

402. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

402.1. Цель работы

Изучение методов измерений скорости звука в воздухе и ее экспериментальное определение.

[1. С. 201 – 204; 2. С. 289 – 291, 295 – 300; 3. С. 227 – 229, 243 – 245, 247 – 249]

402.2. Разделы теории

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Уравнение плоской механической волны. Скорость и длина волны. Стоячие волны, узлы и пучности стоячей волны.

402.3. Приборы и принадлежности

Электронный осциллограф АСК-7022, генератор сигналов низкочастотный ГЗ-123 и лабораторный стенд.

402.4. Теоретическое введение

Скорость звука зависит от физических характеристик среды, в которой распространяются звуковые волны. Так, для газа скорость звука v определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}, \quad (402.1)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – отношение молярных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (для воздуха $\gamma = 1,4$); ρ – средняя плотность; P – среднее давление.

Учитывая, что

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; μ – молярная масса (для воздуха $\mu = 29$ г/моль), выражение (402.1) можно переписать в виде

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \quad (402.2)$$

Скорость звука в воздухе также может быть определена на основе анализа распространения звуковых волн в нем. Пусть мы имеем две звуковые волны, прошедшие различные пути в одной среде (воздухе) и оказавшиеся в одной точке:

$$\begin{aligned} x_1 &= A \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} l_1\right), \\ x_2 &= B \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} l_2\right), \end{aligned}$$

где l_1 и l_2 – пути, пройденные волнами; A и B – амплитуды колебаний; $\omega = 2\pi\nu$; ν – частота колебаний; λ – длина волны.

В точке наблюдения частицы среды участвуют в колебаниях, связанных с обеими волнами, поэтому результирующее колебание есть сумма колебаний рассматриваемых волн. Результат сложения этих волн зависит от разности фаз $\Delta\varphi$, которая определяется как

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l_2 - \frac{2\pi}{\lambda} l_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (l_2 - l_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l, \quad (402.3)$$

где $\Delta l = l_2 - l_1$ – разность хода волн.

Из формулы (402.3) определяется длина звуковых волн:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \Delta l. \quad (402.4)$$

Длина волны λ связана со скоростью распространения v и частотой ν следующим образом:

$$\lambda = \nu / \nu. \quad (402.5)$$

Сравнивая выражения (402.4) и (402.5), получаем

$$\nu = \frac{2\pi\Delta l}{\Delta\varphi} \nu. \quad (402.6)$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ легко определить, если колебания происходят во взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения $\Delta\varphi$ складываемых волн проанализируем колебание, представляющее результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты.

Пусть имеются два колебания:

$$\begin{aligned} x &= A \cos \omega t, \\ y &= B \cos(\omega t + \Delta\varphi). \end{aligned} \quad (402.7)$$

Найдем результат сложения этих колебаний в обычной форме, исключив из уравнений (402.7) время t :

$$\begin{aligned} \cos \omega t &= \frac{x}{A}, \\ \sin \omega t &= \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}. \end{aligned} \quad (402.8)$$

Применяя формулу косинуса суммы и заменяя $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ их значениями из (402.8), получим

$$\frac{y}{B} = \frac{x}{A} \cos \Delta\varphi - \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} \sin \Delta\varphi. \quad (402.9)$$

Уравнение (402.9) приводится к виду

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi. \quad (402.10)$$

Полученный результат (402.10) представляет собой уравнение эллипса с произвольной ориентацией его полуосей относительно координатных осей.

Ориентация эллипса сложным образом зависит от разности фаз колебаний $\Delta\varphi$.

Проведем анализ формы траектории результирующего колебания для некоторых частных случаев.

1. Разность фаз $\Delta\varphi = 0$. Тогда уравнение (402.10) принимает вид

$$\left(\frac{x}{A} - \frac{y}{B} \right)^2 = 0,$$

откуда получается уравнение прямой

$$y = \frac{B}{A} x.$$

Следовательно, колеблющаяся точка будет перемещаться по прямой, длина которой от начала координат равна $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Таким образом, зависимость перемещения от времени определяется как

$$r(t) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \omega t. \quad (402.11)$$

Из (402.11) следует, что результирующее колебание является гармоничес-

ким с частотой ω и амплитудой $\sqrt{A^2 + B^2}$.

2. Разность фаз $\Delta\varphi = +\pi$. В этом случае уравнение (402.10) принимает вид

$$\left(\frac{x}{A} + \frac{y}{B}\right)^2 = 0.$$

Отсюда получается, что результирующее колебание представляет собой гармоническое колебание вдоль прямой

$$y = -\frac{B}{A}x.$$

3. При разности фаз $\Delta\varphi = \pm\pi/2$ уравнение (402.10) преобразуется в уравнение эллипса, полуоси которого совпадают с координатными осями:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1.$$

При значениях $\Delta\varphi = \pi/2$ и $\Delta\varphi = -\pi/2$ направления движения по эллипсу противоположны.

Таким образом, при равенстве амплитуд исходных колебаний ($A=B$) и изменении разности фаз $\Delta\varphi$ от 0 до π траектория результирующего колебания принимает формы, представленные на рис. 402.1. При изменении разности фаз $\Delta\varphi$ от π до 2π формы результирующего колебания будут аналогичными, но наклон полуосей эллипсов изменится на $\pi/2$.

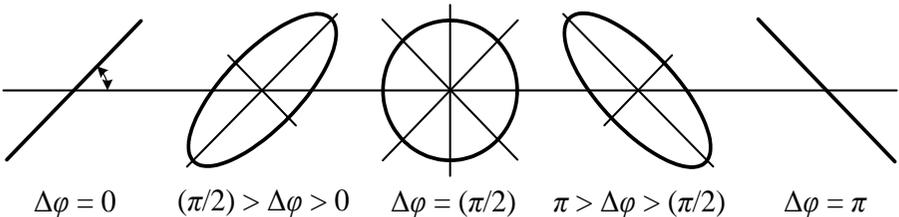


Рис. 402.1. Фигуры Лиссажу

Из анализа форм кривых результирующего колебания (называемых фигурами Лиссажу) вытекает возможность по виду и положению этих кривых определить разность фаз $\Delta\varphi$ складываемых колебаний. Тогда на основании соотношения (402.6) легко может быть определена и искомая скорость звука в воздухе.

В данной работе используется и другой способ определения скорости звука в воздухе – метод стоячей волны. Если расположить источник звуковых волн и отражающую поверхность на расстоянии L друг от друга, то между ними возникает стоячая волна с характерным распределением максимумов и минимумов смещения частиц среды относительно положения равновесия.

Рассмотрим две плоские волны с различными амплитудами, движущиеся навстречу друг другу:

$$\begin{aligned}\xi_1(x, t) &= A_1 e^{i(\omega t - kx)}, \\ \xi_2(x, t) &= A_2 e^{i(\omega t + kx)},\end{aligned}$$

где A_1 и A_2 – амплитуды падающей и отраженной волн соответственно. В реальных условиях всегда $A_1 > A_2$.

Результат сложения волн $\xi_1(x, t)$ и $\xi_2(x, t)$ представим в виде

$$\begin{aligned}\zeta(x, t) &= \xi_1(x, t) + \xi_2(x, t) = \\ &= A_1 e^{i(\omega t - kx)} + A_2 e^{i(\omega t + kx)} = e^{i(\omega t - kx)} (A_1 + A_2 e^{2ikx}) = \\ &= (A_1 - A_2) e^{i(\omega t - kx)} + A_2 (1 + e^{2ikx}) e^{i(\omega t - kx)} = \\ &= (A_1 - A_2) e^{i(\omega t - kx)} + 2A_2 (\cos kx) e^{i\omega t}.\end{aligned}\tag{402.12}$$

Первое слагаемое в выражении (402.12) представляет собой волну, бегущую в направлении возрастающих значений x , амплитуда которой равна разности $(A_1 - A_2)$ двух встречных волн. Второе слагаемое описывает колебательный процесс, локализованный в пространстве, с частотой ω и амплитудой $2A_2 \cos kx$, т.е. стоячую волну.

Положение максимумов (пучностей) в результирующей волне определяется из условия

$$kx = \frac{2\pi}{\lambda} x = \pm n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

причем амплитуда волны A' в этих точках равна

$$A' = A_1 - A_2 + 2A_2 = A_1 + A_2$$

или сумме амплитуд встречных волн.

Положение минимумов (узлов) определяется из условия

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (402.13)$$

Амплитуда волны A'' в этих точках равна

$$A'' = A_1 - A_2,$$

т.е. разности амплитуд встречных волн.

Из соотношений (402.5) и (402.13) следует, что для образования стоячей волны нужно, чтобы расстояние между источником и отражающей поверхностью L удовлетворяло условию

$$L = \frac{1}{2} n \lambda = \frac{n\nu}{2\nu}, \quad (402.14)$$

где n – целое число, ν – частота.

Из соотношения (402.14) следует, что если минимум, который будем считать нулевым, наблюдается при значении L_0 , а n -й при L_n , то искомая скорость равна

$$\nu = \lambda \nu = \frac{2(L_n - L_0)}{n} \nu. \quad (402.15)$$

402.5. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Схема экспериментальной установки для измерения скорости звука в воздухе методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний и методом стоячей волны показана на рис. 402.2.

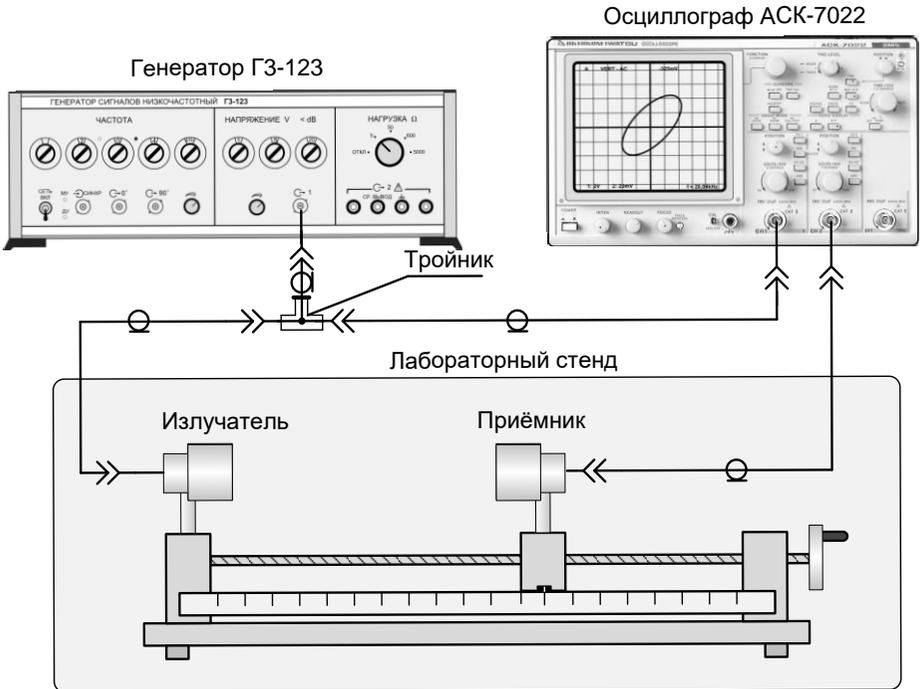


Рис. 402.2. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка содержит: 1 – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-123; 2 – тройник СР-50-95ФВ; 3 – лабораторный стенд и 4 – электронный осциллограф АСК-7022.

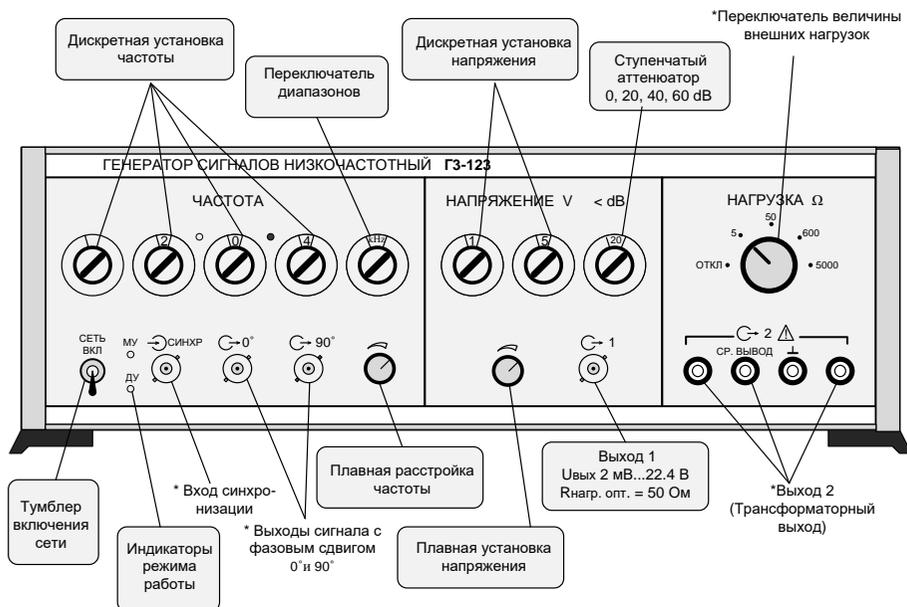
Лабораторный стенд представляет собой два установленных относительно излучающего и приемного ультразвуковых преобразователя, расстояние между которыми можно изменять. Положение приемного

преобразователя относительно излучающего преобразователя можно измерять по линейке.

Внешний вид генератора сигналов низкочастотного ГЗ-123 представлен на рис. 402.3.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 402.4.

Внешний вид электронного осциллографа АСК-7022 представлен на рис. 402.5.



* Органы управления, неиспользуемые в данной лабораторной работе

Рис. 402.3. Внешний вид генератора ГЗ-123

При использовании метода сложения взаимно перпендикулярных колебаний электрические колебания от генератора одновременно подаются на пластины X осциллографа и излучающий преобразователь. Это – одно из складываемых колебаний. Второе колебание подается на пластины Y осциллографа от приемного преобразователя, который принимает звуковую волну, излученную преобразователем, и преобразует ее в электрический сигнал. Эти колебания различаются по фазе на $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi$ определяется из уравнения (402.3)) за счет про-

хождения звуковой волной расстояния между преобразователями Δl . Длину Δl можно измерить линейкой и изменять ее путем перемещения преобразователя.

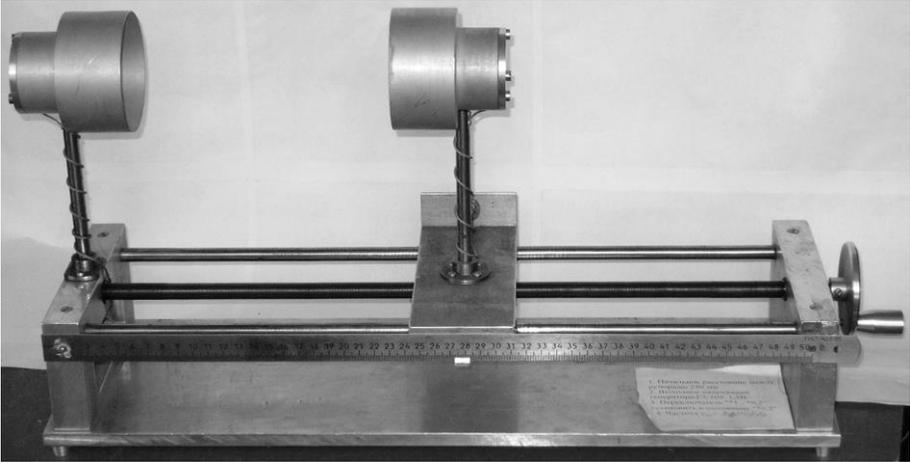


Рис. 402.4. Внешний вид лабораторного стенда

Весь процесс измерения сводится к получению известных кривых (фигур Лиссажу) результирующего колебания (см. рис. 402.1) на экране осциллографа при перемещении преобразователя 6. Например, при одном положении преобразователя 6 на экране получается эллипс, одна из осей которого горизонтальна. Это $\Delta\varphi = \pi/2$. Далее перемещают преобразователь 6 до тех пор, пока эллипс не превратится в прямую, при этом $\Delta\varphi = 0$. Таким образом, за счет дополнительной разности хода звуковых волн изменилась разность фаз $\Delta\varphi$ складываемых колебаний. Подставляя полученные значения $\Delta\varphi$, Δl и частоту генератора ν в формулу (402.6), находят скорость распространения звука v в воздухе.

При использовании метода стоячей волны электрические колебания от генератора 1 подаются на излучающий преобразователь 5. Излученная преобразователем 5 звуковая волна, пройдя расстояние L , попадает на приемный преобразователь 6, частично отражается от него и накладывается на падающую, образуя стоячую волну. С приемного преобразователя 6 электрический сигнал поступает на вертикальные пластины Y осциллографа 4 (горизонтальная развертка

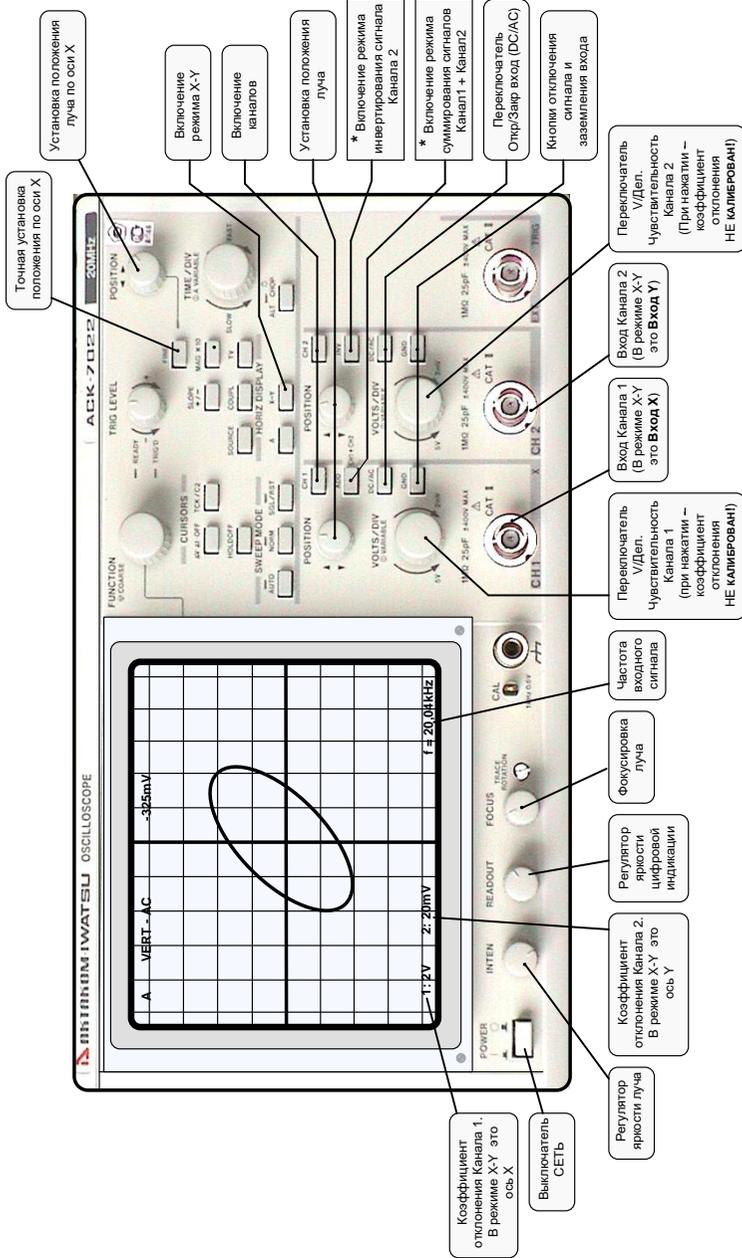


Рис. 402.5. Основные органы управления осциллографа АСК-7022 в режиме X-Y

осциллографа при этом отключена). Перемещая приемный преобразователь 6 с помощью винта, находят положение одного из минимумов (по минимальному размеру вертикальной линии на экране осциллографа) и записывают расстояние L_0 между преобразователями 5 и 6. Затем, перемещая далее преобразователь 6, записывают порядковый номер минимумов n и соответственно расстояния L_n . Полученные значения L_0, \dots, L_n , n и частоту генератора ν подставляют в формулу (402.15) и определяют скорость звука v в воздухе.

Для снижения влияния размеров преобразователей на результаты измерений необходимо, чтобы расстояние между преобразователями удовлетворяло условию $L > d^2/\lambda$ (d – диаметр преобразователя).

402.6. Порядок выполнения работы

402.6.1. Измерение скорости звука методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний

1. **Собрать** экспериментальную установку, состоящую из лабораторного стенда, генератора сигналов ГЗ-123 и осциллографа АСК-7022 по схеме (см. рис. 402.2).

2. **Установить** по линейке лабораторного стенда расстояние между ультразвуковыми преобразователями 250 мм.

3. **Подключить** питание генератора сигналов низкой частоты (НЧ) ГЗ-123 и **включить** сетевой тумблер.

4. **Установить** частоту генератора ГЗ-123 (см. рис. 402.3), равную резонансной частоте ультразвуковых преобразователей, указанную на лабораторном стенде. **Установить** выходное напряжение 1.5 В. Для этого с помощью переключателей дискретной установки напряжения выставить напряжение 15 В и переключить ступенчатый аттенюатор в положение – 20 dB. **Установить** переключатель внешних нагрузок в положение «ОТКЛ.».

5. **Подключить** питание осциллографа АСК-7022 и включить сетевой выключатель «**POWER**» (СЕТЬ) (см. рис. 402.5).

6. После прогрева осциллографа регулятором «**INTEN**» (ЯРКОСТЬ) **установить** необходимую яркость луча.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Не устанавливать чрезмерную яркость луча, так как если на экране осциллографа видна яркая неподвижная

точка, то возможно повреждение люминофора экрана!

При необходимости **произвести** установку яркости цифровой индикации регулятором «**READOUT**» (ПОКАЗАНИЯ), а фокусировку луча – регулятором «**FOCUS**» (ФОКУСИРОВКА).

7. **Включить** на осциллографе режим X-Y, нажав кнопку «X-Y». При этом Канал-1 осциллографа будет производить отклонение луча по оси X, а Канал-2 – по оси Y.

8. **Установить** переключателями чувствительности каналов «**VOLTS/DIV**» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) коэффициент отклонения Канала -1 в положение 1V/дел., а Канала-2 в положение 20 mV/дел.

При этом в левом нижнем углу экрана цифровые индикаторы будут показывать «**1 : 1V 2 : 20mV**».

Нажатие на ручку этого переключателя приведёт к установке некалиброванного коэффициента отклонения соответствующего канала. (При этом на экране появится надпись: «**1 : 1V 2 : > 20mV**».) Этот режим не используется в данной работе, поэтому для установки калиброванного коэффициента следует повторно нажать на эту ручку.

9. Кнопками включения каналов «**CH1**» (КАНАЛ 1) и «**CH2**» (КАНАЛ 2) и с помощью регуляторов установки положения луча на экране «**POSITION**» (ПОЛОЖЕНИЕ) **установите** изображение одной из фигур Лиссажу в центре экрана. Положение по оси X можно устанавливать регулятором «**POSITION < >**» (в правом верхнем углу передней панели осциллографа), причём при нажатии кнопки «**FINE**» (ПЛАВНО) производится плавная регулировка.

10. Кнопка «**INV**» (ИНВЕРТИРОВАНИЕ) в Канале-2 производит инвертирование изображения (изменения полярности сигнала). Кнопка «**ADD**» (СУММИРОВАНИЕ) в Канале-1 включает режим суммирования сигналов, поступающих на входы каналов. В данной лабораторной работе эти кнопки не используются и должны быть выключены.

11. Кнопки «**AC/DC**» служат для переключения входов каналов в режим закрытого или открытого входа. При закрытом входе на надписи «**1 : 1V 2 : 20mV**» над буквой V появляется знак « ~ ». В данной работе эта кнопка может находиться в любом положении.

12. Для более точной настройки частоты генератора на резонансную частоту лабораторного стенда **нажать** кнопку «**GND**» Канала-1. При этом на вход Канала-1 (Вход X) не будет поступать сигнал,

луч будет отклоняться только по оси Y и на экране будет видна вертикальная линия. Изменяя частоту генератора переключателями дискретной установки частоты и регулятором плавной расстройки частоты, **получить** максимальную длину вертикальной линии на экране осциллографа, при этом возможно потребуются изменить чувствительность Канала-2 «**VOLTS/DIV**» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) осциллографа. Как правило, частота может незначительно отличаться от указанной на стенде, поэтому достаточно использовать только младшую декаду переключателя дискретной установки частоты и регулятор плавной расстройки частоты.

После проведения точной настройки необходимо повторным нажатием на кнопку «**GND**» Канала-1 вновь **получить** на экране изображение фигуры Лиссажу.

13. Принять одну из фигур Лиссажу (например, прямую линию, $\Delta\varphi = 0$) за исходную и **измерить** расстояние между излучателем и приёмником по линейке лабораторного стенда. Затем медленно перемещая приёмник, пронаблюдать прямые линии, соответствующие разности фаз π , 2π , 4π , 6π , записать расстояния между излучателем и приёмником и определить разности хода $\Delta\ell$.

14. Результаты измерений записать в табл. 402.1.

Таблица 402.1

Разность фаз $\Delta\varphi$, рад.	0	π	2π	4π	6π
Отсчёт по линейке ℓ , мм					
Разность хода $\Delta\ell$, мм					
Скорость звука v , м/с					

402.6.2. Измерение скорости звука методом стоячей волны

1. **Нажать** кнопку «**GND**» Канала-1 осциллографа. При этом на экране появится вертикальная линия. Медленно перемещая приёмник,

проверить наличие максимумов и минимумов по изменению размера вертикальной линии на экране осциллографа.

2. Принять один из минимумов за начало отсчета. Перемещая приёмник с помощью винта, найти последующие 4 четных минимума и по линейке измерить соответствующие этим минимумам расстояния L_n между излучателем и приёмником. Измерения начинать от значения $L > 250$ мм.

3. Результаты измерений записать в табл. 402.2.

Таблица 402.2

Номер минимума n	0	2	4	6	8
Отсчёт по линейке L_n , мм					
Разность хода $L_n - L_0$, мм					
Скорость звука v , м/с					

402.7. Обработка результатов измерений и оценка погрешностей

1. Рассчитать скорость звука v в воздухе по формуле (402.6), используя результаты измерений Δl и $\Delta \varphi$ из табл. 402.1.

2. Оценить погрешность измерения скорости, полагая $\Delta v = 0$. Результат записать в виде

$$v = v_0 \pm \Delta v.$$

3. Определить температуру T , соответствующую условиям данного эксперимента, по формуле (402.2), используя табличные значения R и μ , а также измеренное значение скорости звука v в воздухе.

4. Оценить погрешность измерения температуры T . Результат представить в виде

$$T = T_0 \pm \Delta T.$$

5. Рассчитать скорость звука v в воздухе по формуле (402.15), используя значения n , L_0 и L_n из табл. 402.2 и значение частоты ν генератора.

6. Оценить погрешность измерения скорости, считая погрешности ΔL_0 и ΔL_n одинаковыми, а $\Delta \nu = 0$.

7. Сравнить полученные в пп. 1 и 5 результаты и сделать соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит скорость звука в воздухе?
2. В чем состоит сущность измерения скорости звука по методу сложения взаимно перпендикулярных колебаний?
3. При каких фазовых соотношениях между исходными колебаниями на экране осциллографа наблюдаются прямая линия, круг или эллипс?
4. Выведите уравнение (402.10), описывающее результирующее колебание.
5. Объясните, почему при перемещении преобразователя b происходит изменение формы кривой результирующего колебания, наблюдаемого на экране осциллографа.
6. Объясните, что представляют собой фигуры Лиссажу.
7. В чем состоит сущность измерения скорости звука в воздухе по методу стоячей волны?
8. От каких параметров зависит положение максимумов и минимумов (узлов и пучностей) в стоячей волне?
9. Напишите уравнение стоячей волны и дайте ее определение.
10. Получите формулы для нахождения погрешностей измерений.
11. Выведите уравнение стоячей волны (402.12).

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1986. – Т.1. – 432 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1988. – Т.2. – 496 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.

**Сластен Михаил Иванович
Какурина Наталья Андреевна
Какурин Юрий Борисович**

**РУКОВОДСТВО К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ФИЗИКА ПО РАЗДЕЛУ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск Какурин Ю.Б.
Редактор Проценко И.А.
Корректор Проценко И.А.

Подписано в печать

Заказ № Тираж 20 экз.

Формат 60x84 1/16. Усл. п. л. – 2,3. Уч.-изд. л. – 2,1.

Издательство Южного федерального университета
344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. (863)2434166.
Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией в
г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной
продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1. Тел. (8634)371717.