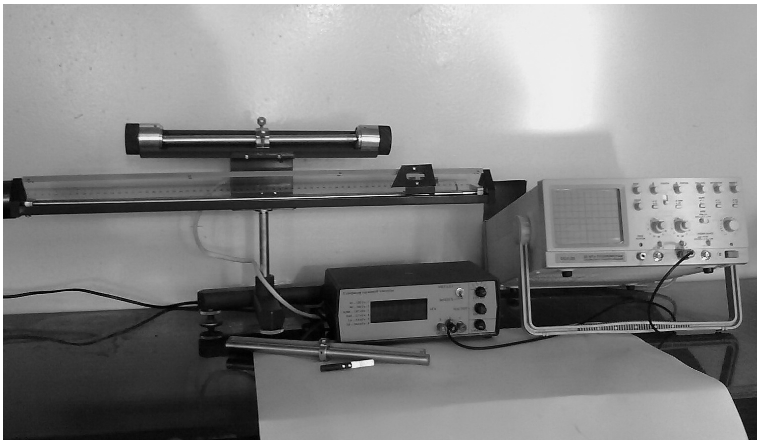
ФИЗИКА

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



♦ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ♦

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

ФИЗИКА

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Лабораторные работы для студентов 1 курса дневного
и 2 курса заочного отделений инженерных специальностей

Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

УДК 534
ББК В236.35я73-5
Ф503

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика»
С.И. Лазарев

Составители:

В.Б. Вязовов, С.П. Кудрявцев, В.П. Плотников,
А.М. Подкауро, В.А. Шишин

Ф503 Физика. Механические колебания и волны : лабораторные работы / В.Б. Вязовов, С.П. Кудрявцев, В.П. Плотников, А.М. Подкауро, В.А. Шишин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 32 с. – 100 экз.

Представлены лабораторные работы по курсу «Физика. Механические колебания и волны».

Предназначены для студентов 1 курса дневного и 2 курса заочного отделений инженерных специальностей.

УДК 534
ББК В236.35я73-5

Учебное издание

ФИЗИКА

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Лабораторные работы

Составители:

ВЯЗОВОВ Виктор Борисович,
КУДРЯВЦЕВ Сергей Павлович,
ПЛОТНИКОВ Владимир Павлович,
ПОДКАУРО Александр Михайлович,
ШИШИН Валерий Анатольевич

Редактор Е.С. Мордасова
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 29.10.2009
Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 462

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Лабораторная работа 1

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: ознакомиться с явлениями, связанными с затухающими колебаниями пружинного маятника; определить жёсткость пружины, коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания.

Приборы и принадлежности: пружина, груз, весы, секундомер, вертикальная шкала.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Процессы, обладающие той или иной степенью повторяемости называются колебаниями. Простейший вид колебаний – свободные и гармонические колебания. Свободные – это колебания системы, предоставленной самой себе после выведения её из состояния равновесия. Гармонические колебания – это колебания, подчиняющиеся закону синуса или косинуса:

$$x = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Рассмотрим пружинный маятник – колебательную систему, состоящую из упругой пружины и груза массой m. В состоянии равновесия вес груза уравновешивается силой упругости пружины (рис. 1):

$$mg = k\Delta l, \tag{1}$$

где Δl – удлинение пружины под действием груза; k – жёсткость пружины.

Сместим груз из положения равновесия на расстояние x. Удлинение пружины при этом станет равным $(x + \Delta l)$. Результирующая сила будет равна

$$F = mg - k(\Delta l + x)$$

или с учётом соотношения (1)

$$F = -kx.$$

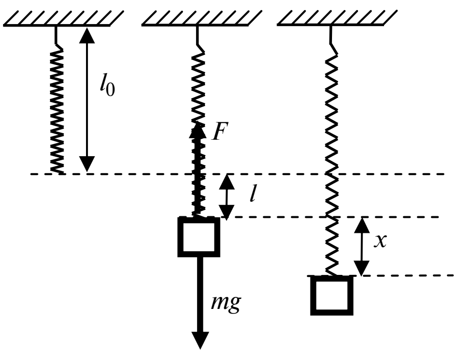


Рис. 1

Колебания, происходящие в вязкой среде, со временем затухают из-за действия сил сопротивления. Если затухание колебаний происходит медленно, то их приближённо можно считать периодическими. При сравнительно медленных движениях колеблющегося груза сила сопротивления равна

$$R = \frac{-r dx}{dt},$$

где r – коэффициент сопротивления. Уравнение движения груза для затухающих колебаний:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - r\frac{dx}{dt}.$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где $\beta = \dfrac{r}{2m}$ – коэффициент затухания, A_0 – начальная амплитуда. Амплитуда колебаний убывает по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 e^{-\beta t}. \tag{2}$$

Отношение двух амплитуд, отстоящих по времени на период, называется декрементом затухания:

$$\frac{A_{(t)}}{A_{(T+t)}} = \frac{e^{-\beta t}}{e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta T}.$$

Натуральный логарифм этого отношения называют логарифмическим декрементом затухания:

$$\delta = \ln\frac{A_{(t)}}{A_{(T+t)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T.$$

Для амплитуд, отличающихся друг от друга на n периодов

$$\delta = \frac{1}{n}\ln\frac{A_0}{A_n} = \frac{n\beta T}{n} = \beta T. \tag{3}$$

Работа выполняется на установке, состоящей из цилиндрической спиральной пружины с подвешенным к ней деревянным бруском, к которому крепится груз массой m (рис. 2). Надпись на бруске указывает его массу m_0. Амплитуда колебаний груза измеряется по вертикальной шкале, проградуированной в сантиметрах. Отсчёт ведётся по верхнему краю бруска.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I. Определение жёсткости пружины по её удлинению

1. Измерьте на весах массу груза и запишите её значение в журнал наблюдений:

$$m = m_{ср} \pm \Delta m.$$

2. Подвесьте груз к бруску, определите удлинение пружины Δl и запишите в журнал наблюдений:

$$\Delta l = \Delta l_{ср} \pm \Delta(\Delta l).$$

3. По формуле (1) определите жёсткость $k_{ср}$ (массу бруска не учитывайте!).

4. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности для k по формулам

$$E_k = \frac{\Delta m}{m_{ср}} + \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l_{ср}} + \frac{\Delta g}{g_{ср}};\ \Delta k = E_k k_{ср}.$$

. 2

5. Окончательный результат округлите и запишите в виде:

$$k = k_{ср} \pm \Delta k.$$

II. Определение коэффициента затухания и логарифмического декремента затухания

Для определения коэффициента затухания β и логарифмического декремента затухания δ проведём 5 опытов, в каждом из которых измерим время 10 полных колебаний, а также амплитуду в начале и в конце колебаний. Измерение времени будем проводить с помощью секундомера, а амплитуду измерять по шкале, цена деления которой 1 см.

1. Оттяните груз пружинного маятника на A_0 = 30 см (ΔA_0 = 0,5 см) от положения равновесия и от-

пустите его, одновременно включив секундомер. По окончании p = 10 полных колебаний выключите секундомер и зафиксируйте амплитуду $A_р$ последнего десятого колебания. Полученные результаты занесите в табл. 1 и 2. Повторите измерения ещё 4 раза.

Таблица 1

№	t_i, с	Δt_i	$\Delta^2 t_i$	S_n	$t_{ср}$	Δt	E%
1							
2							
3							
4							
5							

Таблица 2

№	$A_{рi}$, см	$\Delta A_{рi}$	$\Delta^2 A_{рi}$	S_n	$A_{р\ ср..}$	$\Delta A_{\mathbf{р}}$	E%
1							
2							
3							
4							
5							

2. Рассчитайте среднее значение $t_{ср}$ по формуле

$$t_{ср} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{n}.$$

3. Заполните оставшиеся столбцы табл. 1, используя формулы:

$$\Delta t_i = t_i - t_{ср}; \quad S_n = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 t_i}{n(n-1)}}; \quad \Delta t = \alpha_n S_n; \quad E = \frac{\Delta t}{t_{ср}},$$

где n = 5; α_n = 2,8 – коэффициент Стьюдента для пяти измерений.

4. Рассчитайте среднее значение периода колебаний по формуле

$$T_{ср} = \frac{t_{ср}}{n}$$

и абсолютную погрешность периода

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{n}.$$

5. Рассчитайте среднее значение амплитуды колебаний после десяти периодов по формуле

$$A_{р\ ср} = \frac{\sum A_{рi}}{n} = \frac{A_{р1} + A_{р2} + A_{р3} + A_{р4} + A_{р5}}{n}.$$

6. Заполняем оставшиеся столбцы табл. 2, используя формулы:

$$\Delta A_{pi} = A_{pi} - A_{p\,cp}\,; \quad S_n = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 A_{pi}}{n(n-1)}}\,; \quad \Delta A_p = \alpha_n S_n\,; \quad E_p = \frac{\Delta A_p}{A_{p\,cp}}\,,$$

где $n = 5$, $\alpha_n = 2{,}8$ – коэффициент Стьюдента для пяти измерений.

7. С помощью соотношения (3) рассчитайте средние значения логарифмического декремента затухания $\delta_{ср}$ и коэффициента затухания $\beta_{ср}$, подставляя вместо $A_р$ и T их средние значения из табл. 1 и 2.

8. Найдите абсолютные погрешности $\Delta\delta$ и $\Delta\beta$ по формулам (приводятся без вывода):

$$\Delta\delta = \frac{1}{n}(E_{A_0} + E_{A_p})\,,$$

где $E_{A_0} = \frac{\Delta A_0}{A_0}$ – относительная погрешность начальной амплитуды; $E_{A_p} = \frac{\Delta A_p}{A_p}$ – относительная погрешность конечной амплитуды;

$$\Delta\beta = E_\beta \beta_{ср}, \quad E_\beta = E_T = \frac{1}{n\delta_{ср}}(E_{A_0} + E_{A_p}) + E_T\,,$$

где $E_T = \frac{\Delta T}{T_{ср}}$ – относительная погрешность периода колебаний.

9. Окончательные результаты округлите и запишите в виде: $\delta = \delta_{ср} \pm \Delta\delta$; $\beta = \beta_{ср} \pm \Delta\beta$.

III. Определение жёсткости пружины по периоду колебаний маятника

Зная период T колебаний маятника и общую массу $(m_0 + m)$ груза, можно (пренебрегая затуханием) вычислить жёсткость пружины из формулы $T = 2\pi\sqrt{\frac{m_0 + m}{k}}$ и сравнить её с полученным значением из первого опыта (пункт I).

1. По формуле $k = \frac{4\pi^2(m_0 + m)}{T_{ср}^2}$ определите жёсткость пружины.

2. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности для k по формулам

$$E_k = \frac{2\Delta\pi}{\pi} + \frac{\Delta m_0 + \Delta m}{m_0 + m} + \frac{2\Delta T}{T_{ср}}\,; \ \Delta k = E_k k_{ср}\,.$$

3. Окончательный результат округлите и запишите в виде:

$$k = k_{ср} \pm \Delta k\,.$$

Подумайте, какими факторами можно объяснить некоторое отличие сравниваемых величин.

Контрольные вопросы

1. Классификация колебаний. Основные характеристики колебаний.
2. Поясните вывод дифференциального уравнения затухающих колебаний.
3. Изобразите качественно график зависимости координаты груза от времени при затухающих колебаниях, а также запишите и прокомментируйте соответствующую аналитическую формулу.
4. Какие факторы влияют на затухание колебаний в данной работе? Можно ли добиться того, чтобы колебания совсем не затухали?
5. Как логарифмический декремент затухания, так и коэффициент затухания характеризуют скорость уменьшения амплитуды колебаний. В чём отличие между ними?
6. Во что превращается механическая энергия при затухающих колебаниях?
7. С помощью каких методов и приёмов можно повысить точность измерений (уменьшить погрешности измеряемых величин в данной работе)?
8. Рассчитать по данным лабораторной работы время, за которое амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз,

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКОВ

Цель работы: научиться определять ускорение свободного падения с помощью математического и физического маятников.

Приборы и принадлежности: стальной шарик, подвешенный на нити, оборотный маятник, секундомер, линейка, штангенциркуль.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

I. Определение ускорения свободного падения с помощью шарика, подвешенного на нити

Период малых колебаний математического маятника зависит только от длины l нити и ускорения свободного падения g и определяется соотношением

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\,.$$

Маленький шарик, подвешенный на длинной нити, можно с некоторым приближением рассматривать в качестве модели математического маятника. Если измерить время t некоторого числа n полных колебаний шарика, то для периода его колебаний можно записать

$$T = \frac{t}{n}\,. \qquad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и решая последнее относительно g получаем

$$g = \frac{(2\pi)^2 l n^2}{t^2}\,. \qquad (3)$$

В формуле (3) l – расстояние от точки подвеса до центра шарика, поэтому, если длина нити L, а диаметр шарика d, то $l = L + d/2$, откуда

$$g = \frac{(2\pi)^2 (L + \frac{d}{2}) \cdot n^2}{t^2}\,. \qquad (4)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить линейкой длину нити L и штангенциркулем диаметр шарика d.
2. Отклонить маятник из положения равновесия на угол, не превышающий 5…6°, и предоставить ему возможность свободно колебаться.
3. Произвести измерение времени t 20-ти полных колебаний.
4. Повторить измерения ещё 4 раза. Результаты внести в табл. 1.

Таблица 1

№	t_i	Δt_i	Δt_i^2	Sn	Δt
1 … … …					

5					
	$t_{ср}$				

$L = ...,$ м; $\Delta L = ...,$ м; $d = ...,$ мм; $\Delta d = ...,$ мм; $n = 20.$

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 рассчитать значения $t_{ср}$ и абсолютную погрешность его определения по методу Стьюдента.

2. По формуле (4) вычислить ускорение свободного падения.

3. Оценить абсолютную и относительную погрешности определения ускорения свободного падения этим методом.

4. Результаты измерений представить в виде

$$g = (g_{ср} \pm \Delta g)\,(\text{м/с}^2);\;\; E...\ \%.$$

II. Определение ускорения свободного падения с помощью оборотного маятника

Более точно можно определить ускорение свободного падения с помощью оборотного маятника, представляющего собой стальной стержень с жёстко закреплёнными параллельными призмами *1* и *2*, неподвижным грузом *3* и подвижным – *4* (рис. 1). Передвигая подвижный груз вдоль стержня, можно изменять момент инерции маятника.

Физическим маятником называется тело, которое может колебаться относительно оси, не проходящей через его центр масс. Период малых колебаний физического маятника определяется соотношением

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mga}}\,, \tag{5}$$

где J – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса; m – масса маятника; a – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника; g – ускорение свободного падения.

Если оборотный маятник установить на призму *1*, то период его колебаний равен

$$T_i = 2\pi\sqrt{\frac{J_1}{mga_1}}\,, \tag{6}$$

где (по теореме Штейнера)

$$J_1 = J_0 + ma_1^{\,2}\,; \tag{7}$$

J_0 – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через его центр масс C.

Если перевернуть маятник и установить на призму *2*, то его период колебаний равен

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J_2}{mga_2}}\,, \tag{8}$$

где

$$J_2 = J_0 + ma_2^{\,2}\,. \tag{9}$$

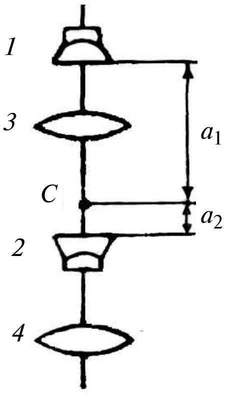
Подставляя (7) и (9) в соотношения (6) и (8), соответственно, и исключая величину J_0, получим

$$T_1^2 ga_1 - T_2^2 ga_2 = 4\pi^2 (a_1^{\,2} - a_2^{\,2}),$$

$$g = \frac{4\pi^2 (a_1{}^2 - a_2{}^2)}{T_1^2 a_1 - T_2{}^2 a_2} . \qquad (10)$$

Регулированием положения груза *4* на стержне маятника можно добиться равенства периодов колебаний маятника на обеих призмах, т.е. $T_1 = T_2 = T$. С учётом этого формула (10) примет вид:

$$g = 4\pi^2 L / T^2 ,$$



. 1

где $L = a_1 + a_2$ – расстояние между призмами маятника. Необходимо обратить внимание на то, что период колебаний оборотного маятника в этом случае будет равен периоду математического маятника с длиной, равной расстоянию L между призмами *1* и *2* (рис. 1). Этот факт используется для грубой настройки оборотного маятника. Используя соотношение (2), получим окончательно:

$$g = \frac{4\pi^2 L n^2}{t^2} , \qquad (11)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Поставить оборотный маятник на призму *1*.
2. Регулируя длину нити с помощью лебёдки, установить центр шарика, примерно на одной высоте с ребром нижней призмы *2*.
3. Отклонив одновременно шарик на нити и оборотный маятник от положения равновесия на угол, не превышающий 5…6°, предоставить им возможность совершать свободные колебательные движения. Перемещая груз *4* вдоль стержня, добиться того, чтобы в течение 10 полных колебаний маятник и шарик двигались примерно с одинаковыми фазами, что соответствует приблизительному равенству периодов. После этого грубую настройку оборотного маятника можно считать законченной.
4. Точная настройка маятника имеет целью равенство периодов колебаний на призмах *1* и *2* с возможно большей точностью. Для этого необходимо сравнить времена t_1 и t_2 50-ти полных колебаний на призмах *1* и *2*. Устанавливая маятник последовательно на обе призмы и перемещая груз *4* (в небольших пределах), добиться того, чтобы разница ($t_1 - t_2$) не превышала 1 с. Следует учесть, что положение груза *4* влияет как на t_1, так и на t_2. Таким образом, после каждого перемещения груза необходимо заново измерять t_1 и t_2. Окончательную величину $t_1(t_2)$ записать в тетрадь.
5. Измерить расстояние L между рёбрами призм *1* и *2*.

Обработка результатов измерений

1. По формуле (11) рассчитать величину g. В качестве t взять окончательную величину $t_1(t_2)$.
2. Оценить абсолютную и относительную погрешности определения g этим методом, учитывая, что $\Delta t = | t_1 - t_1 | \leq 1c$.
3. Результаты измерений представить в виде

$$g = (g_{ср} \pm \Delta g)\,(\text{м/с}^2); \;\; E ... \%.$$

Контрольные вопросы

1. Пояснить, от чего зависит сила тяжести. Записать соответствующие соотношения. Что такое центр масс и момент инерции тела?
2. Дать определение физическому и математическому маятникам.
3. Составить дифференциальное уравнение колебаний для физического маятника и получить формулу для его периода колебаний.
4. Дать определение приведённой длины физического маятника и вывести формулу для её вычисления.
5. Сформулировать теорему Штейнера и показать её применение на простейших примерах.
6. Вывести расчётные соотношения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА И ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: определение периода и логарифмического декремента затухающих колебаний маятника.

Приборы и принадлежности: крутильный маятник, секундомер.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Крутильный маятник представляет собой крестовину, подвешенную на вертикально укреплённой упругой проволоке. Отклоняя маятник из положения равновесия на небольшой угол в горизонтальной плоскости наблюдают свободные колебания, возникающие под действием момента упругих сил.

Этот момент M пропорционален углу закручивания проволоки, причём он стремится его уменьшить:

$$M = -k\alpha,$$

где k – коэффициент кручения, равный моменту силы, необходимому для закручивания нити на 1 рад.

Также на маятник будет действовать момент силы сопротивления, который будет пропорционален угловой скорости

$$M_c = -r\omega$$

или, учитывая, что угловая скорость равна первой производной угла закручивания проволоки, момент силы сопротивления равен:

$$M_c = -r\frac{d\alpha}{dt} = -r\dot{\alpha}\ .$$

Результирующий момент сил, согласно основному закону динамики вращательного движения, будет равен произведению момента инерции крутильного маятника (J) на его угловое ускорение (ε)

$$-k\alpha - r\dot{\alpha} = J\varepsilon\ . \qquad (1)$$

Учитывая, что угловое ускорение есть вторая производная угла закручивания проволоки

$$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \ddot{\alpha}$$

выражение (1) будет иметь вид:

$$-k\alpha - r\dot{\alpha} = J\ddot{\alpha}$$

или:

$$J\ddot{\alpha} + r\dot{\alpha} + k\alpha = 0\ . \qquad (2)$$

Поделим уравнение (2) на J, получим:

$$\ddot{\alpha} + \frac{r}{J}\dot{\alpha} + \frac{k}{J}\alpha = 0\ . \qquad (3)$$

Обозначим: $\frac{r}{J} = 2\beta$, а $\frac{k}{J} = \omega_0^2$, тогда зависимость (3) будет иметь вид:

$$\ddot{\alpha} + 2\beta\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = 0\ . \qquad (4)$$

Выражение (4) – однородное дифференциальное уравнение второго порядка, решение которого имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \tag{5}$$

где α_0 – начальная амплитуда колебаний – величина наибольшего отклонения маятника из положения равновесия; β – коэффициент затухания колебаний; $(\omega t + \varphi)$ – фаза колебаний; φ – начальная фаза колебаний; ω – круговая частота, равная $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T – период колебаний.

Отношение двух амплитуд, отличающихся на период, называется декрементом затухания

$$\Delta = \frac{\alpha_{(t)}}{\alpha_{(t+T)}}.$$

Натуральный логарифм этого отношения называется логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = \ln\frac{A_{(t)}}{A_{(t+T)}} = \ln\frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T. \tag{6}$$

Значение коэффициента затухания из формулы (6) будет равно:

$$\beta = \frac{\lambda}{T}.$$

Подставляя значения β и ω в уравнение (5) получим:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\lambda\frac{t}{T}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right). \tag{7}$$

В последнем выражении все величины могут быть измерены в ходе выполнения лабораторной работы.

Целью нашего экспериментального исследования является определение периода затухающих колебаний крутильного маятника и логарифмического декремента затухания.

Так как логарифмический декремент затухания исследуемого маятника мал, то экспериментально не удаётся зафиксировать различие двух последующих через период амплитуд.

Поэтому первоначально необходимо измерить α_0, а амплитуду α – после того, как маятник совершит n полных колебаний.

Время колебаний будет равно:

$$t = nT. \tag{8}$$

Тогда $\alpha = \alpha_0 e^{-\beta n T}$.

Найдём логарифм отношения амплитуд α и α_0

$$\ln\frac{\alpha_0}{\alpha} = \ln\frac{\alpha_0}{\alpha_0 e^{-\beta n T}} = \beta n T.$$

Поскольку βT согласно формуле (6) равно логарифмическому декременту затухания (λ), то

$$\lambda = \frac{1}{n}\ln\frac{\alpha_0}{\alpha}. \tag{9}$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Отклоните маятник от положения равновесия приблизительно на 30° и запишите значение начальной амплитуды колебаний α_0. Предоставьте маятнику свободно колебаться и включите секундомер.

2. Отсчитайте n полных колебаний, в течение которых амплитуда уменьшится приблизительно в два раза. Выключите секундомер, запишите его показания и значения амплитуды α. Полученное значение n используйте в последующих четырёх опытах.

3. Повторите опыт пять раз и результаты внесите в табл. 1.

Таблица 1

№	α_0	$\Delta\alpha_0$	α	$\Delta\alpha$	n	Δn	t_i	Δt
1								
…								
…								
…								
5								

Примечание: Ошибку измерений $\Delta\alpha_0$, $\Delta\alpha$, Δt рассчитайте по формуле Стьюдента:

$$\Delta x = \tau\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2}{n(n-1)}},$$

где τ – коэффициент, равный 2,8 (при числе измерений n = 5 и надёжности измерений w = 0,95).

Ошибку измерений числа колебаний n возьмите равной Δn = 0,5.

Определение периода крутильных колебаний маятника.

Период колебаний маятника рассчитайте по формуле:

$$\bar{T} = \frac{\bar{t}}{n}.$$

Относительную ошибку периода найдите из выражения:

$$E = \frac{\Delta T}{\bar{T}} = \frac{\Delta t}{\bar{t}} + \frac{\Delta n}{n}.$$

Абсолютную ошибку периода колебаний ΔT определите из соотношения:

$$\Delta T = E\bar{T}.$$

Окончательный результат для периода колебаний маятника представьте в виде:

$$T = (T_{ср} \pm \Delta T), \text{ с.}$$

Определение логарифмического декремента затухания колебаний маятника.

Логарифмический декремент затухания (λ) рассчитайте по формуле

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{\alpha_0}{\alpha}. \qquad (1)$$

Примечание: подставляйте в формулу средние значения α_0 и α.

Относительную ошибку логарифмического декремента (λ) найдите по формуле:

$$E = \frac{\Delta\lambda}{\overline{\lambda}} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{1}{\ln \frac{\alpha_0}{\alpha}} \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{\Delta\alpha_0 \alpha - \Delta\alpha \alpha_0}{\alpha^2}. \qquad (2)$$

Абсолютную ошибку ($\Delta\lambda$) найдите, используя зависимость:

$$\Delta\lambda = \overline{\lambda} E. \qquad (3)$$

Окончательный результат запишите в виде:

$$\lambda = (\lambda_{ср} \pm \Delta\lambda), \text{ м}. \qquad (4)$$

Контрольные вопросы

1. Выведите дифференциальное уравнение крутильных колебаний маятника и запишите вид его решения.
2. Запишите уравнение для периода затухающих колебаний, поясните, при каких условиях имеет смысл говорить о периоде таких колебаний.
3. Дайте определения, поясните физический смысл и выведите формулы для λ и β.

Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции звуковых волн.

Приборы и принадлежности: металлическая труба с подвижным поршнем, звуковой генератор с телефоном, осциллограф, микрофон, измерительная линейка.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Метод определения скорости звука основан на свойствах звуковой стоячей волны. Стоячие волны являются частным случаем интерференции волн и характеризуются точками: а) колебания в которых отсутствуют (точки *B* рис. 1 – узлы); б) амплитуда колебаний в которых максимальная (точки *C* на рис. 1 – пучности).

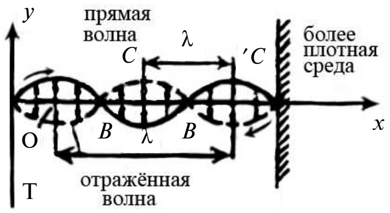
Колебания во всех точках стоячей волны, лежащих между двумя соседними узлами, происходят с различными амплитудами, но одинаковыми фазами.

Расстояние между соседними узлами или пучностями называется длиной стоячей волны $(\lambda_{ст})$. Длина звуковой (бегущей) волны

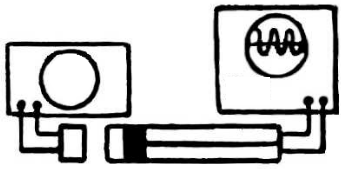
$$\lambda_{зв} = 2\lambda_{ст}. \qquad (1)$$

В экспериментальной установке (рис. 2), состоящей из звукового генератора ЗГ с телефоном Т, трубы О, в которой образуются стоячие волны, и подвижного поршня П, звуковые волны распространяются только вдоль трубы. Звуковые стоячие волны образуются в ограниченном с двух сторон столбе воздуха: 1) из прямой волны (сплошная линия), идущей от телефона Т к поршню П (рис.1, 3); 2) из отражённой (пунктир) от поршня П волны, фаза которой изменилась на обратную, так как отражение происходит от среды акустически более плотной. В данном случае при отражении произошла потеря полуволны. При определённых условиях в трубе О возникает акустический резонанс.

Резонанс – явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в колебательной системе при приближении частоты внешней силы (вызывающей вынужденные колебания) к частоте какой-либо из собственных колебаний данной колебательной системы. В данном случае имеем акустический резонанс, т.е. явление, при котором колебания столба воздуха в трубе достигают максимальной амплитуды. Это происходит тогда, когда частота звуковых колебаний мембраны (внешняя, вынуждающая сила) приближается к одной из собственных частот воздушного столба в трубе. Эта частота называется резонансной. При резонансной частоте звучание воздушного столба в трубе максимально.



. 1



. 2

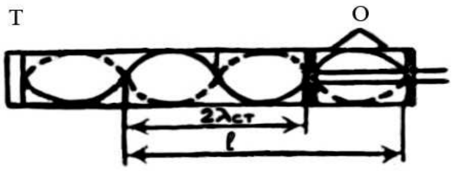


Рис. 3

Для наблюдения акустического резонанса нужно, чтобы столб воздуха в трубе О резонировал на звуковые волны, возбуждаемые источником звука – телефоном Т.

Для этого необходимо, чтобы длина столба воздуха в трубе между Т и П удовлетворяла условию:

$$l = m\frac{\lambda_{зв}}{2}; \quad l = m\lambda_{с}, \tag{2}$$

где m = 1, 2, 3, …, – число длин стоячих волн. На рис. 3 на длине l столба воздуха в трубе укладывается $3\lambda_{ст}$ (при m = 3).

При определённой длине воздушного столба увеличивают частоту ЗГ, а, следовательно, уменьшают длину звуковой волны. При достижении первой максимальной амплитуды на экране осциллографа (m = 1), на длине отрезка трубы укладывается одна $\lambda_{ст}$ или половина $\lambda_{зв}$. Это соответствует основной резонансной частоте данного воздушного столба.

Увеличивая частоту ЗГ определяют следующие резонансные частоты (m = 2, 3, и т.д.), при которых на длине трубы уже укладываются $2\lambda_{ст}$, $3\lambda_{ст}$ и т.д. Измеряют длину воздушного столба в трубе, определяют значения m и по формуле (2) находят $\lambda_{зв}$, которая связана со скоростью распространения:

$$V_{зв} = \lambda_{зв}\nu , \tag{3}$$

где ν – резонансная частота, снимаемая со звукового генератора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом измерений необходимо ознакомиться с работой на звуковом генераторе и осциллографе. Излучателем в данной работе служит телефон Т, подключённый к звуковому генератору ЗГ, а в качестве регистратора колебаний используется осциллограф. Для получения звукового сигнала надо (только с разрешения преподавателя или лаборанта) включить генератор в сеть, затем поставить тумблер «СЕТЬ» на панели генератора в положении «ВКЛ» (при этом загорится сигнальная лампочка) и спустя 2–3 минуты, услышав звук и увидев изображение колебаний на экране осциллографа, приступают к измерениям.

1. Установив определённую длину воздушного столба вращают ручку частоты звукового генерато-

ра до появления первой максимальной амплитуды на экране осциллографа (максимального звучания).

2. Снимают показание частоты с ЗГ, соответствующее $m = 1$ и заносят в табл. 1.

Таблица 1

№	l	ν	m	$\lambda_{ст}$	$\lambda_{зв}$	V	ΔV	E
1 2 3								

3. Увеличивают частоту и определяют следующие максимумы (для $m = 1, 2, 3$ и т.д.) и частоты.
4. По формулам (1, 2) рассчитывают $\lambda_{ст}$ и $\lambda_{зв}$, а по формуле (3) – фазовую скорость распространения звука $V_{зв}$.
5. Находят среднюю скорость звука и подсчитывают ошибки измерений.
6. Измерения и расчёты повторяют ещё для двух длин воздушных столбов.

Результаты измерений записать в виде:

$$\lambda = \lambda \pm \Delta\lambda; \quad \nu = \nu \pm \Delta\nu; \quad E_1 = \Delta\lambda/\lambda; \quad E_2 = \Delta\nu/\nu .$$

Контрольные вопросы

1. Как образуется стоячая волна? Основные характеристики стоячей волны.
2. Вывести уравнение стоячей волны.
3. Что вы понимаете под явлением резонанса?
4. Чем принципиально отличается бегущая волна от стоячей?

Лабораторная работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И ТВЁРДОМ ТЕЛЕ.

Цель работы: Определение распространения звуковых волн в воздухе и твёрдых телах.

Приборы и принадлежности: Установка для изучения распространения звука в воздухе и твёрдом теле ФПВ–03 (рис. 1), осциллограф.

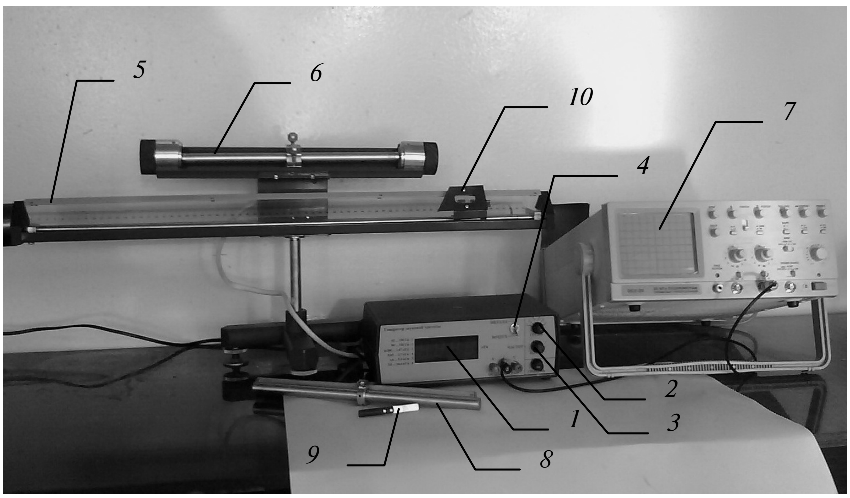


Рис. 1. Установка ФПВ–03

1 – генератор звуковых колебаний; *2* – рукоятка грубой настройки частоты;
3 – рукоятка плавной настройки частоты;
4 – переключатель положений измерений в воздухе и твёрдом теле;
5 – волновод для измерения скорости звука в воздухе;
6 – волновод для измерения скорости звука в твёрдом теле; *7* – осциллограф;
8 – металлические стержни; *9* – щуп; *10* – микрофон

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

I. Определение скорости распространения звуковых волн в воздухе

1. Включить генератор звуковых волн в сеть и установить по указанию преподавателя частоту.
2. Включить осциллограф и, подождав 1–2 минуты, получить изображение на экране.
3. Установить микрофон в крайнее левое положение и, выдвигая его, получить на экране осциллографа картину максимального усиления колебаний – первую пучность.

Продолжая выдвижение микрофона, получить следующее изображение пучности. Измеренное расстояние между первой и второй пучностями и является длиной стоячей волны. Необходимо находить и измерять расстояния между следующими соседними пучностями на протяжении всего воздушного столба.

4. Рассчитать среднее значение из полученных длин стоячей волны и записать его в табл. 1.
5. Длину звуковой волны определить по формуле:

$$\lambda_{\text{зв}} = 2\lambda_{\text{ст}}\,. \tag{1}$$

Занесите этот результат в табл. 1.

6. Скорость звука в воздухе равна:

$$V_{\text{зв}} = \lambda_{\text{зв}}\,\nu, \tag{2}$$

где ν – частота генератора.

7. Проделайте те же измерения и расчёты ещё раз для двух частот и полученные данные занесите в табл. 1.

Таблица 1

№	ν_i	$\lambda_{\text{ст}}$	$\lambda_{\text{зв}}$	$V_{\text{зв}}$	$\Delta V_{\text{зв}}$	E
1						
2						
3						

Результаты записать в виде:

$$V = (\overline{V} \pm \Delta V)\ \text{[м/с]};\ \ E = \frac{\Delta V}{\overline{V}} 100\ \%\,.$$

II. Определение скорости распространения звуковых волн в твёрдых телах методом резонанса

На концах стержней исследуемых материалов (сталь, алюминий, латунь) запрессованы шайбы из ферромагнитного материала. Сам стержень жёстко закрепляется на установке.

С одной из его сторон на расстоянии 0,1–0,3 мм находится датчик. Изменяя частоту генератора, меняем частоту тока, протекающего через датчик. При этом конец стержня начинает притягиваться к датчику с частотой тока и в нём возникают продольные волны, отражающиеся от противоположного конца стержня. Изменяя плавно частоту, получаем стоячую волну.

Колебания, воспринимающиеся приёмником на противоположном конце стержня, подаются на вертикальный вход осциллографа. При стоячей волне образуется резонанс, т.е. собственная частота колебаний стержня совпадает с возбуждающей частотой, что приводит к увеличению амплитуды колебаний.

При первой резонансной частоте на длине стержня укладывается половина длины стоячей волны.

Зная длину стержня, определяем скорость звуковой волны по формуле:

$$V_{зв} = 2l\nu \,, \tag{3}$$

где l – длина стержня, ν – частота генератора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите на штативе стержень из алюминия.
2. Поставьте переключатель диапазонов генератора № 4 в положение «Металл».
3. При помощи щупа выставьте зазоры между датчиками и стержнем порядка 0,1 мм.
4. Включите осциллограф и дайте ему нагреться 1–2 минуты.
5. Переведите рукоятку генератора *2* («Грубо») в положение *6*.
6. Вращая рычаг плавной настройки частоты, добейтесь на экране осциллографа *7* картины резонанса.

Примечание: ищите резонансную частоту в интервале (7000 – 8000) Гц.

7. Рассчитайте скорость звука по формуле (3).
8. Определите относительную и абсолютную ошибки для скорости звука по формулам (4) и (5) соответственно:

$$E = \frac{\Delta V}{\overline{V}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta\nu}{\nu} \,, \tag{4}$$

$$\Delta V = E\overline{V} \,. \tag{5}$$

Запишите окончательный результат: $V = (\overline{V} \pm \Delta V)$, м/с.

9. Установите на штативе стержень из железа и выполните измерения по п. 2 – 8.
10. Установите на штативе латунный стержень и выполните измерения по п. 2 – 8.

Примечание: Ищите резонансную частоту для:

а) железного стержня в интервале (5000 – 6000) Гц;

б) латунного стержня (5500 – 6500) Гц.

Контрольные вопросы

1. Что такое стоячая волна?
2. Условие образования стоячих волн.
3. Уравнение стоячей волны.
4. Вывести формулу для координаты пучностей и координаты узлов стоячей волны.
5. Графическое изображение стоячей волны.
6. Энергия стоячей волны.

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ

Цель работы: изучить стоячие волны, определить частоту собственных колебаний струны и фазовую скорость волны.

Приборы и принадлежности: установка для изучения собственных колебаний струны ФПВ–О4.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Во время распространения в среде одновременно нескольких волн колебания частиц среды можно определить геометрической суммой колебаний, которые выполняла бы частица при распространении любой из волн в отдельности, т.е. волны просто накладываются между собой, не возмущая друг друга. Это утверждение называется принципом суперпозиции волн. Если накладываются две волны, идущие навстречу друг другу, образуется волна, называемая *стоячей*. На практике стоячие волны возникают при наложении прямой и отражённой от препятствия волн. Например, можно получить стоячую волну, если закрепить один конец струны или тонкого стержня к стене. Прямая волна отражается от стены и отражённая волна накладывается на прямую, образовывая стоячую волну. Найдём уравнения стоячей волны. Уравнения прямой и отражённой волн можно записать следующим образом:

$$S_1 = A\cos[\omega t - kx + \alpha_1],$$
$$S_2 = A\cos[\omega t - kx + \alpha_2].$$

Амплитуды и частоты прямой и отражённой волн одинаковые. Уравнение стоячей волны имеет вид:

$$S = S_1 + S_2 = 2A\cos\left(kx + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)\cos\left(\omega t + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}\right).$$

Для упрощения выберем начало отсчёта координаты так, чтобы $\alpha_2 - \alpha_1 = 0$, а начало отсчёта времени так, чтобы $\alpha_2 + \alpha_1 = 0$. Тогда получим следующие уравнения стоячей волны:

$$S = S_1 + S_2 = 2A\cos kx \cos\omega t.$$

Амплитуда стоячей волны зависит от координаты x:

$$A_{\text{ст}} = 2A\cos kx$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию:

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm n\pi,$$

где n = 0, 1, 2, 3, ..., амплитуда колебаний достигает максимальных значений $A_{\text{ст}} = 2A$ (рис. 1). Эти точки называют *пучностями* стоячей волны, координаты которых можно определить по формуле:

$$x_{\text{пуч}} = \pm n\frac{\lambda}{2}.$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию:

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi,$$

где n = 1, 2, 3, ..., амплитуда колебаний равна 0: $A_{ст}$ = 0. Эти точки называются *узлами* стоячей волны, координаты которых можно определить по формуле:

$$x_{уз} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}.$$

Пучности и узлы представляют собой не одну точку, а плоскости. Расстояние между соседними пучностями или соседними узлами называется *длиной* стоячей волны и равно половине длины прямой волны: $\lambda_{ст} = \lambda/2$.

Тогда расстояние между соседними узлом и пучностью равняется $\lambda/4$. Точки, которые находятся по разные стороны от узла, колеблются в противофазе. Все точки, которые размещаются между соседними узлами, колеблются в одной фазе. В отличие от прямой волны в стоячей не происходит переноса энергии, она периодически переходит из кинетической в потенциальную упруго деформированной среды, и наоборот.

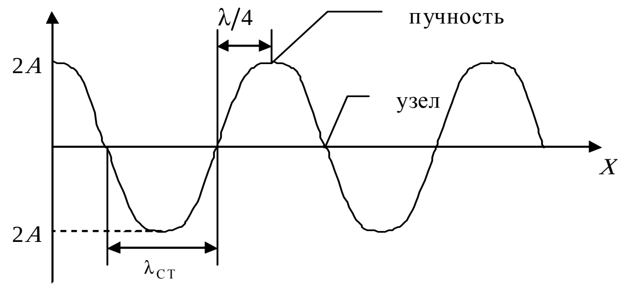


Рис. 1

Потенциальная энергия сосредоточена вблизи узлов, а кинетическая – вблизи пучностей. Скорость частиц во время распространения стоячей волны определяется по формуле:

$$V = \frac{ds}{dt} = -2A\omega\cos kx \sin \omega t.$$

Деформация среды равна:

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} = -2a\sin kx \sin \omega t.$$

Отсутствие переноса энергии стоячей волной можно объяснить тем, что прямая и отражённая волны образующие эту волну, переносят энергию в одинаковых количествах, но в противоположных направлениях.

Рассмотрим колебания струны (или упругого тонкого стержня). Можно различить три способа её закрепления.

1. Если струна закреплена с одного конца, на свободном конце образуется пучность стоячей волны, а на закреплённом – всегда узел. Поэтому между длиной струны l и длиной стоячей волны $\lambda_{ст}$ выполняется соотношение:

$$l = (2n+1)\frac{\lambda_{ст}}{2}, \ (n = 0, 1, 2, \ldots). \tag{1}$$

Подставив в эту формулу значение $\lambda_{ст}$ и, учитывая связь между λ, V и ν, можно получить формулу для определения частот колебаний струны, которые называются *собственными* частотами:

$$\nu = (2n+1)\frac{\lambda_{ст}}{4l}.$$

2. Если закреплены оба торца струны, тогда на её концах образуются узлы стоячей волны. Между длиной струны и длиной стоячей волны, которая образуется в ней, выполняется соотношение:

$$l = n\lambda_{\text{ст}},\ (n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots).$$

Выполнив аналогичные (способу 1) преобразования, можно получить формулу для определения собственных частот колебаний струны.

3. Если струна закреплена посредине, тогда на её концах образуются пучности, и между длиной струны и длиной стоячей волны выполняется соотношение:

$$l = (2n+1)\lambda_{\text{ст}},\ (n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots).$$

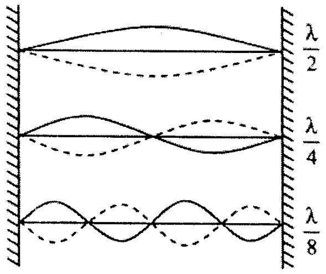


Рис. 2

Выполнив аналогичные (способам 1, 2) преобразования, можно получить формулу для определения собственных частот колебаний струны.

Так же можно создать стоячие волны и в однородной среде в цилиндрических трубах с плоскими стенками. Такие методы получения звуковых волн используют при игре на музыкальных струнных и духовых инструментах.

Частота, которая соответствует n = 1, в формуле (1), когда на длине струны укладывается только одна полуволна, называется *основной частотой* или *основным тоном.* Все следующие частоты соответствуют *обертонам.*

На рис. 2 приведены схемы возбуждения основного тона и обертонов струны.

Метод и экспериментальная установка

В этой работе используют лабораторную установку для измерения собственной частоты колебаний струны (рис. 3). Принцип действия установки состоит в возникновении стоячей волны в натянутой струне с током в постоянном магнитном поле. Лабораторная установка состоит из *объекта исследования* (*струны*) и *измерительного устройства.* Колебания натянутой струны осуществляются путём наложения одна на одну многократно отражённых бегущих волн, в результате чего на струне получается стоячая волна.

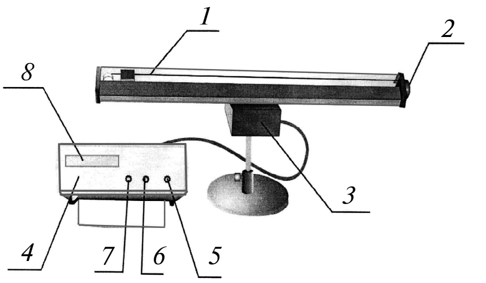


Рис. 3

Струна 1 натянута между полюсами постоянных магнитов. Один конец струны жёстко крепится к основанию, а второй прикреплён к тарировочной пружине. Второй конец пружины механически связан с винтовым механизмом *2*, с помощью которого осуществляется изменение натяжения струны. Сила натяжения струны измеряется с помощью указателя, который перемещается по шкале при изменении натяжения струны. Длину стоячей волны, которая получается на струне, измеряют по шкале, нанесённой на прозрачный кожух. Для улучшения видимости струны за нею размещена лампа подсветки. Устройство питания лампы *3* выполнено в виде отдельного блока и размещено под основанием объекта исследования. На задней панели устройства находятся кабель для соединения с измерительным устройством *4*, шнур для подключения к сети, сетевой выключатель, предохранители и клемма заземления.

Устройство измерительное состоит из генератора колебаний и частотомера для измерения частоты генератора.

На передней панели измерительного устройства размещены следующие органы управления:

– ручки «*Частота Грубо*» *6* и «*Частота Точно*» *5* – для установки частоты генератора;

– ручка «*Уровень*» *7* – для установки необходимой амплитуды выходного напряжения генератора (установка амплитуды колебаний струны);

– цифровое табло частотомера *8*.

В работе определяется *собственная частота* колебаний струны и *фазовая скорость* волны (скорость распространения волны).

В струне, закреплённой с обеих сторон, при протекании переменного тока возникает стоячая волна. При этом собственная частота колебаний струны совпадает с частотой генератора.

В местах закрепления струны образуются узлы. Между длиной струны и длиной стоячей волны выполняется соотношение:

$$l = n\lambda_{\text{ст}},\ (n = 1, 2, 3, \ldots). \tag{2}$$

Учитывая, что $\lambda_{\text{ст}} = \lambda/2 = V/2\nu$, можно получить формулу для определения собственных частот колебаний струны:

$$\nu = nV/2l. \tag{3}$$

Если модуль Юнга E, а плотность материала струны ρ, то фазовая скорость волны $V = \sqrt{E/\rho}$. Поскольку $E = P/S$, а $S = \pi d^2/4$, собственную частоту колебаний струны можно определить по формуле:

$$\nu_T = \frac{n}{ld}\sqrt{\frac{P}{\pi\rho}}, \tag{4}$$

где P – сила натяжения струны; S – площадь сечения струны; d – диаметр струны, равный 0,15 мм; l – длина струны, равная 0,6 м; ρ – плотность меди, равная $8{,}93 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Из выражения (3):

$$V = 2l\nu/n. \tag{5}$$

Подставив в (5) выражение (4), можно получить формулу для определения фазовой скорости стоячей волны:

$$V_T = \frac{2}{d}\sqrt{\frac{P}{\pi\rho}}. \tag{6}$$

Измерив силу натяжения струны и её диаметр, можно по формулам (4) и (6) определить теоретические значения собственной частоты колебаний струны и фазовой скорости волны и сравнить их с экспериментальными.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I. Измерение собственной частоты колебаний струны.

1. Подключить установку к сети 220 В. Нажать кнопку «*Сеть*» устройства питания лампы. После

этого должна засветиться лампа подсветки струны. Нажать кнопку «*Сеть*» измерительного устройства. После этого должно засветиться его цифровое табло.

2. Установка должна прогреться 3 – 5 минут.

3. Поворачивая винтовой механизм, установить силу натяжения струны P_1, значение которой измеряется по шкале с помощью указателя. Пределы изменения силы натяжения струны 0,2 – 0,5 Н.

Примечание. Запрещается задавать силу натяжения струны больше 0,6 Н.

4. Ручку «*Уровень*» установить в среднее положение.

5. Изменяя с помощью ручек «*Частота Грубо*» и «*Частота Точно*» частоту в диапазоне 20 – 45 Гц, получить одну хорошо заметную полуволну на всей длине струны. При этом измерять частоту ν_{1i}. Измерение повторить три раза. Результаты записать в табл. 1.

6. Увеличивая частоту, получить две полуволны. Измерять частоту ν_{2i}. Измерение выполнить три раза. Результаты записать в табл. 1.

Таблица 1

№	Сила натяжения струны P, Н	$n = 1$		$n = 2$		$n = 4$		$\Delta\nu$, Гц	E, %
		ν_{1i}, Гц	$\nu_{1ср}$, Гц	ν_{2i}, Гц	$\nu_{2ср}$, Гц	ν_{3i}, Гц	$\nu_{3ср}$, Гц		
1	P_1 =								
2									
3									
1	P_2 =								
2									
3									
1	P_3 =								
2									
3									

7. Снова увеличить частоту и получить четыре полуволны, измерить частоту ν_{3i}. Измерение выполнить три раза. Результаты записать в табл. 1.

8. Установить силу натяжения струны P_2 и выполнить измерения по п. 5 – 7.

9. Установить силу натяжения струны P_3 и выполнить измерения по п. 5 – 7.

10. По формуле (4) рассчитать теоретические значения собственной частоты колебаний струны ν_T для разных значений силы натяжения струны: P_1, P_2 и P_3. Сравнить экспериментальные и теоретическое значения частот.

II. Определение погрешностей измерения. Рассчитать по методу Стьюдента абсолютную и относительную погрешности измерений для экспериментального значения частоты при заданной преподавателем паре значений силы натяжения струны P_i и количества полуволн n_i.

Коэффициент Стьюдента для трёх измерений и вероятности 0,95 принять равным 4,3.

Результаты представить в виде $\nu = \left(\nu_{ср} \pm \Delta\nu\right)$ Гц; E = … % и записать в табл. 1.

III. Определение фазовой скорости волны.

1. По формуле (5) для каждого среднего значения частоты на основе экспериментальных данных рассчитать фазовую скорость волны.

2. По формуле (6) рассчитать теоретическое значение фазовой скорости волны V_T для разных значений силы натяжения струны: P_1, P_2 и P_3. Результаты записать в табл. 2.

Сравнить экспериментальное и теоретическое значения фазовой скорости волны.

Таблица 2

Сила натяжения струны P, Н	$P_1 =$	$P_2 =$	$P_3 =$
Фазовая скорость волны (теоретическое значение) V_T м/с			

IV. Оформить графически зависимость: $V_T = f(P)$. Используя данные табл. 1, 2, построить график зависимости фазовой скорости волны от силы натяжения струны $V_T = f(P)$.

Контрольные вопросы

1. Что такое стоячая волна?
2. Условие образования стоячих волн.
3. Уравнение стоячей волны.
4. Вывести формулы для координат пучностей и узлов стоячей волны.
5. Графическое изображение стоячей волны.
6. Энергия стоячей волны.
7. Как определить частоту собственных колебаний струны, закреплённой с одного конца, с обоих концов, посредине?
8. Что такое основной тон и обертоны?
9. Доказать, что частота собственных колебаний струны и фазовая скорость стоячей волны зависят от силы натяжения струны.
10. В чём состоит метод экспериментального определения собственной частоты колебаний струны?