешность измерения расстояния b ?

9. Почему наблюдается заметная разница между экспериментальным и теоретическим значениями I_m/I_0 ?

10. Почему в данном случае применяют термин ультразвук?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. Волны. Оптика. М.: Астрель, 2003.

2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.

Дополнительная

3. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. пособие для втузов. М.: Высш. школа, 1978.

Р а б о т а 4-5А

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ОПЫТЕ С ЗЕРКАЛОМ ЛЛОЙДА

***Цель:** изучение явления интерференции в ультразвуковых волнах, исследование распределения интенсивности при изменении расстояния между приемником ультразвука и отражающим экраном.*

Оборудование: оптическая скамья; рейтер с ультразвуковым излучателем; рейтер с приемником; рейтер с транслятором горизонтального перемещения и поворотным держателем; экран отражателя; ультразвуковой модуль с блоком питания; цифровой вольтметр; соединительные кабели.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе на примере интерференции ультразвука изучаются закономерности распространения звуковых волн в упругих средах. Звук – волновое распространение энергии в упругой среде, которую воспринимают слуховые органы человека. Звук обуславливается продольными механическими колебаниями. Эти колебания, охватывающие диапазон частот от 16 Гц до 20 кГц, принято называть *звуковыми или акустическими* (акустика – учение о звуке). Колебания с частотами ниже звукового диапазона часто называют *инфразвуковыми*, а с частотами выше звукового диапазона, – *ультразвуковыми*. Ультразвуковые волны по своей природе не отличаются от волн звукового диапазона, однако человеческим ухом они уже не воспринимаются. Ультразвуку соответствует диапазон частот от 16–20 кГц до 1 ГГц.

Распространение звука имеет огромное значение для повседневной жизни и обусловлено упругостью окружающего нас воздуха. Оно начинается с колебаний воздуха около источника звука: звучащее тело попеременно, то сжимает слой воздуха, прилегающий к поверхности тела, то, наоборот, создает разрежение в этом слое. Это, в свою очередь, влечет за собой последовательное возникновение колебаний в других местах, все более и более удаленных от первоначального источника. Возникает звуковая волна, благодаря которой органы слуха воспринимают звук на расстоянии. Заметим,

что частицы воздуха колеблются вдоль направления распространения волны. Такие волны называются *продольными*.

Распространение звуковых волн в среде происходит не мгновенно, а занимает определенное время. Подчеркнем, что распространение волны означает запаздывающую передачу колебательного движения от одной точки среды к другой. Никакого переноса вместе с волной самого вещества тела, в котором волна распространяется, не происходит. Скорость звука v различна для разных сред. Например, в сухом воздухе при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость распространения звука равна $343,1\text{ м/с}$. Величина v связана с длиной волны λ и частотой колебаний f соотношением $v = \lambda \cdot f$.

Наложение звуковых волн от различных источников не влияет на их распространение и лишь приводит к сложению колебаний в каждой точке среды. Если же происходит наложение волн одинаковой частоты, то может возникнуть *интерференция*, когда интенсивность в точке наблюдения оказывается не равной сумме интенсивностей складываемых волн.

С интерференцией и возможностью получения интерференционной картины связано понятие когерентности. *Когерентность* (от лат. *cohaerens*, т.е. находящийся в связи) – согласованное протекание во времени нескольких колебательных, или волновых, процессов, проявляющееся при их сложении. Колебания являются когерентными, если разность их фаз δ остается постоянной во времени. Два гармонических (синусоидальных) колебания одной частоты всегда когерентны.

При интерференции когерентных звуковых волн образуется интерференционная картина. На этой картине существуют точки, в которых результирующая интенсивность звуковой волны максимальна, причем она больше, чем сумма интенсивностей исходных интерферирующих волн ($I_{\max} > I_1 + I_2$). В точках, соответствующих минимальной интенсивности, наоборот, она меньше ($I_{\min} < I_1 + I_2$). В остальных точках интерференционной картины интенсивность распределяется в соответствии с разностью фаз между интерферирующими волнами.

Для получения интерференционной картины звуковых волн можно использовать лишь один источник звука. В этом случае формирование когерентных волн, участвующих в интерференции, происходит в результате пространственного разделения исходной

волны. Для этого существуют самые различные методы или устройства. В любом случае звуковые волны после разделения проходят различные пути, а затем сводятся вместе и интерferируют.

Например, если интерferируют две звуковые волны, полученные от одного источника, то они попадают в точку наблюдения по двум различным путям. Разность этих путей – разность хода Δ – определяет результирующую интенсивность. Максимумы интенсивности получаются в тех местах, где разность хода равна четному числу полуволн; минимумы – в тех местах, где разность хода равна нечетному числу полуволн.

Порядок интерференции – величина, равная разности хода, выраженной в длинах волн. При совпадении начальной фазы интерferирующих волн целые значения порядка интерференции соответствуют максимумам, а полуцелые – минимумам интерференционной картины. Разность фаз δ двух интерferирующих волн связана с разностью хода Δ простым соотношением $\delta = 2\pi \Delta / \lambda$. Подставив в это соотношение величину $\Delta = k \cdot \lambda$, равную целому числу длин волн (условие максимума), получим $\delta = 2\pi \cdot k$. Разность фаз оказывается кратной 2π и колебания, возбуждаемые в точках с максимальной интенсивностью обеими волнами, будут происходить с одинаковой фазой.

Рассмотрим опыт по наблюдению интерференции, в котором разделение волны происходит в результате отражения от зеркала. Зеркалом в данной схеме интерференции звуковых волн (рис. 4-5А.1) является металлический экран Э. В точку наблюдения, наряду с волной, идущей непосредственно от источника И, попадает и волна, отраженная от экрана (см. рис. 4-5А.1). Эти волны когерентны и интерferируют. Результирующая интенсивность регистрируется приемником П, помещенным в точку наблюдения.

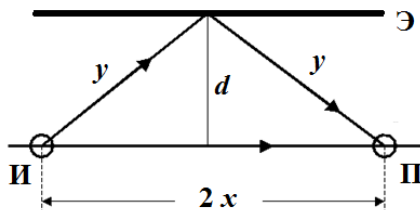


Рис. 4-5А.1

Первая волна проходит расстояние $2x$ вдоль линии, соединяющей источник и приемник. Вторая волна отражается от экрана и проходит большее расстояние $2y$. Различие в длинах пути задает разность хода $\Delta = 2(y - x)$ между интерферирующими волнами. Изменение величины Δ приводит либо к усилению, либо к ослаблению интенсивности (т.е. принимаемого сигнала) в точке размещения приемника.

При перемещении отражательного экрана параллельно линии, соединяющей источник и приемник, изменяется расстояние d между приемником П и экраном Э. В соответствии с этим изменяется и разность хода

$$\Delta = 2(y - x) = 2(\sqrt{d^2 + x^2} - x). \quad (4-5A.1)$$

Максимальные и минимальные интенсивности наблюдаются, если разность хода равна четному и, соответственно, нечетному числу половин

$$\Delta = 2n(\lambda / 2), \quad \Delta = (2n + 1)(\lambda / 2), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4-5A.2)$$

Тогда расстояния между приемником и плоскостью экрана, на которых будут наблюдаться максимумы интенсивности, равны

$$d_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{n^2 \lambda^2}{4} + n \lambda x}; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4-5A.3)$$

Между ними будут располагаться минимумы на расстояниях

$$d_{\text{мин}} = \sqrt{\left(\frac{2n+1}{4}\right)^2 \lambda^2 + \left(\frac{2n+1}{2}\right) \lambda x}; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4-5A.4)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки приведен на рис. 4-5A.2. Основу установки составляет оптическая скамья, на которой размещены элементы для получения интерференции. Здесь 1 – рейтеры; 2 – микрометрическая подача с поворотным держателем; 3 – источник (ультразвуковой передат-

чик); 4 – приемник (микрофон); 5 – отражательный экран – зеркало; 6 – ультразвуковой модуль с блоком питания; 7 – цифровой вольтметр – мультиметр.

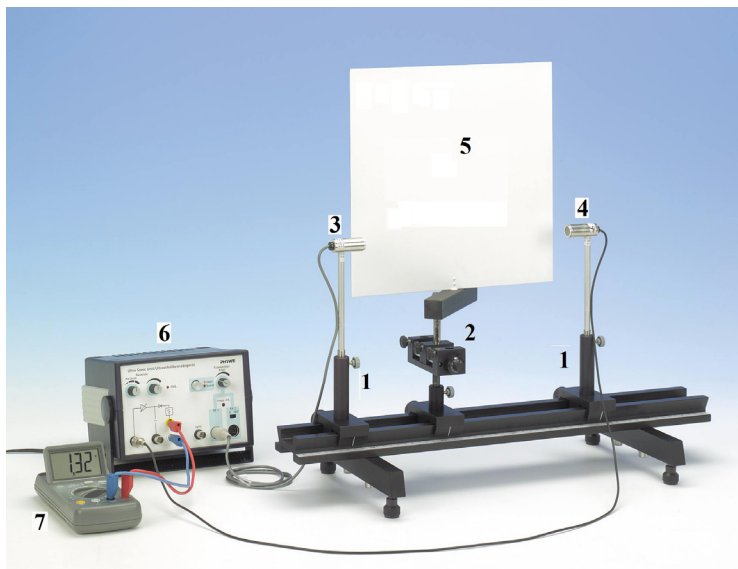


Рис. 4-5А.2

Микрометрическая подача 2 служит для изменения расстояния d между приемником и экраном. Отсчет расстояний d ведется по шкале микрометрической подачи. Ультразвуковой передатчик излучает на частоте $f = 40$ кГц. Ультразвуковой модуль с блоком питания обеспечивает работу передатчика и преобразует сигнал, детектируемый приемником. Для этого в ультразвуковой модуль встроен усилитель. Аналоговый сигнал U с выхода усилителя регистрируется цифровым вольтметром.

Внимание! Недопустимо устанавливать передатчик и приемник ближе 10 см друг от друга, поскольку это может привести к перегрузке усилителя и превышению предела регистрации цифрового вольтметра.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Выполнять правила техники безопасности при работе с электрическими приборами.

2. Не оставлять без присмотра включенную установку.

ЗАДАНИЕ 1

Подготовка установки к измерениям

Разместите на оптической скамье рейтеры, обеспечивающие перемещение в вертикальном направлении. Установите на рейтерах на одной высоте ультразвуковой передатчик (излучатель) и ультразвуковой приемник так, чтобы они смотрели друг на друга и располагались на прямой, параллельной оптической скамье (см. рис. 4-5А.1). Поставьте на оптическую скамью рейтер с микрометрической подачей и закрепите на его поворотном держателе экран отражателя. Экран необходимо установить вертикально. Кроме того, он должен быть параллелен оптической скамье.

Соедините передатчик с гнездом TR1 на передней панели ультразвукового модуля и выберите непрерывный режим работы. Подключите приемник к усилителю, соединив его с левым гнездом BNC на передней панели ультразвукового модуля. Затем соедините аналоговый выход усилителя с цифровым вольтметром.

В случае если установка собрана и готова к измерениям, этот пункт задания не следует выполнять.

1. Вращая винт микрометрической подачи сдвиньте экран параллельно оптической скамье. При этом изменится и расстояние d от экрана до оси системы, на которой расположены передатчик и приемник. Проверьте параллельность экрана и оси системы, максимально приблизив экран к передатчику и приемнику в пределах рабочего хода микрометрической подачи.

2. Установите микрометрическую подачу в положение, соответствующее началу отсчета. Затем поставьте экран на расстояние $d_{\min} \approx 2$ см от оси системы. Для этого используется поворотный держатель. Еще раз проверьте параллельность экрана и оптической оси. Наконец, переместите передатчик и приемник так, чтобы их передние плоскости были симметричны краям экрана и отстояли друг от друга на расстояние 30,0 см.

3. Убедитесь, что передатчик и приемник соединяются проводами с ультразвуковым модулем (см. п.1). Включите питание и проверьте наличие показаний на цифровом вольтметре. Для сохранения линейной зависимости между сигналами на входе и выходе

усилителя не устанавливайте большие коэффициенты усиления. Если же усилитель перешел в режим насыщения, на панели ультразвукового модуля загорается светодиод с надписью «OVL». В этом случае уменьшите величину сигнала с передатчика или коэффициент усиления.

ЗАДАНИЕ 2

Изучение интерференции в опыте с зеркалом Ллойда

1. Перед началом измерений проверьте линейность работы усилителя, установив экран с помощью микрометрической подачи в область первого максимума, соответствующего наибольшему показанию цифрового вольтметра.

2. Исследуйте зависимость напряжения U на цифровом вольтметре от расстояния d между приемником и экраном. Для этого отодвигайте экран от приемника с шагом $h = 4$ мм, измеряя в каждом шаге соответствующее напряжение U на цифровом вольтметре. Диапазон изменения величины $d = 20\text{--}70$ мм определяется рабочим ходом микрометрической подачи. Повторите еще дважды описанные измерения. Результаты всех трех серий измерений запишите в табл. 4-5А.1.

Таблица 4-5А.1

Расстояние d , мм	Напряжение U , В			$\langle U \rangle$, В	ΔU , В
	1	2	3		
20,0					
24,0					
28,0					
32,0					
...					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Используя метод Корнфельда, найдите среднее значение $\langle U \rangle$ и абсолютную погрешность ΔU и тоже запишите в табл. 4-5А.1.

2. Постройте график зависимости величины $\langle U \rangle$ от расстояния d . Единицы измерений по осям графика: по вертикали – вольты; по горизонтали – миллиметры. За абсолютную погрешность Δd возьмите приборную погрешность отсчета по шкале микрометрической подачи.

3. Определите по графику расстояния d , соответствующие интерференционным максимумам и минимумам для нескольких порядков интерференции ($n = 0, 1, 2, 3$). Округлите эти результаты до одной значащей цифры после запятой таким образом, чтобы последняя цифра оканчивалась на 0 или 5 (например, 25,5). Полученные экспериментальные значения $d_{\text{э}}$ запишите в табл. 4-5А.2.

4. По значениям $d_{\text{э}}$, соответствующим $n = 1$ и $n = 2$ (см. табл. 4-5А.2), вычислите разности хода, полагая в формуле (4-5А.1) $x = 150$ мм. Подставив найденные разности хода в формулу (4-5А.2), определите соответствующие им значения длины волны ультразвука. Найдите среднее значение длины волны $\langle \lambda \rangle$. Оцените погрешность $\Delta \lambda = (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}) / 2$.

Таблица 4-5А. 2

Порядок интерференции n	Экспериментальные значения $d_{\text{э}}$, мм		Теоретические значения $d_{\text{т}}$, мм	
	максимумы	минимумы	максимумы	минимумы
0				
1				
2				
3				

5. Вычислите скорость ультразвука $v_{\text{э}}$ в воздухе для найденного значения $\langle \lambda \rangle$ по формуле $v_{\text{э}} = \langle \lambda \rangle f$. Частоту передатчика выберите равной $f = 40$ кГц. Рассчитайте погрешности.

6. Используя табличное значение скорости звука $v_{\text{т}} = 343,1$ м/с в воздухе при температуре 20°C , вычислите длину волны λ для частоты передатчика $f = 40$ кГц по формуле $\lambda_{\text{т}} = v_{\text{т}} / f$.

7. Вычислите теоретические значения $d_{\text{т}}$ по формулам (4-5А.3) и (4-5А.4) при $x = 15,0$ см и найденном значении λ . Результаты запишите в табл. 4-5А.2.

8. Проведите анализ данных табл. 4-5А.2, попарно сравнивая соответствующие друг другу расстояния $d_{\text{э}}$ и $d_{\text{т}}$. Сделайте выводы.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Предоставьте график зависимости величины $\langle U \rangle$ от расстояния d . В заключении работы приведите найденную из экспериментов

скорость ультразвука $v_{\text{з}}$ в воздухе и ее погрешность. Укажите основные факторы, влияющие на точность измерений. Сравните экспериментальное значение скорости ультразвука в воздухе с табличной величиной $v_{\text{т}} = 340$ м/с. Сделайте выводы, учитывая погрешности и результаты сравнения значений $d_{\text{з}}$ и $d_{\text{т}}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется ультразвуком?
2. Что общего между звуковой и ультразвуковой волнами?
3. Как распространяется ультразвуковая волна в воздухе?
4. Чем отличается звуковая волна от электромагнитной волны?
5. Может ли распространяться ультразвук в вакууме?
6. Что называется интерференцией?
7. Что представляет собой зеркало Ллойда в данной работе?
8. Как в данной работе получают две когерентные волны, участвующие в интерференции?
9. Что называется разностью хода?
10. Как определяется разность хода в данной работе?
11. Как разность хода связана с длиной волны в точках интерференционной картины, где наблюдаются максимумы и минимумы интенсивности?
12. Почему при перемещении экрана параллельно оптической скамье изменяется напряжение, регистрируемое цифровым вольтметром?
13. Что называется длиной волны?
14. Как скорость распространения ультразвука связана с длиной волны и частотой?
15. Почему нельзя проводить измерения на установке, если усилитель находится в режиме насыщения? Что нужно сделать для перехода в рабочий режим?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: Наука, 1988.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. М.: Наука, 1980.

Дополнительная

3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ	
КАФЕДРЫ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ	3
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	7
Работа 4-1А. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН	9
Работа 4-2А. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН	21
Работа 4-3А. ФАЗОВАЯ И ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТИ	34
Работа 4-4А. ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКЕ	46
Работа 4-5А. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ОПЫТЕ С ЗЕРКАЛОМ ЛЛОЙДА	58

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Раздел «Упругие волны»

Под редакцией В.Н. Игнатова и Д.А. Самарченко

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 15.11.2011. Формат 60×84 1/16

Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 1700 экз.

Изд. № 3/10. Заказ № 72

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».

144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д.42.