

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**В. Ф. ШОЛОХ, А. Л. САМОФАЛОВ, Е. Л. ТИХОВА**

## **МЕХАНИКА: КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Практическое пособие

для студентов специальности 1–31 04 01 Физика (по направлениям)

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2017

УДК 534(076)  
ББК 22.213я73  
Ш786

Рецензенты:

кандидат технических наук А. П. Павленко,  
кандидат физико-математических наук Н. А. Алешкевич

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Шолох, В. Ф.**

Ш786      Механика: колебания и волны : практическое пособие /  
В. Ф. Шолох, А. Л. Самофалов, Е. Л. Тихова ; М-во образования  
Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –  
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 37 с.  
ISBN 978-985-577-350-5

Целью практического пособия является методическое обеспечение выполнения лабораторных работ по дисциплине «Механика» студентами физических специальностей. Пособие содержит описания лабораторных работ по трем разделам «Механики»: «Колебательное движение», «Волновое движение», «Механика жидкостей и газов». Перечень и содержание лабораторных работ соответствуют учебной программе дисциплины «Механика».

Издание адресовано студентам физических специальностей.

УДК 534(076)  
ББК 22.213я73

**ISBN 978-985-577-350-5**

© Шолох В. Ф., Самофалов А. Л.,  
Тихова Е. Л. 2017  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2017

## Оглавление

Предисловие .....	4
Тема 1. Колебательное движение .....	5
Лабораторная работа 1.1. Изучение свободных и вынужденных колебаний пружинного маятника .....	15
Лабораторная работа 1.2. Изучение физического маятника .....	18
Тема 2. Волновое движение .....	22
Лабораторная работа 2.1. Определение скорости звука в воздухе ..	27
Тема 3. Механика жидкостей и газов .....	30
Лабораторная работа 3.1. Движение тел при наличии аэродинамических сил сопротивления .....	32
Литература .....	37

## Предисловие

В соответствии с учебным планом специальности 1–31 04 01 Физика (по направлениям) изучение дисциплины обязательного компонента «Механика» включает в себя лекционные, практические и лабораторные занятия. На лабораторных занятиях студенты получают навыки выполнения физического эксперимента, являющегося основным источником знаний об окружающем мире. Для выполнения лабораторных работ используются типовые лабораторные установки, а также оборудование, разработанное в лабораториях ГГУ им. Ф. Скорины. Подготовка к лабораторным работам осуществляется студентами самостоятельно: в лабораториях или в домашних условиях.

Цель данного практического пособия – обеспечение студентов учебно-методической базой, необходимой для самостоятельной подготовки к лабораторному занятию, проведению лабораторного эксперимента, анализа полученных результатов.

Практическое пособие содержит описания лабораторных работ и краткие теоретические сведения по трем темам «Механики»: «Колебательное движение», «Волновое движение», «Механика жидкостей и газов». Содержание теоретического материала и лабораторных работ соответствует учебной программе дисциплины «Механика». Каждая работа содержит краткое изложение сущности изучаемых явлений, сведения об экспериментальной методике, положенной в основу лабораторной работы, подробное описание методики проведения измерений. К каждой теме предлагаются вопросы для самоконтроля. В вопросах сделан акцент на наиболее важные понятия и аспекты изучаемой темы.

Каждая лабораторная работа рассчитана на одно занятие продолжительностью четыре академических часа.

Данное пособие написано авторами на основании многолетнего опыта проведения лабораторных работ по дисциплине «Механика».

# Тема 1. Колебательное движение

1. Виды колебаний.
2. Колебания пружинного маятника.
3. Характеристики затухающих колебаний.
4. Вынужденные колебания. Явление резонанса.
5. Физический маятник. Период, приведенная длина физического маятника.

## Основные понятия по теме

Периодические или почти периодические во времени движения или процессы, протекающие в ограниченной области пространства, называются *колебаниями*. Колебания широко распространены в природе и технике и играют большую роль в разнообразных явлениях.

В зависимости от характера воздействия на колеблющуюся систему различают свободные (собственные) колебания, вынужденные колебания, автоколебания и параметрические колебания.

Колебания в системе, на которую не действуют переменные внешние силы, возникающие в результате начального отклонения этой системы от состояния устойчивого равновесия, называются *свободными*. Если в системе отсутствуют диссипативные силы (силы трения), то при колебаниях не происходит потерь энергии. Такие свободные колебания будут *незатухающими*.

Совокупность тел, способных совершать колебательное движение, называется *колебательной системой*.

Рассмотрим свободные незатухающие колебания на примере простой колебательной системы – пружинного маятника. Он представляет собой тело массы  $m$ , подвешенное на упругой пружине. В этом случае колебания возникают только под действием сил упругости.

Пусть  $l_0$  – длина недеформированной пружины,  $\Delta l$  – величина деформации, которую испытывает пружина при подвешивании тела (статическое удлинение пружины). Тогда

$$mg = k\Delta l, \quad (1.1)$$

где  $k$  – коэффициент упругости (жесткости) пружины.

Из (1.1) находим

$$k = \frac{mg}{\Delta l}. \quad (1.2)$$

При смещении тела на величину  $\vec{x}$  вдоль вертикали на него будет действовать сила

$$\vec{F} = -k\vec{x}, \quad (1.3)$$

направленная к положению равновесия (в сторону, обратную смещению).

Уравнение движения тела будет иметь вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx. \quad (1.4)$$

Откуда

$$-x = A_0 \sin \omega_0 t. \quad (1.5)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – круговая частота колебаний.

Тогда период колебаний пружинного маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1.6)$$

Колебания, совершаемые по закону косинуса или синуса, принято называть *гармоническими*.

В реальных колебательных системах всегда присутствуют силы трения (сопротивления). Их наличие приводит к рассеянию энергии, запасенной в системе и, как следствие, к уменьшению амплитуды колебаний. Такие колебания называют *затухающими*.

Рассмотрим затухающие колебания пружинного маятника. При малых скоростях движения тела силу сопротивления  $F_0$  можно считать пропорциональной скорости движения

$$F_0 = -r \frac{dx}{dt}, \quad (1.7)$$

где  $r$  – коэффициент сопротивления среды.

Уравнение движения тела в данном случае имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt}, \quad (1.8)$$

а закон движения

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos \omega t, \quad (1.9)$$

где  $A_0$  – начальная амплитуда;

$\delta$  – коэффициент затухания;

$\omega$  – циклическая частота колебаний.

$$\delta = \frac{r}{2m}. \quad (1.10)$$

Выражение (1.9) описывает затухающие колебания. График затухающих колебаний изображен на рисунке 1.1. Величину  $A = A_0 e^{-\delta t}$  принимают за амплитуду затухающих колебаний. С течением времени она уменьшается по экспоненциальному закону. Частота затухающих колебаний  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  меньше частоты соответствующих свободных колебаний  $\omega_0$  и с течением времени остается неизменной.

Затухающие колебания не являются периодическими и гармоническими. Однако для их описания удобно сохранить понятие условного периода  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , понимая под ним промежуток времени между двумя последовательными прохождением системы положения равновесия.

Для характеристики затухающих колебаний вводят следующие величины:

1. *Время затухания (релаксации)  $\tau$* . Это время, в течение которого амплитуда колебаний  $A$  уменьшается в  $e = 2,71$  раз:

$$\frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+\tau)}} = e, \text{ откуда } \delta\tau = 1 \text{ или } \tau = \frac{1}{\delta}. \quad (1.11)$$

Большим значениям  $\delta$  соответствует меньшее время затухания  $\tau$ . Поэтому  $\delta$  называют коэффициентом затухания.

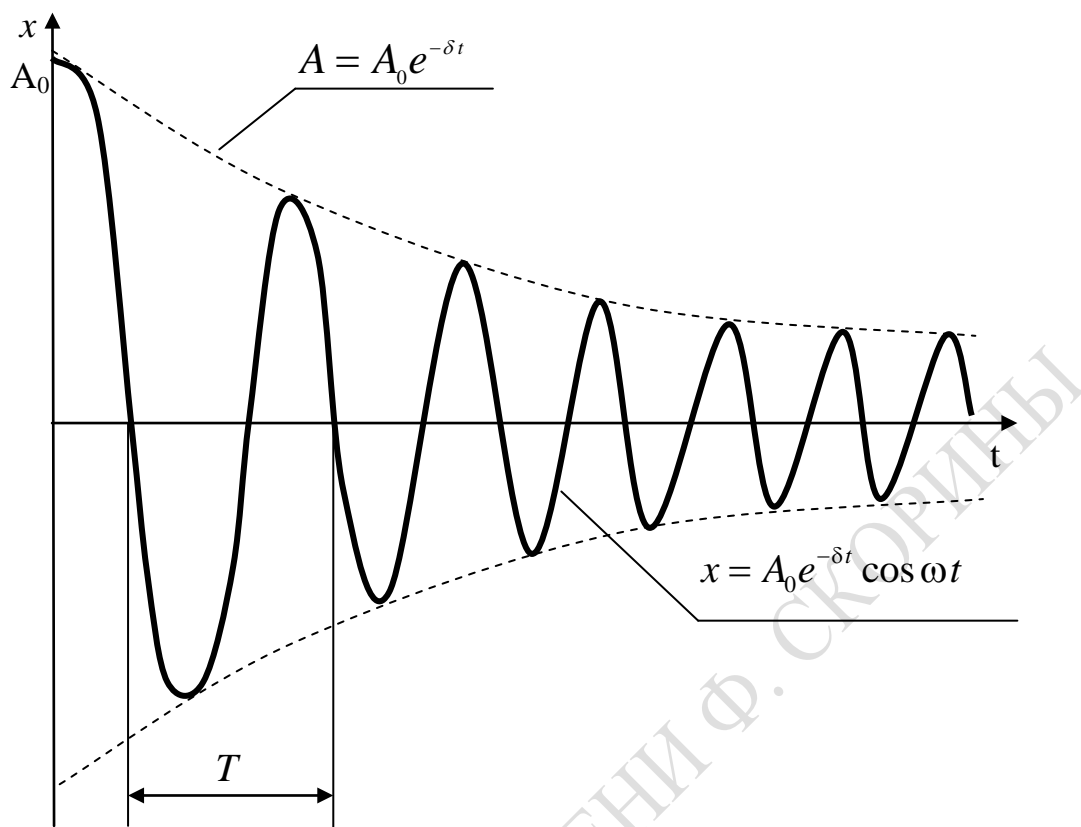


Рисунок 1.1 – Затухающие колебания

2. *Логарифмический декремент затухания*  $\kappa$  (каппа) – это натуральный логарифм отношения двух последующих амплитуд, разделенных промежутком времени, равным периоду:

$$\kappa = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = \ln e^{\delta T} = \delta T. \quad (1.12)$$

3. *Число колебаний за время затухания*

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\delta \cdot T} = \frac{1}{\kappa}. \quad (1.13)$$

4. Для характеристики колебательной системы вводят понятие добротности. *Добротность*  $Q$  с точностью до коэффициента  $2\pi$  равна отношению энергии  $E$ , запасенной в колебательной системе, к энергии, рассеиваемой за период  $E_p$ :

$$Q = 2\pi \frac{E}{E_p}. \quad (1.14)$$



Можно показать, что добротность

$$Q = \pi N_e. \quad (1.15)$$

Колебания, которые совершаются за счет работы внешней силы, периодически меняющейся во времени, называют *вынужденными*.

Пусть на тело действует внешняя сила, изменяющаяся по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , сила сопротивления пропорциональная скорости тела и упругой силе. Запишем уравнение движения тела

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega t, \quad (1.16)$$

где  $F_0$  – амплитудное значение вынуждающей силы, при этом

$$x = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.17)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фаз между колебаниями системы и колебаниями внешней силы.

То есть, тело будет совершать гармонические колебания с частотой внешней силы. Амплитуда колебания

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}, \quad (1.18)$$

где  $\omega$  – частота собственных колебаний системы;

$\delta$  – коэффициент затухания.

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к частоте собственных колебаний называется *резонансом*. Частота вынуждающей силы при которой возникает резонанс, называется *резонансной частотой* ( $\omega_{рез}$ ), а величина максимальной амплитуды называется *резонансной амплитудой*  $A_{рез}$ .

Исследуя формулу (1.18) на экстремум, можно получить:

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (1.19)$$

$$A_{рез} = \frac{F_0}{2m\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (1.20)$$

Физическим маятником (ФМ) называется твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси. Характеристики маятника представлены на рисунке 1.2. Точка  $O$  пересечения оси колебаний с вертикальной плоскостью, проходящей через центр масс маятника, называется *точкой подвеса*.

Согласно основному уравнению динамики вращательного движения, в отсутствие сил сопротивления уравнение движения ФМ имеет вид:

$$I \ddot{\varphi} + mgl \sin \varphi = 0, \quad (1.21)$$

где  $I$  – момент инерции маятника относительно оси качания,

$$\ddot{\varphi} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \text{ – угловое ускорение маятника,}$$

$m$  – масса маятника,

$l$  – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника.

Ограничиваясь случаем малых углов ( $\sin \varphi \approx \varphi$ ), из (1.21), получим

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = 0, \quad (1.22)$$

где введено обозначение

$$\omega^2 = \frac{mgl}{I}.$$

Решением записанного дифференциального уравнения (1.22) является функция

$$\varphi = \varphi_0 \cos \omega t,$$

то есть угол  $\varphi$  отклонения ФМ от вертикали изменяется по гармоническому закону. Следовательно, период колебаний ФМ

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}. \quad (1.23)$$

Как известно, период математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.24)$$

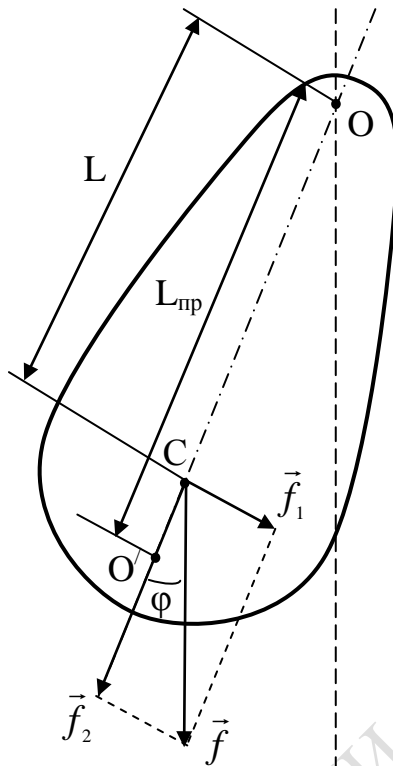


Рисунок 1.2 – Физический маятник

Сравнивая (1.23) и (1.24) находим, что ФМ колеблется с тем же периодом, что и математический маятник, имеющий длину

$$L_{пр} = \frac{I}{ml}. \quad (1.25)$$

Длина математического маятника  $L_{пр}$ , имеющего тот же период колебаний, что и данный ФМ, называется *приведённой длиной физического маятника*.

Точка  $O'$ , показанная на рисунке 1.2, лежащая на прямой, соединяющей точку подвеса  $O$  и центр тяжести  $C$  ФМ, на расстоянии  $L_{пр}$  от точки подвеса, называется *центром качаний ФМ*.

Точку подвеса  $O$  и центр качаний  $O'$  ФМ принято называть взаимными точками ФМ, так как они обладают следующим свойством: если перенести точку подвеса маятника в центр качаний, то прежняя точка подвеса станет центром качаний, причём период колебаний ФМ при этом не изменится.

Получим формулы периода колебаний и приведенной длины для ФМ, выполненного в виде тонкого однородного стержня массой  $m$  и длины  $l$ , представленного на рисунке 1.3.

Момент инерции тонкого стержня относительно оси, проходящей через центр масс  $C$  перпендикулярно плоскости рисунка, равен

$$I_0 = \frac{mh^2}{12},$$

где  $h$  – длина стержня.

По теореме Штейнера находим, что момент инерции стержня относительно оси качаний

$$I = \frac{mh^2}{12} + ml^2. \quad (1.26)$$

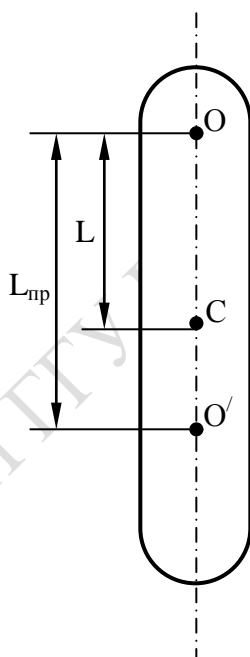


Рисунок 1.3 – Физический маятник в виде стержня

Подставив (1.26) в (1.23) и (1.25), приходим к соотношениям

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h^2}{12gl} + \frac{l}{g}}, \quad (1.27)$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \left( l + \frac{h^2}{12l} \right), \quad (1.28)$$

$$T^2 l = \frac{4\pi^2}{g} \left( l^2 + \frac{h^2}{12} \right), \quad (1.29)$$

$$L_{np} = l + \frac{h^2}{12l}, \quad (1.30)$$

Из анализа на экстремум функции (1.27) следует, что при

$$l = \frac{h}{2\sqrt{3}} \quad (1.31)$$

период  $T$  физического маятника является минимальным.

Формула (1.23) для периода колебаний ФМ может быть использована для определения ускорения силы тяжести. Однако сложности, связанные с определением момента инерции  $I$  маятника, затрудняют непосредственное использование этой формулы для определения  $g$ . Для устранения этой трудности Бесселем была предложена специальная конструкция ФМ, получившая название *оборотный маятник* (ОМ). На рисунке 1.4 показан оборотный маятник, состоящий из металлического стержня, на котором закреплены две опорные призмы и два ролика.

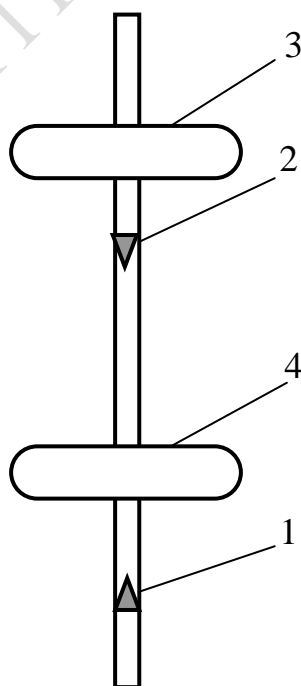


Рисунок 1.4 – Оборотный маятник (1, 2 – призмы; 3, 4 – ролики)

Если расстояние между призмами равно  $L_{np}$ , то согласно условию взаимности точек подвеса  $O$  и центра качания  $O'$ , периоды колебаний  $T_1$  и  $T_2$  колебаний ОМ на первой и второй призмах должны совпадать. На практике для достижения этого условия фиксируют положение опорных призм одного из роликов, а второй ролик передвигают по стержню, добиваясь совпадения периодов  $T_1 \approx T_2$ .

Пусть  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния центра масс ОМ относительно первой и второй осей вращения, совпадающих с гранями опорных призм, а  $I_0$  – момент инерции маятника относительно оси, совпадающей с центром масс. По теореме Штейнера для моментов инерции маятника относительно первой и второй оси качания запишем

$$I_1 = I_0 + ml_1^2 \text{ и } I_2 = I_0 + ml_2^2, \quad (1.32)$$

где  $m$  – масса ОМ.

Из (1.32) получим

$$I_1 - I_2 = m(l_1^2 - l_2^2). \quad (1.33)$$

Учитывая, что согласно (1.25)

$$I_1 = mL_{np1}l_1 \text{ и } I_2 = mL_{np2}l_2,$$

вместо (1.33) запишем

$$L_{np1}l_1 - L_{np2}l_2 = l_1^2 - l_2^2. \quad (1.34)$$

Согласно (1.23) и (1.25), приведённая длина ФМ связана с его периодом соотношением  $L_{np} = \frac{T^2 g}{4\pi^2}$ . Следовательно, (1.34) можно переписать в виде

$$\frac{T_1^2 l_1}{4\pi^2} g - \frac{T_2^2 l_2}{4\pi^2} g = l_1^2 - l_2^2,$$

откуда следует

$$g = \frac{4\pi^2 L_{np} (l_1 - l_2)}{T_1^2 l_1 - T_2^2 l_2}, \quad (1.35)$$

где  $L_{np} = l_1 + l_2$  – расстояние между опорными призмами.

## Вопросы для самоконтроля

1. Опишите гармонические колебания.
2. Какие колебания называются затухающими? Что такое коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания?
3. Какие колебания называются вынужденными? Что такое добротность?
4. Дайте понятие физического маятника и его характеристик.
5. Опишите метод, предложенный Бесселем для определения ускорения свободного падения.
6. При каком расстоянии от точки подвеса до центра масс физического маятника его период колебаний будет минимальным? Докажите утверждение.

## Лабораторная работа 1.1

### Изучение свободных и вынужденных колебаний пружинного маятника

**Цель работы:** ознакомление с основными законами колебательного движения, определение коэффициента жесткости пружины, проверка формулы периода колебаний пружинного маятника, определение логарифмического декремента затухания и коэффициента затухания, изучение явления резонанса при вынужденных колебаниях.

**Приборы и принадлежности:** рабочая установка, секундомер.

#### Описание установки

Общий вид установки изображен на рисунке 1.5. В качестве колеблющейся системы взят пружинный маятник, состоящий из платформы 2, подвешенной на вертикально расположенной пружине 1. Массу груза 3 можно менять. Амплитуда колебаний измеряется по шкале 4.

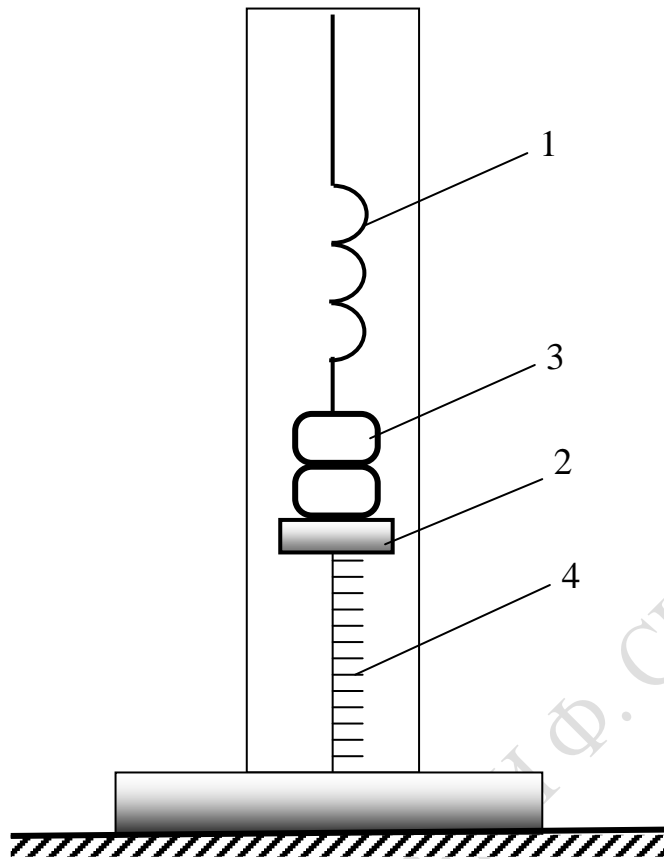


Рисунок 1.5 – Общий вид установки

## Ход работы

### Упражнение 1. Определение коэффициента жесткости пружины статическим методом

1. Положите на платформу 2 груз и измерьте по шкале 4 удлинение пружины. Положите другой груз и снова проделайте измерение деформации. Общее число грузов может быть 5–7. Необходимо следить за тем, чтобы не перейти предел упругости пружины. При отсчете координаты груза луч зрения должен быть перпендикулярен к плоскости шкалы.

2. По формуле (1.2) определите коэффициент жесткости пружины. Данные измерений и вычислений занесите в таблицу. Оцените ошибку измерения  $\Delta k$ .

### Упражнение 2. Проверка формулы периода колебаний пружинного маятника

Для двух пружинных маятников с массами  $m_1$  и  $m_2$  согласно (1.6) запишем:



$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m_1}{k}}, T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{k}},$$

следовательно,

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \frac{m_1}{m_2}. \quad (1.36)$$

Проверьте это соотношение:

1. Положите на платформу тело массой  $m$ . Тогда масса маятника  $m_1$  будет равна  $m_1 = m + m_0$ , где  $m_0$  – масса платформы.

2. Выведите маятник из положения равновесия примерно на 30–50 мм и измерьте время  $t$ , в течение которого совершается  $N = 10 - 20$  полных колебаний. По формуле  $T = \frac{t}{N}$  найдите период колебаний. Опыт проделайте не менее 5 раз и найдите среднее значение периода.

3. Положите на платформу другое тело и снова проделайте операции пункта 2. Результаты занесите в таблицу.

Определите  $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$  и  $\frac{m_1}{m_2}$ . Оцените ошибки определения этих величин  $\Delta\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$  и  $\Delta\frac{m_1}{m_2}$ . Проверьте равенство (1.36).

4. Пункты 1–3 проделайте для двух других пар тел. Сделайте выводы.

### Упражнение 3. Определение логарифмического декремента затухания и коэффициента затухания

1. Положите на платформу несколько грузов и определите период  $T$  колебаний маятника, как указано в упражнении 2.

2. Выведите тело из положения равновесия на величину  $A_0$  и определите время  $t$ , за которое амплитуда колебаний уменьшается в 10 раз (удобно за величину конечной амплитуды  $A_n$  взять значение 10 мм, тогда  $A_0$  будет равно 10 см). При отсчете амплитуды колебаний луч зрения должен быть перпендикулярен к плоскости шкалы. Измерения проведите не менее пяти раз.

3. По формуле  $\lambda = \frac{T}{t} \ln \frac{A_0}{A_n}$  определите логарифмический декре-

мент. Коэффициент затухания  $\delta$  найдите по формуле  $\delta = \frac{\lambda}{T}$ .

4. Пункты 1–3 проделайте для двух других масс тела. Определите  $\Delta\lambda$  и  $\Delta\delta$ .

## **Лабораторная работа 1.2**

### **Изучение физического маятника**

**Цель работы:** исследование законов колебательного движения физического маятника и определение ускорения свободного падения методом Бесселя.

**Приборы и принадлежности:** установка FPM-04, линейка.

#### **Описание установки**

В данной работе используется универсальный маятник FPM-04, изображённый на рисунке 1.6. Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2, которые позволяют произвести выравнивание установки. В основании закреплена колонна 3, на которой винтом 11 зафиксирован верхний кронштейн 4. С одной стороны кронштейна находится математический маятник 7, с другой – оборотный маятник 8. Нижний кронштейн 5 с фотоэлектрическим датчиком 6 может перемещаться вдоль колонны и фиксироваться в произвольно избранном положении. Длину математического маятника можно регулировать при помощи воротка 9.

Оборотный маятник выполнен в виде однородного стального стержня, по которому можно перемещать и фиксировать в любом положении две повернутые друг к другу опорные призмы и два ролика. Фотоэлектрический датчик соединён с универсальным секундомером 10, имеющим два цифровых индикатора для показаний времени и числа колебаний.

#### **Ход работы**

**Упражнение 1. Проверка формулы периода колебаний и определение приведённой длины физического маятника**

1. При помощи регулируемых ножек 2 (рисунок 1.6) установите колонну 3 в вертикальном положении, принимая шарик математического маятника в качестве отвеса.

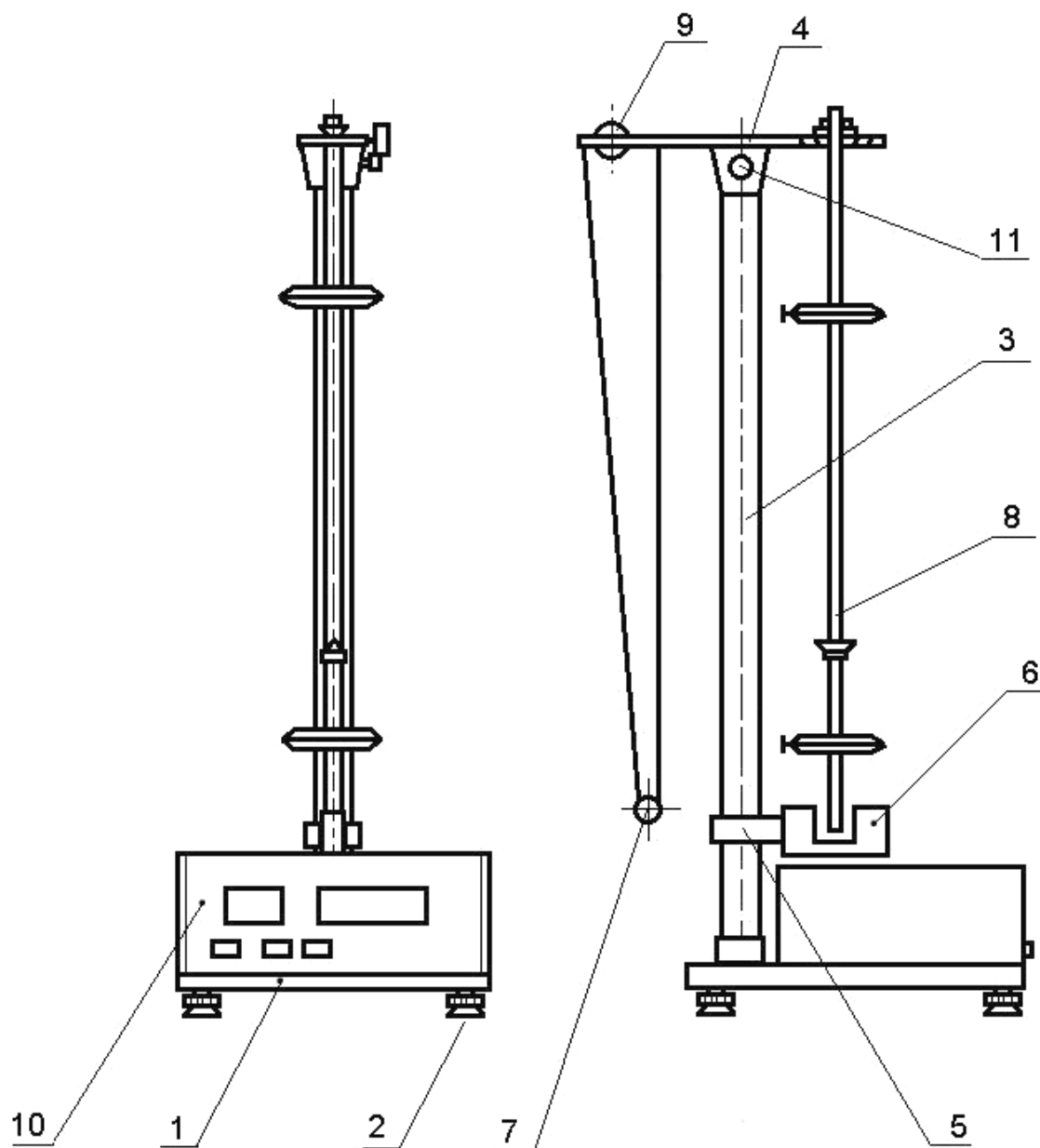


Рисунок 1.6 – Установка FPM-04

2. Снимите со стержня ФМ оба ролика и одну призму (если это необходимо) и определите время  $t$  10–15 полных колебаний стержня при произвольном положении второй призмы. Для этого необходимо отклонить стержень на угол  $\varphi \approx 5 - 10$  и нажать клавишу ПУСК.

3. При таком же положении опорной призмы повторите измерения, описанные в пункте 2, 5–10 раз. Результаты измерений занесите в таблицу и обработайте, определив  $\bar{t} \pm \Delta t$ .

4. По формуле  $T = \frac{t}{N}$ , где  $N$  – число полных колебаний стержня, рассчитайте период колебаний ФМ и его погрешность.

5. Измерив длину стержня  $h$  и расстояние  $l$  от точки подвеса до центра тяжести, проверьте справедливость формулы (1.27). При проверке равенства (1.27) необходимо учесть погрешность измерений.

6. Пользуясь формулой (1.30), по измеренным в пункте 5 значениям  $l$  и  $h$ , рассчитайте приведённую длину  $L_{np}$  ФМ.

7. Повернув верхний кронштейн 4 установки на  $180^\circ$ , установите длину математического маятника  $l = L_{np}$  и аналогично пунктам 2–4 определите период колебаний математического маятника.

8. Сравните полученные в пунктах 4 и 7 периоды колебаний физического и математического маятников. Сделайте выводы.

## **Упражнение 2. Исследование формулы периода колебаний физического маятника**

1. Установив опорную призму на расстоянии  $l = 10$  мм выше центра масс стержня, измерьте время  $t$  10–15 полных колебаний.

2. Повторите измерения времени  $t$ , описанные в пункте 1 не менее трёх раз и определите период колебаний ФМ по формуле  $T = \frac{\bar{t}}{N}$ , где  $\bar{t}$  – среднее арифметическое времени колебаний стержня.

3. Последовательно увеличивая расстояние  $l$  на 10 мм, повторите измерения, описанные в пунктах 1 и 2. Результаты занесите в таблицу.

4. По результатам таблицы постройте график зависимости  $T(l)$  и объясните его поведение на основании формулы (1.27).

5. Используя построенный график, убедитесь, что при значении  $l$ , определяемой формулой (1.31),  $T = T_{\min}$ .

6. По данным таблицы постройте график зависимости  $T^2l$  от  $l^2$  и убедитесь, что она является линейной.

7. Пользуясь графиком зависимости  $T^2l$  от  $l^2$ , определите ускорение свободного падения  $g$ .

## **Упражнение 3. Определение ускорения свободного падения методом Бесселя**

1. Зафиксируйте ролики на стержне несимметрично так, чтобы один из них находился вблизи конца стержня, а другой – вблизи его середины. Одну из опорных призм поместите вблизи свободного

конца стержня, а вторую – посередине расстояния между роликами. Общий вид оборотного маятника представлен на рисунке 1.4.

2. Измерьте время 10–15 колебаний ОМ на призме 1 и определите их период  $T_1$ .

3. При таком же положении призм и роликов определите период  $T_2$  колебаний ОМ на призме 2.

4. Сравните  $T_1$  и  $T_2$ . Если  $T_2 > T_1$ , то ролик 3 переместите на 10 мм в направлении призмы 2, а если  $T_2 < T_1$ , то переместите ролик в обратном направлении.

Измерьте периоды  $T_1$  и  $T_2$  при новом положении роликов. Значения периодов  $T_1$ ,  $T_2$  и координату  $X$  ролика 3 занесите в таблицу (координату  $X$  ролика 3 можно отсчитывать от конца стержня).

Последовательно перемещая ролик 3 на расстояние  $\Delta x = 10$  мм в выбранном направлении, измеряйте периоды колебаний  $T_1$  и  $T_2$  ОМ на первой и второй опорах. Результаты занесите в таблицу.

5. По данным таблицы, на одних координатных осях, постройте графики зависимости  $T_1(X)$  и  $T_2(X)$  и определите значение  $X_0$ , соответствующее точке пересечения графиков.

Поместив ролик 3 в положение  $X_0$ , измерьте время 10 полных колебаний на опорных призмах 1 и 2. Измерения повторите не менее 5 раз. Результаты занесите в таблицу.

6. Измерьте  $L_{np}$ , равное расстоянию между призмами 1 и 2.

Для определения  $l_1$  и  $l_2$  снимите ОМ и поместите на острую грань специальной подставки, добейтесь его равновесия. Расстояния от опорных призм 1 и 2 до грани (центра масс) дадут значения  $l_1$  и  $l_2$ .

7. Пользуясь измеренными величинами, по формуле (1.35) определите  $g$ .

8. Сравните полученное значение со значением, найденным в упражнении 2 и сделайте выводы.

## Тема 2. Волновое движение

1. Звуковые волны в различных средах.
2. Бегущая волна. Длина волны.
3. Уравнение стоячей волны.
4. Акустический резонанс.

### Основные понятия по теме

Процесс распространения колебаний в какой-либо среде называется *волной*. В результате распространения волны частицы совершают колебания около положения равновесия, при этом происходит передача энергии без переноса вещества. Если колебания частиц происходят в том же направлении, что и распространение энергии, они называются *продольными*. Если же колебания частиц перпендикулярны к направлению распространения энергии, то такие волны называются *поперечными*.

Распространяющиеся в сплошных средах упругие волны, воспринимаемые органами слуха человека, называются *звуковыми*. Их частоты лежат в диапазоне примерно от 16 Гц до 20 кГц. Упругие волны с частотой ниже 16 Гц называются *инфразвуком*, а с частотой от 20 кГц до 108–109 кГц – *ультразвуком*.

Для возникновения и распространения звуковых волн необходимо наличие упругой среды (твердое тело, жидкость, газ). Твердые тела обладают как упругостью объема, так и упругостью сдвига, поэтому в твердых телах звуковые волны могут быть и продольными, и поперечными. В жидкостях и газах, которые не обладают упругостью сдвига, могут возникать и распространяться только продольные звуковые волны.

Данные экспериментов по определению скорости звука в различных средах показывают, что она в большинстве случаев не зависит от частоты (или длины волны), то есть для звуковых волн отсутствует явление дисперсии.

**Уравнение бегущей волны.** Пользуясь рисунком 2.1, рассмотрим процесс распространения колебания, источником которого является точка  $O$ , колеблющаяся гармонически по закону:

$$y = y(0, t) = y_0 \sin \omega t. \quad (2.1)$$

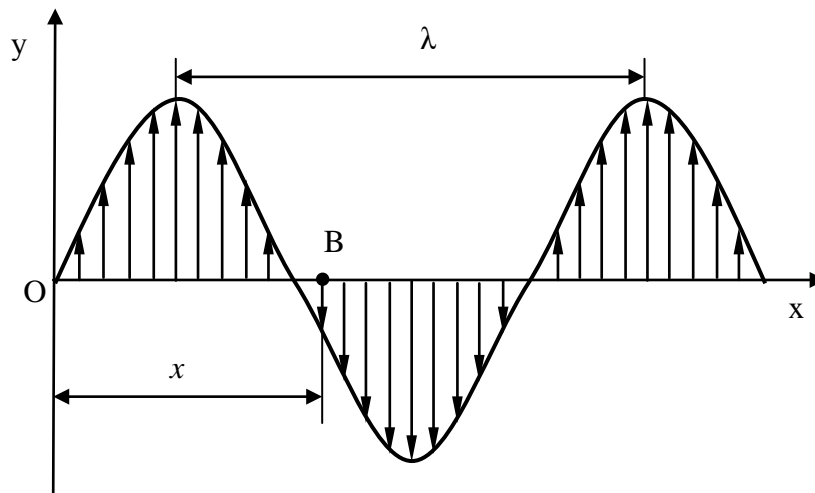


Рисунок 2.1 – Бегущая волна

Пусть колебание точки началось в момент времени  $t = 0$ . Соседние точки придут в колебание с той же амплитудой  $y_0$  и частотой  $\nu$ , что и точка  $O$ , но с некоторым запаздыванием. Начало колебаний точки  $B$ , отстоящей на расстоянии  $x$  от источника, отстанет от начала колебаний точки  $O$  на время

$$\Delta t = \frac{x}{\vartheta},$$

где  $\vartheta$  – скорость волны в данной среде.

Вследствие запаздывания отклонение точки  $B$  в момент времени  $t$  будет таким же, каким было отклонение точки  $O$  на время  $\Delta t$  ранее, то есть

$$y(x, t) = y(0, t - \Delta t) = y_0 \sin \omega(t - \Delta t),$$

или

$$y(x, t) = y_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{\vartheta} \right). \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) называется уравнением бегущей волны.

Расстояние, на которое распространяется колебание за один период, называется длиной волны  $\lambda$ :

$$\lambda = \vartheta T, \quad (2.3)$$

где  $T$  – период колебаний.

Так как  $\omega = 2\pi/T$ , то уравнение бегущей волны можно переписать в виде

$$y(x,t) = y_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = y_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right).$$

Фазы колебаний точек, отстоящих друг от друга на расстояние  $\lambda$ , совпадают. Поэтому длину волны можно определить как расстояние между ближайшими двумя точками, колеблющимися в одной фазе.

Скорость распространения колебаний можно представить в виде

$$\vartheta = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu, \quad (2.4)$$

где  $\nu = \frac{1}{T}$  – частота колебаний.

Из формулы (2.4) видно, что скорость распространения колебаний можно определить, зная частоту источника  $\nu$  и длину волны  $\lambda$ . В данной работе скорость звука определяется методом стоячих волн – методом Кундта.

**Уравнение стоячей волны.** Стоячая волна является результатом интерференции двух одинаковых бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу. Такие волны чаще всего образуются при наложении волн, падающих на какое-нибудь тело, и волн, отраженных от него.

Например, если взять упругий стержень, правый конец которого укреплен неподвижно, а левый периодически сжимать, то образующиеся при этом продольные бегущие волны, достигнув правого конца стержня, отражаются и, распространяясь в обратном направлении, налагаются на волны, исходящие от непрерывно колеблющегося источника.

Пусть отражение происходит от среды более плотной, чем стержень. Тогда деформация сжатия, достигшая правого конца, не может привести его в движение. Поэтому за сжатием в падающей волне будет следовать сжатие в отраженной волне, за растяжением в падающей волне – растяжение в отраженной волне. Это приводит к тому, что при отражении от более плотной среды фаза колебания меняется на противоположную ( $\pi$ ). Рассмотрим случай, когда отраженная волна имеет ту же амплитуду, что и падающая:



$$y_{nao}(x,t) = y_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{g} \right),$$

$$y_{omp}(x,t) = y_0 \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{g} \right) + \pi \right] = -y_0 \sin \omega \left( t + \frac{x}{g} \right).$$

Результирующая волна

$$y = y_{nao}(x,t) + y_{omp}(x,t) = -2y_0 \sin \omega \frac{x}{g} \cos \omega t. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) является уравнением стоячей волны.

Величина  $\left| -2y_0 \sin \omega \frac{x}{g} \right|$  не зависит от времени и является амплитудой стоячей волны. Точки, колеблющиеся с максимальной амплитудой, называются пучностями. Точки, в которых амплитуда равна нулю, в колебаниях не участвуют и называются узлами. Пучности и узлы изображены на рисунке 2.2.

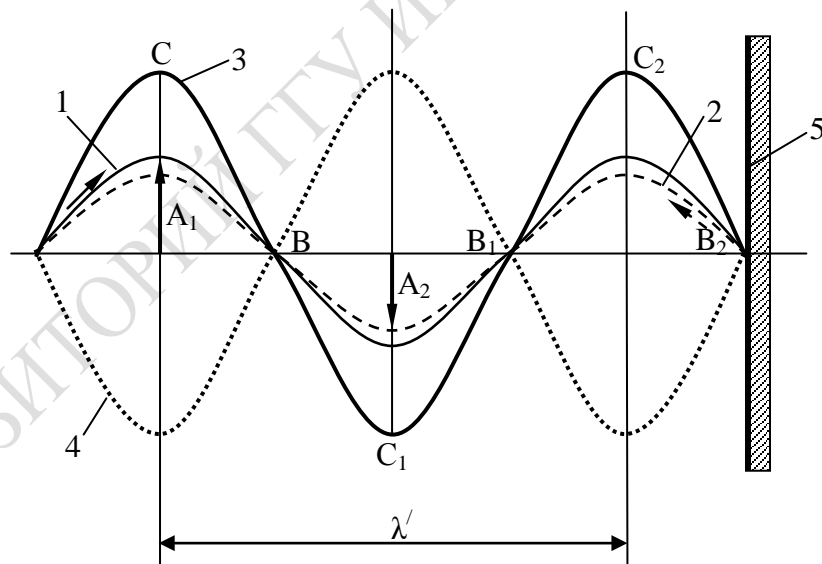


Рисунок 2.2 – Образование стоячей волны

Расстояние  $l$  между соседними узлами можно найти из условия:

$$\sin \omega \frac{x}{g} = 0,$$

$$\omega \frac{x}{g} = \pm k\pi,$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Следовательно, координаты узлов:

$$x = \pm \frac{k\pi g}{\omega} = \pm k \frac{\lambda}{2}.$$

Расстояние между соседними узлами

$$l = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda}{2}.$$

Обычно стоячие волны возникают при распространении упругих колебаний в телах ограниченных размеров. Вследствие многократных отражений от границ тела с окружающей средой падающая волна вызывает множество отраженных волн. Если размеры тела таковы, что отраженные волны, взаимодействуя, усиливают друг друга, то амплитуда результирующего колебания возрастает – наступает резонанс.

Рассмотрим условие резонанса в трубе с воздухом, один конец которой открыт, а второй ограничен (закрыт). В отсутствие затухания собственных колебаний воздушного столба и, пренебрегая излучением из открытого конца трубки, появление стоячей волны возможно, если у открытого конца трубы образуется пучность, а у закрытого – узел. Волна, вышедшая из открытого конца трубы, доходит до закрытого конца и отражается с изменением фазы на  $\pi$ . Затем волна идет обратно и отражается от открытого конца без изменения фазы. В результате вторично отраженная волна имеет такую же фазу, как и падающая, то есть усиливает падающую волну. Вследствие многократных отражений амплитуда волны резко возрастает – наступает резонанс. Наименьшая длина воздушного столба, при которой имеет место резонанс, равна  $l_1 = \frac{\lambda}{4}$ ; следующий резонанс наблюдается при

длине воздушного столба  $l_2 = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} = \frac{3\lambda}{4}$ .

Таким образом, наименьшая разность длин воздушных столбов, в которых возникает резонанс, равна

$$l = l_{n+1} - l_n = \left( \frac{\lambda}{4} + \frac{(n+1)\lambda}{2} \right) - \left( \frac{\lambda}{4} + \frac{n\lambda}{2} \right) = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.6)$$

Откуда  $\lambda = 2l$ , а скорость волны

$$\vartheta = 2lv. \quad (2.7)$$

## Вопросы для самоконтроля

1. Опишите звуковые волны в различных средах.
2. Выведите уравнение бегущей волны.
3. Объясните возникновение стоячей волны.
4. Почему стоячая волна не переносит энергии?
5. Как изменяется фаза звуковой волны при отражении от границы раздела воздух-вода?
6. Объясните возникновение резонанса звуковых колебаний в трубе с воздухом.

## Лабораторная работа 2.1

### Определение скорости звука в воздухе

**Цель работы:** овладеть методикой определения скорости звука в воздухе методом стоячих волн.

**Приборы и принадлежности:** установка для определения скорости звука в воздухе методом стоячих волн (методом резонанса).

#### Описание установки

Общий вид установки для образования стоячих звуковых волн изображен на рисунке 2.3. Установка состоит из звукового генератора (1), телефона 2 и стеклянной трубки 3, в которую налита вода. Уровень воды в трубке можно изменять, поднимая или опуская сосуд 4, соединенный с трубкой резиновым шлангом 5. Телефон размещен у открытого конца трубки. Трубка снабжена шкалой 6, которая дает возможность определять высоту столба жидкости.

Источником звука является телефон, на который от генератора подаются электрические сигналы звуковой частоты. Телефон возбуждает колебания столба воздуха в стеклянной трубке, звуковые волны, дойдя до поверхности воды в трубке, отражаются от нее и идут в обратном направлении. Так как отражение происходит от среды акустически

более плотной, наблюдается антифазное отражение, то есть на границе раздела сред фаза отраженной волны скачком изменяется на  $\pi$ .

При определенных длинах воздушных столбов в трубке возникает акустический резонанс, который можно легко обнаружить по максимальному звучанию воздушного столба. Наступление резонанса означает, что в трубке образовалась стоячая волна.

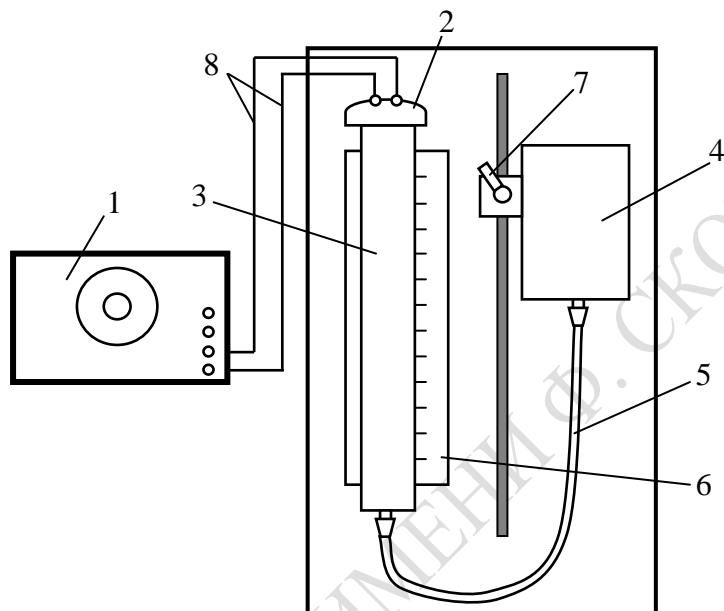


Рисунок 2.3 – Общий вид установки

### Ход работы

1. Включите звуковой генератор, предварительно установив минимальное выходное напряжение (ручка регулировки напряжения в крайнем левом положении).

2. К выходу генератора подключите телефон.

3. Установите частоту сигнала генератора в диапазоне 1 000–2 000 Гц.

4. Изменяя выходное напряжение генератора, добейтесь оптимальной для восприятия громкости звука.

5. Ослабив винт 7, осторожно переместите вверх сосуд 4 так, чтобы уровень воды в трубке 3 поднялся на максимальную высоту (уровень воды не должен быть ближе 5–7 см от верхнего края трубы).

6. Медленно понижая уровень воды в трубке путем перемещения сосуда 4, найдите приблизительное положение границы раздела воздух – вода, при котором имеет место максимальное усиление звука (акустический резонанс). По шкале 6 снимите отсчет  $l'_1$  (подход сверху).

Затем, поднимая уровень воды в трубке, к этому же резонансу подойдите снизу. По шкале  $b$  снимите отсчет  $l_1''$  (подход снизу).

7. Действия по нахождению акустического резонанса с подходом сверху и снизу, описанные в пункте 6, повторите не менее трех раз. Полученные значения  $l_1'$  и  $l_1''$  занесите в таблицу. Найдите  $\bar{l}_1 \pm \Delta l_1$ .

8. Найдите положение второго  $l_2'$  и третьего  $\bar{l}_3$  резонансов, пользуясь методикой, описанной в пунктах 6 и 7.

9. По формулам (2.6), (2.7) рассчитайте скорость звука. Оцените погрешность.

10. Пункты 5–9 проделайте не менее чем для четырех значений частот в диапазоне 1 000–2 000 Гц.

11. Сделайте выводы.

## Тема 3. Механика жидкостей и газов

1. Движение тела в жидкости или газе.
2. Лобовое сопротивление тел в потоке.
3. Понятие о законах гидродинамического подобия.
4. Вихреобразование.

### Основные понятия по теме

При движении тела в жидкости или в газе оно испытывает сопротивление, которое, в частности, зависит от относительной скорости тела и частиц среды.

Сила, с которой среда действует на тело, в общем случае направлена под некоторым углом к направлению движения. Составляющую этой силы, имеющую направление средней скорости потока, называют лобовым сопротивлением. Составляющую, перпендикулярную к скорости потока, называют подъемной силой.

Лобовое сопротивление складывается из сопротивления вязкости и сопротивления давления. При числе Рейнольдса  $R_e$  меньше критического преобладает сопротивление вязкости

$$R_e = \frac{v l \rho}{r}, \quad (3.1)$$

где  $r$  – коэффициент внутреннего трения среды;

$v$  – относительная скорость тела;

$\rho$  – плотность среды;

$l$  – характерный линейный размер тела (в случае шара – его диаметр).

При движении тела относительно среды вблизи его поверхности возникает градиент скорости частиц среды, направление которого показано на рисунке 3.1, и в соответствии с законом Ньютона появляются силы внутреннего трения

$$F = r \frac{dv}{dx} S, \quad (3.2)$$

где  $r$  – коэффициент вязкости;  
 $S$  – площадь соприкасающихся слоев среды;  
 $\frac{dv}{dx}$  – градиент скорости частиц среды.

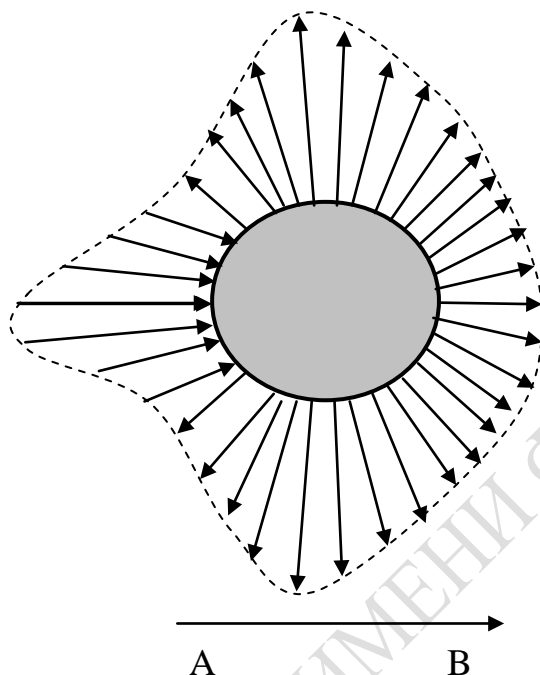


Рисунок 3.1 – Движение тела в среде

При малых скоростях относительно движения для тела, ось симметрии которого совпадает с направлением скорости, распределения скоростей и давлений на тело симметрично. Результирующая давления равна нулю, и сопротивление движению оказывают силы внутреннего трения (вязкости).

Картина обтекания тела резко меняется при возрастании скорости относительно движения. В пограничном слое возрастает градиент скоростей частиц среды, увеличивается торможение частиц вблизи поверхности тела, что ведет к срыву поверхностного слоя и к вихреобразованию. Вследствие вихреобразования в области, расположенной сзади тела, как показано на рисунке 3.2, давление понижено по сравнению с давлением в остальных частях среды. Перед телом возникает область повышенного давления. Число Рейнольдса в таких условиях больше критического для данной формы тела и данной среды.

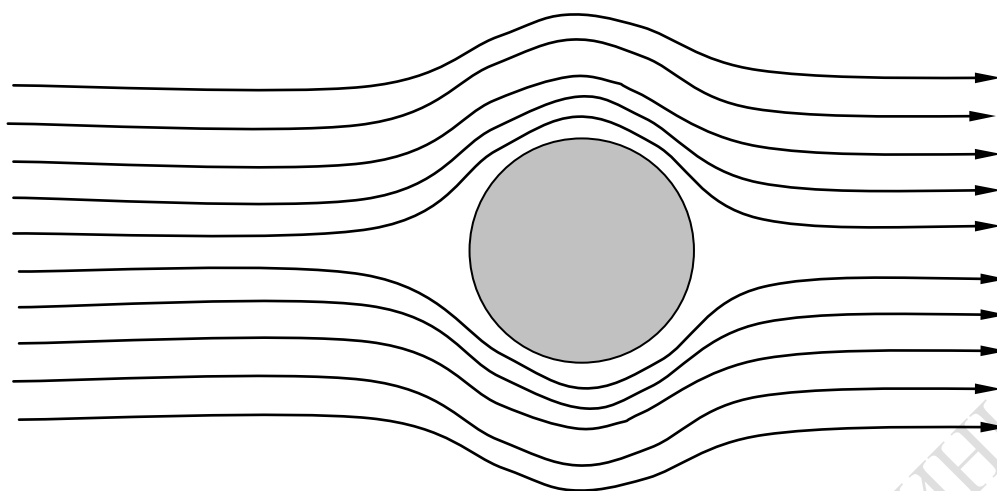


Рисунок 3.2 – Вихреобразование

### Вопросы для самоконтроля

1. Какое течение жидкости называется стационарным? Сформулируйте основной закон динамики для частицы идеальной жидкости.
2. Опишите течение вязкой жидкости.
3. Что такое лобовое сопротивление и подъемная сила?
4. Опишите обтекание крыла вязкой средой.
5. Объясните физический смысл числа Рейнольдса.

### Лабораторная работа 3.1

#### Движение тел при наличии аэродинамических сил сопротивления

**Цель работы:** изучить характер вращательного движения при наличии аэродинамических сил сопротивления, определить коэффициент момента лобового сопротивления пластины, момент инерции системы.

**Приборы и принадлежности:** установка, грузы, секундомер.

#### Описание установки

Общий вид установки для изучения характера движения тел при наличии аэродинамических сил сопротивления изображен на рисунке 3.3.



Установка представляет собой стержень 1, который может вращаться вокруг горизонтальной оси 2. На стержне укреплена пластина 3 и груз 4, который служит для того, чтобы уравновесить вращающуюся систему тел.

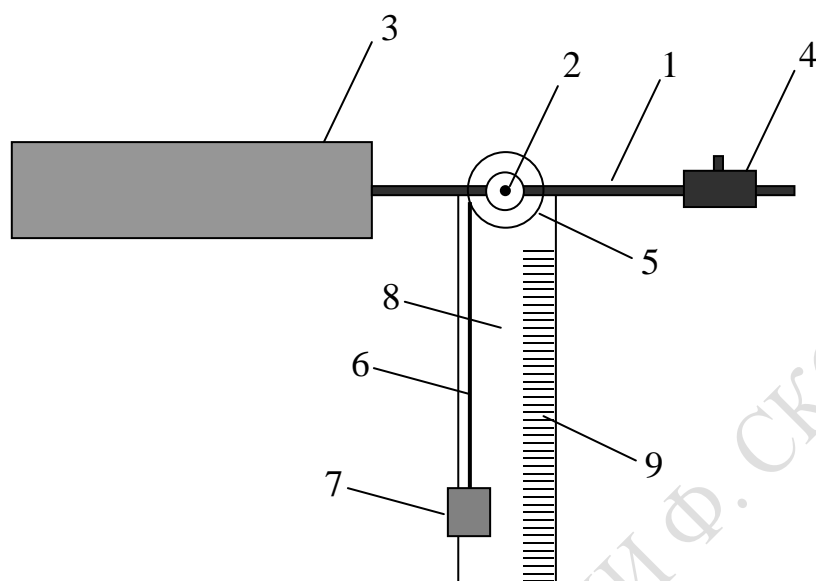


Рисунок 3.3 – Общий вид установки

На цилиндр 5 наматывается нить 6, имеющая на конце груз 7. Спускаясь, груз приводит во вращение стержень с пластиной. Вся система укреплена на штативе 8, который снабжен шкалой 9 для измерения расстояния проходимого грузом. Пластина 3 может быть повернута на любой угол к вектору ее линейной скорости движения. Поворот пластины ведет к изменению лобового сопротивления от значения почти равного нулю, когда плоскость пластины совпадает с направлением вектора линейной скорости до некоторого максимального, когда плоскость пластины перпендикулярна к вектору ее линейной скорости.

Если на цилиндр намотать нить и к концу ее прикрепить груз, то спускаясь, он приведет систему во вращательное движение. Запишем уравнение движения груза и вращающейся части установки, используя второй закон Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3.3)$$

и основное уравнение динамики вращательного движения

$$\overset{\cdot}{M} = I\overset{\cdot}{\beta}, \quad (3.4)$$

где  $M$  – результирующий момент сил, действующую на вращательную систему;

$I$  – момент инерции системы относительно оси вращения;

$\beta$  – угловое ускорение вращательного движения.

Запишем уравнения (3.3), (3.4) в проекциях на оси координат:

$$\begin{cases} ma = mg - F_0 \\ I \frac{d\omega}{dt} = F_0 R - C\omega \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $F_0$  – сила натяжения нити;

$\frac{d\omega}{dt}$  – угловое ускорение ( $\omega$  – угловая скорость);

$R$  – радиус цилиндра, на который намотана нить;

$C$  – коэффициент момента лобового сопротивления пластины.

В случае нерастяжимой нити ускорение груза и угловое ускорение системы связаны соотношением

$$a = \frac{d\omega}{dt} R. \quad (3.6)$$

Из уравнений (3.5), (3.6) найдем

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{mgR}{mR^2 + I} - \frac{C\omega}{mR^2 + I}. \quad (3.7)$$

Введем обозначения

$$A = \frac{mgR}{mR^2 + I}, \quad (3.8)$$

$$B = \frac{C}{mR^2 + I}. \quad (3.9)$$

Тогда

$$\frac{d\omega}{dt} = A - B\omega. \quad (3.10)$$

Если  $C$  очень мало (практически равно нулю), то

$$A = \frac{d\omega}{dt} = \text{const.} \quad (3.11)$$

С учетом (3.6) и формулы  $\left(a = \frac{2h}{t^2}\right)$

$$A = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (3.12)$$

2. Если  $C = 0$ , то угловое ускорение максимально и в начальный момент времени уменьшается до нуля, так как с увеличением угловой скорости движения уменьшается до нуля суммарный момент сил, действующий на систему. Таким образом, наступает момент, когда система вращается с постоянной угловой скоростью. Величина этой скорости находится из формулы (3.10):

$$\omega_{\text{max}} = \frac{A}{B}. \quad (3.13)$$

Максимальная скорость опускания груза

$$V_{\text{max}} = \frac{A}{B} R. \quad (3.14)$$

Значение  $V_{\text{max}}$  можно найти из графика зависимости  $h(t)$ , изображенного на рисунке 3.4, при  $C \neq 0$

$$V_{\text{max}} = \frac{\Delta h}{\Delta t}.$$

### Ход работы

1. Установите поверхность пластины так, чтобы лобовое сопротивление было максимальным. Перемещая груз 4, уравновесьте вращающуюся систему.

2. Тщательно, виток к витку, намотайте нить на цилиндр малого радиуса. К концу нити подвесьте груз 7. Нижняя часть груза 7 должна быть на одном уровне с нулевой отметкой шкалы 9.

3. Отпустите груз, и пользуясь секундомером, измерьте время  $t$  опускания груза на расстояние  $h$ . Измерение повторите 5–7 раз.

4. Пункт 3 проделайте при разных значениях  $h$ . Рекомендуется для  $h$  взять следующий ряд значений, в см: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130. Данные измерений занесите в таблицу.

5. Постройте график зависимости  $h(t)$ . По графику, согласно рисунку 3.4, определите  $V_{\max}$ .

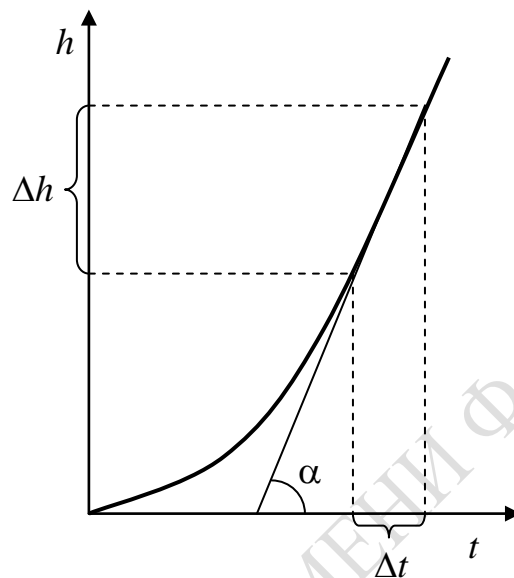


Рисунок 3.4 – График зависимости  $h(t)$

6. Установите пластину так, чтобы ее сопротивление было минимальным ( $C = 0$ ). Исследуйте зависимость  $h(t)$  при  $C = 0$ , как указано в пунктах 2–5. Данные измерений занесите в таблицу.

7. Вычислите величину  $A$  по формуле (3.12).

8. По формуле (3.14) найдите  $B$ .

9. Величину момента  $I$  определите из формулы (3.8).

10. Коэффициент лобового сопротивления  $C$  определите из формулы (3.9). Все результаты измерений занесите в таблицу.

11. Выполните пункты 2–11, намотав нить на большой цилиндр.

12. Оцените ошибки определения  $I$  и  $C$ .

## Литература

1. Элементарный учебник физики: в 3 т. / под ред. Г. С. Ландсберга. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – Т. 1: Механика. Теплота. Молекулярная физика. – 616 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – Т. 1: Механика. – 560 с.
3. Матвеев, А. Н. Механика и теория относительности : учеб. для студентов вузов / А. Н. Матвеев. – М. : ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2003. – 432 с.
4. Стрелков, С. П. Механика: учебник для студентов вузов / С. П. Стрелков. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2005. – 560 с.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для студентов вузов: в 4 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика / И. В. Савельев. – М. : КНОРУС, 2009. – 528 с.
6. Иродов, И. Е. Основные законы механики / И. Е. Иродов. – М. : Высшая школа, 1997. – 248 с.
7. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М. : Мир и образование, 2006. – 1056 с.
8. Никитин, С. Ю. Механика : учебно-методическое пособие / С. Ю. Никитин, С. С. Чесноков; под ред. В. А. Маркова. – М. : Изд. отдел факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006. – 300 с.
9. Шолох, В. Ф. Физика. Механика. Практикум : учеб. пособие / В. Ф. Шолох. – Минск : ИВЦ Минфина, 2013. – 231 с.

*Производственно-практическое издание*

**Шолох Владимир Федорович,  
Самофалов Андрей Леонидович,  
Тихова Елена Леонидовна**

## **МЕХАНИКА: КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 28.09.2017. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,3.  
Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 25 экз. Заказ 720.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

**В. Ф. ШОЛОХ, А. Л. САМОФАЛОВ, Е. Л. ТИХОВА**

**МЕХАНИКА:  
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНА СКОРИНЬ

Гомель  
2017

