Министерство образования и науки РФ
**Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)**
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский государственный технологический университет»

# ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ НА БАЗЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ЛКМ-2

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

**Нижнекамск**
**2010**

**УДК 53**
**А 13**

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) КГТУ.

**Рецензенты:**
**Сабанаев И.А.,** кандидат технических наук, доцент;
**Сагдеев А.А.,** кандидат технических наук, доцент.

**Абдуллин, А.М.**
**А 13** Физический практикум на базе лабораторного комплекса ЛКМ-2 : методические указания / А.М. Абдуллин, В.В. Биктагиров, Е.В. Яковлева. - Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КГТУ, 2010. – 36 с.

Приведены методические указания к лабораторным работам по механике.

Предназначены для студентов инженерно-технических специальностей.

**УДК 53**

## Введение

Целью лабораторных занятий является изучение количественных связей между физическими величинами, а также экспериментальная проверка основных физических законов и закономерностей.

Измерительная техника постепенно совершенствуется, давая возможность получать при измерениях всё более точные результаты. В основе действия современной измерительной техники лежат самые разнообразные физические явления, иногда достаточно сложные. Например, для точного измерения длины широко применяются оптически явления, внутренние напряжения в твердых телах исследуются поляризационными методами и т.д. При изучении каждого отдельного физического явления или для измерения отдельной физической величины можно применять различные методы, отличающиеся как точностью, так и доступностью в лабораторных условиях.

Точность измерения всегда является ограниченной, и результат измерения, как бы точно оно не было выполнено, дает нам не истинное значение измеряемой величины, а лишь приближенное, в той или иной степени близкое к истинному значению. Чем точнее метод измерений, тем сложнее его применение и тем большее количество различных факторов должно быть принято во внимание при измерениях. Приступая к какому-нибудь измерению, следует из различных методов выбирать тот, который дает результат, достаточно точный для данного случая, не усложняя работы применением особенно точных методов, если в том нет необходимости.

Измерять физическую величину непосредственно (прямым способом) приходится очень редко. Обычно приходится измерять непосредственно не искомую величину, а некоторые другие величины, связанные с ней известными математическими соотношениями (формулами), которые определяются законами данного явления и дают возможность из



результатов измерений вычислить искомую величину (косвенные измерения). Непосредственное измерение физических величин в этих случаях оказывается недоступным. Например, ускорение силы тяжести вычисляется по длине маятника и периоду его колебаний на основании известной формулы, т.к. непосредственное определение из опытов по свободному падению тел было бы очень сложным и недостаточно точным. При сложных методах измерений определение искомой величины требует измерения некоторых других величин, которые участвуют с ней в данном физическом явлении. В этом случае окончательная точность результата измерений зависит от точности отдельных измерений. Если пределы возможной точности для каждой измеряемой величины оказываются различными, то нет основания в отдельных измерениях выходить далеко за пределы точности наименее точного измерения, то есть можно ограничиться относительно простыми методами.

При измерении любой физической величины приходится выполнять три последовательные операции:

*а*) проверка и установка приборов;

*б*) наблюдение их показаний и значений;

*в*) вычисление искомой величины.

Проверка приборов необходима для того, чтобы получить уверенность в правильности их показаний. Операция подготовки приборов к отсчету и сам отсчет необходимо при измерениях повторить несколько раз, иначе измерение, как бы тщательно оно не было выполнено, не может считаться надежным.

Отсчет показаний прибора следует производить с достаточной точностью, однако при этом необходимо иметь в виду, что точность измерений не всегда определяется точностью отсчета. Точность измерений определяется качеством приборов, применяемых при измерениях, тщательностью их установки и проверки.

Когда измерения завершены, по результатам измерений вычисляют искомую величину по формулам, которыми определяются законы данного физического явления. Все вычисления следует вести приближенно, не выходя за пределы той точности, которая имеет место при измерениях, хотя арифметические расчеты могут быть выполнены сколь угодно точно. Точность вычислений должна соответствовать точности измерений. Например, если некоторая величина может быть измерена с точностью до второго десятичного знака, то вычисление результатов измерений следует вести с точностью до третьего десятичного знака. Хотя третий знак не является точным, он нужен для округления результата, когда, отбрасывая ненужные цифры, последнюю сохраняемую цифру принято увеличивать на единицу, если отбрасываемая больше пяти.



## Лабораторная работа № 114

## Определение модуля Юнга по колебаниям балки

Цель работы: изучение явления упругой деформации, опытное определение модуля Юнга при изгибе.

### Краткая теория

Твердые тела, как правило, имеют кристаллическое строение. Частицы, составляющие тело, располагаются в определенном порядке и образуют так называемую кристаллическую решетку. Под действием внешних сил частицы смещаются из начальных положений равновесия в новые положения, т.е. тело деформируется. При деформации внутри тела возникают силы, стремящиеся вернуть тело в начальное состояние. Эти силы называются упругими силами.

Упругой называется деформация, если после снятия действия внешних сил тело полностью восстанавливает свои первоначальные форму и размеры. Если же после прекращения действия внешней нагрузки тело восстанавливается не полностью, то деформация называется неупругой. В данной работе рассматриваются упругие деформации при изгибе.

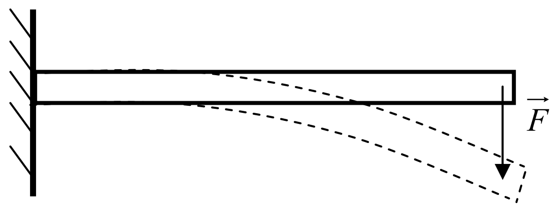


Рисунок 1 − Изгиб стержня

Если закрепить один конец горизонтально расположенного стержня, а на свободный конец воздействовать с силой $F$, направленной вертикально вниз (рисунок 1), то стержень изогнется. Физическая величина $\sigma$, равная отношению упругой силы $F_{упр.}$, действующей по нормали на единицу площади поперечного сечения тела $S$, называется нормальным <u>напряжением</u>:

$$\sigma = \frac{F_{упр}}{S} \quad [\text{Н/м}^2]. \tag{1}$$

Мерой деформации является относительная деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0}, \tag{2}$$

равная отношению абсолютной деформации $\Delta x$ к первоначальному значению величины $x_0$ , характеризующей размеры или форму тела. Абсолютная деформация равна изменению величины $x$:

$$\Delta x = x - x_0 , \tag{3}$$

$x_0$ - начальное значение величины, $x$ – значение в деформированном состоянии.

При малых упругих деформациях выполняется закон, установленный английским физиком Р.Гуком. Он формулируется следующим образом: абсолютная деформация тела прямо пропорциональна силе упругости:

$$F_{упр} = k\,|\Delta x|, \tag{4}$$

где $k$ – коэффициент жесткости, зависящий как от свойств тела, так и от его размеров.

Закон Гука можно представить в другом виде

$$\sigma = E\cdot\varepsilon , \tag{5}$$

где $E$ – модуль упругости (или модуль Юнга), равный нормальному напряжению, которое возникло бы в образце при увеличении его длины в два раза ($x = \Delta x$).

Сопоставляя формулы (4) и (5), можно получить выражение, связывающее $k$ и $E$.

$$k = E\frac{S}{x_0}. \tag{6}$$



## Методика измерений

<u>Приборы и принадлежности</u>: лабораторный комплекс ЛКМ-2, набор грузов, стержень, линейка, штангенциркуль.

Модуль Юнга определяют по измерению коэффициента жесткости балки при изгибе. Схема опыта приведена на рисунке 2. Исследуемая балка (стержень) **1** закреплена на колонне **2** стойки. За проточку вблизи свободного конца стержня

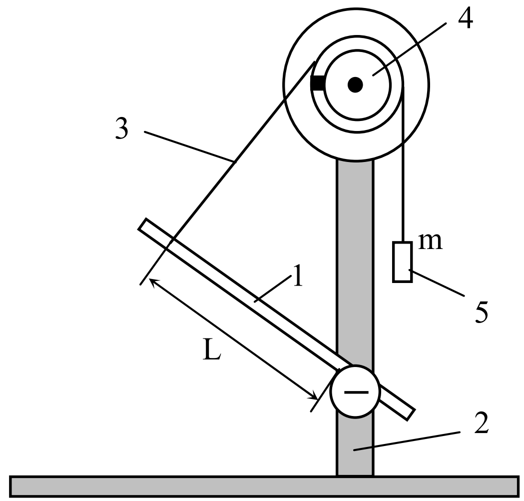


Рисунок 2 − Экспериментальная установка

закреплена нить **3**, перекинутая через шкив **4**. К концу нити подвешен наборный груз **5**. Стержень ориентируют перпендикулярно к нити с погрешностью до 10°. Прижав нить к шкале шкива, устанавливают указатель шкива на нулевое деление шкалы. По свечению индикатора ИСМ убеждаются в том, что щель диска находится в зазоре фотодатчика.

Слегка нажав на стержень, отпускают ее и измеряют период $T_1$ ее колебаний с грузом $m_1$. Изменяют массу груза и измеряют период колебаний $T_2$ с грузом массой $m_2$.

При малых амплитудах колебания стержня можно считать гармоническими, поэтому период колебаний будет определяться по формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,, \tag{7}$$

где $m$ - масса грузов.

Если определить периоды колебаний стержня при двух различных массах грузов, то

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

Отсюда находим коэффициент жесткости стержня:

$$k = \frac{4\pi^2(\mathrm{m}_2 - \mathrm{m}_1)}{\mathrm{T}_2^2 - \mathrm{T}_1^2}\,. \tag{8}$$

Для круглого стрежня диаметром $d$ и длиной до точки крепления $L$ (рисунок 2) коэффициент жесткости и модуль Юнга связаны соотношением:

$$k = E\cdot\frac{3\pi\ \mathrm{d}^4}{64\ \cdot \mathrm{L}^3}\,. \tag{9}$$

Тогда модуль Юнга для исследуемого стержня определяется по формуле:

$$E = k\cdot\frac{64\cdot L^3}{3\pi\, d^4}\,. \tag{10}$$



**Измерения и обработка результатов**

Материал стержня и массы грузов $m_1$ и $m_2$ задаются преподавателем. Измерения проводятся 3 раза. Результаты записываются в таблицу 1. Расчеты следует выполнять в системе единиц измерения СИ.

1. Штангенциркулем определить диаметр стержня $d$.
2. Взвешиванием определить массу груза $m_1$.
3. Собрать установку согласно схеме, приведенной на рисунке 2. Определить расстояние $L$. Вычислить доверительные интервалы для диаметра $\Delta\overline{d}$ и расстояния $\Delta\overline{L}$.
4. Определить период колебаний $T_1$. (Для определения времени в процессе колебаний нажать кнопку «Ручн.» на панели управления).
5. Предварительно определив массу $m_2$, измерить период колебаний $T_2$.
6. Для масс $m_1$, $m_2$ и периодов колебаний $T_1$, $T_2$ вычислить доверительные интервалы $\Delta\overline{m}_1$, $\Delta\overline{m}_2$, $\Delta\overline{T}_1$, $\Delta\overline{T}_2$.
7. По средним значениям $m_1$, $m_2$, $T_1$ и $T_2$ по формуле (8) вычислить среднее значение коэффициента жесткости стержня $\overline{k}$.
8. По формуле

$$\varepsilon_k = \sqrt{\frac{\Delta\overline{m}_1^{\,2} + \Delta\overline{m}_2^{\,2}}{\left(\overline{m}_2 - \overline{m}_1\right)^2} + \frac{4\overline{T}_1^{\,2}\Delta\overline{T}_1^{\,2} + 4\overline{T}_2^{\,2}\Delta\overline{T}_2^{\,2}}{\left(\overline{T}_2^{\,2} - \overline{T}_1^{\,2}\right)^2}}$$

вычислить относительную погрешность измерения коэффициента жесткости $k$.

9. Вычислить доверительный интервал для коэффициента жесткости:

$$\Delta\overline{k} = \varepsilon_k\cdot\overline{k}\quad,$$

где $\overline{k}$ - среднее значение коэффициента жесткости.

10. По формуле (10), используя средние значения $d$ и $L$, вычислить среднее значение модуля Юнга $\overline{E}$.

11. По формуле

$$\Delta\overline{E} = \overline{E}\sqrt{\left(\frac{\Delta\overline{k}}{\overline{k}}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta\overline{L}}{\overline{L}}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta\overline{d}}{\overline{d}}\right)^2}$$

вычислить доверительный интервал для модуля Юнга.

12. Результат измерений представить в виде

$$E = \overline{E} \pm \Delta\overline{E}$$

и сделать вывод по работе.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

| № п/п | $d_i$ мм | $\Delta d_i$ мм | $L_i$ мм | $\Delta L_i$ мм | $T_{1i}$ с | $\Delta T_{1i}$ с | $T_{2i}$ с | $\Delta T_{2i}$ с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.<br>2.<br>3. | | | | | | | | |
| среднее значение | | $\Delta\overline{d} =$ | | $\Delta\overline{L} =$ | | $\Delta\overline{T_1} =$ | | $\Delta\overline{T_2} =$ |

### Контрольные вопросы

1. Упругая и неупругая деформация.
2. Что называется абсолютной и относительной деформацией?
3. Сформулировать закон Гука в абсолютной и относительной формах.
4. Какой физический смысл имеет модуль упругости?
5. Вывести формулу для периода колебаний (7).



## Лабораторная работа № 115

## Определение скорости пули при помощи баллистического маятника

Цель работы: ознакомление с законами сохранения импульса и энергии, применение этих законов для определения скорости пули.

### Краткая теория

Классическая механика основывается на трех законах И.Ньютона. Основным законом классической динамики является II закон Ньютона. Для системы тел массами $m_1, m_2, \ldots, m_n$ этот закон имеет вид:

$$\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n}\vec{p}_i = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i \quad . \qquad (11)$$

Здесь векторная величина $\vec{p} = m\vec{v}$, равная произведению массы тела на его скорость, называется импульсом или количеством движения тела. В формуле (11) $\vec{p}_i = m_i\vec{v}_i$ - вектор импульса тела массой $m_i$, $\vec{F} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i$ - равнодействующая внешних сил, приложенных к данной системе тел.

Система тел, на которую внешние силы не действуют или их действие уравновешено, называется замкнутой. Для замкнутой системы тел

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0.$$

Тогда из формулы (11) следует закон сохранения импульса:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = const\ . \qquad (12)$$

Полный импульс замкнутой системы тел сохраняется, т.е. с течением времени не изменяется.

Все тела, как правило, находятся в таких условиях, когда на них действует некоторая сила, зависящая от положения тела в пространстве. Например, в поле тяготения Земли на тела действует сила тяжести, обусловленная притяжением к Земле и зависящая от высоты над уровнем моря. Тогда принято считать, что тело находится в некотором силовом поле. Силовое поле, перемещая тела, совершает определенную механическую работу. Если совершаемая силовым полем работа не зависит от формы траектории перемещения, а зависит только от начального и конечного положений перемещаемого тела, то такое поле называется потенциальным. Силы, действующие в потенциальном поле, называются консервативными (например, силы тяготения, упругой деформации и другие). Консервативная сила является однозначной функцией координат: $\vec{F}_{кон} = f(x, y, z)$. В потенциальных силовых полях тела приобретают так называемую потенциальную энергию.

Потенциальная энергия обусловлена взаимным расположением тел и их взаимодействием. Она численно равна работе, которую совершают консервативные силы при перемещении тела из рассматриваемого положения в положение, где потенциальная энергия считается равной нулю.



Потенциальная энергия тела, находящегося под действием силы тяжести, определяется по формуле:

$$W_n = mgh\ , \qquad (13)$$

где $g = 9{,}81$ м/с$^2$ – ускорение свободного падения, $h$ - высота над поверхностью Земли.

Кинетической энергией называется энергия движущегося тела и численно равна работе, которую может совершить тело при торможении до его полной остановки

$$W_к = \frac{mv^2}{2}\ . \qquad (14)$$

Из законов классической динамики следует также закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия замкнутой консервативной системы тел не изменяется в процессе ее движения:

$$E = W_к + W_n = const\ .$$

Консервативной называется система тел, в которой внутренние силы взаимодействия между телами потенциальны (или консервативны).

## Методика измерений

Пусть имеется баллистический маятник массой $m_0$, которая складывается из масс стержня ($m_{ст}$) и мишени ($m_м$). Момент инерции данного маятника относительно точки крепления определяется формулой:

$$I = m_м l^2 + \frac{1}{3} m_{ст} l^2\ , \qquad (15)$$

где $l$ – длина стержня, $I_м = m_м l^2$ и $I_{ст} = \frac{1}{3} m_{ст} l^2$ соответственно моменты инерции мишени и стержня относительно оси вращения.

С другой стороны, баллистический маятник можно представить как математический маятник с массой $M$ и длиной $l$, момент инерции которого равен

$$I = Ml^2 \quad . \qquad (16)$$

Величина $M$ называется приведенной массой баллистического маятника и равна

$$M = m_м + \frac{1}{3} m_{ст} \cdot \qquad (17)$$

Рассмотрим неупругое соударение баллистического маятника с пулей массой $m$, летящей со скоростью $v_0$. Для модели с приведенной массой закон сохранения импульса имеет вид:

$$mv_0 = (m+M)u \ , \qquad (18)$$

где $u$ - скорость системы "мишень-пуля" после удара. Отсюда скорость пули

$$v_0 = \frac{m+M}{m} \cdot u \ , \qquad (19)$$

Начальная кинетическая энергия системы "мишень-пуля" в конечном итоге переходит в потенциальную энергию:

$$\frac{(m+M)}{2} u^2 = (m+M) g h_1 , \qquad (20)$$

где $h_1$ - высота подъема мишени относительно уровня равновесия (рис.3). Определив скорость $u$ и подставив в (19), получим:

$$v_0 = \frac{m+M}{m} \sqrt{2gh_1} \ . \qquad (21)$$



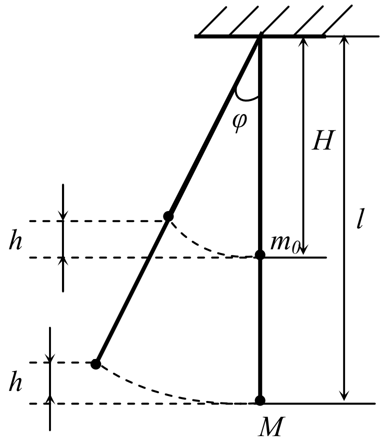


Рисунок 3 − Баллистический маятник

Высота подъема $h_1$ определяется формулой

$$h_1 = 2l \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \ . \qquad (22)$$

Отсюда

$$v_0 = 2\frac{m+M}{m} \sqrt{gl} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \qquad (23)$$

Длину $l$ определим из равенства потенциальных энергий при подъеме баллистического маятника и математического с приведенной массой $M$ (рисунок 3):

$$m_0 g h_2 = M g h_1 \ , \qquad (24)$$

где $h_2 = 2H \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$, $H$ – расстояние от оси вращения до центра масс. Подставив значение длины $l = \frac{m_0 H}{M}$ в выражение (23), получим формулу для определения скорости полета пули:

$$v_0 = 2\frac{m+M}{m} \sqrt{\frac{g\, m_0 H}{M}} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \qquad (25)$$

**Измерения и обработка результатов**

<u>Приборы и принадлежности</u>: лабораторный комплекс ЛКМ-2, лабораторные весы.

По заданию преподавателя измерения проводятся для физического или для математического маятника. Каждое измерение проводится 3 раза. Расчеты следует выполнять в системе единиц измерения СИ. Результаты записываются в таблицу 2.

1. Взвешиванием определить общую массу маятника $m_0$ и вычитанием массы стержня найти массу мишени $m_М$. Масса стержня математического маятника $m_{ст}$ = 26,4 *г*, физического маятника $m_{ст}$ = 294,5 *г*.
2. По формуле (17) вычислить приведенную массу маятника *M*.
3. Взвешиванием определить массу пули *m*.
4. Расстояние H от оси качения до центра масс определяется экспериментально (придумать метод и определить самостоятельно).
5. Сжатием пружины зарядить пушку (координата пули на стержне во всех опытах должна быть одинаковой).
6. Отпуская спусковое устройство, определить угол отклонения маятника $\varphi$.
7. По формуле (25) определить скорость полета пули $v_0$.
8. По заданной надежности измерений рассчитать доверительный интервал для скорости полета пули $\Delta\overline{v}_0$ :

$$\Delta\overline{v}_0 = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\overline{\Delta v_{01}}^2 + \overline{\Delta v_{02}}^2 + \overline{\Delta v_{03}}^2}{6}},$$

где $t_{\alpha,n}$ - коэффициент Стьюдента.



Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений

| № п/п | $M$ *кг* | $m$ *кг* | $H$ *м* | $\varphi$ *град* | $v_{0i}$ *м/с* | $\overline{v_0}$ *м/с* | $\Delta v_{0i}$ *м/с* | $\Delta\overline{v_0}$ *м/с* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |

**Контрольные вопросы**

1. Объяснить понятия замкнутой системы и консервативной системы.
2. Что называется потенциальной и кинетической энергией тела?
3. Сформулировать законы сохранения импульса и механической энергии.
4. Объяснить методику измерения скорости пули с помощью баллистического маятника.

## Лабораторная работа № 116

## Изучение законов механики на машине Атвуда

Цель работы: проверка второго закона Ньютона, измерение ускорения свободного падения.

### Краткая теория

На основании опытов английский физик И. Ньютон сформулировал один из основных законов механики (II Закон Ньютона): ускорение, сообщаемое телу силой, прямо пропорционально величине этой силы, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad . \qquad (26)$$

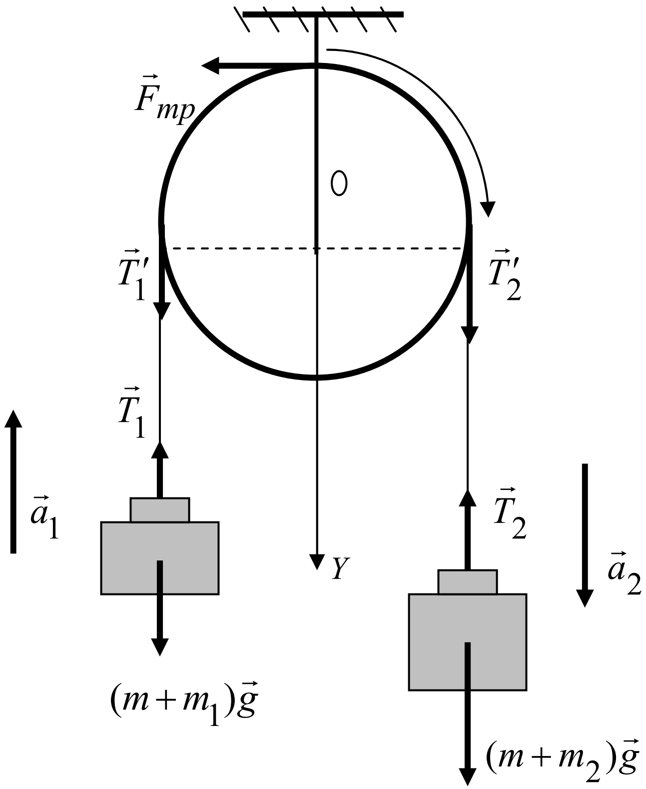


Рисунок 4 − Машина Атвуда

Обычно этот закон записывают в виде:

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i \ ,$$



где $\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$ - равнодействующая сил, приложенных к телу.

В данной работе для проверки законов механики используется так называемая машина Атвуда (рисунок 4). Она состоит из металлического шкива, через который перекинута легкая прочная нить. К концам нити подвешены два наборных груза разных масс. В свободном состоянии тяжелый груз массой $(m+m_2)$ опускается с ускорением $\vec{a}_2$, легкий груз массой $(m+m_1)$ поднимается с таким же по величине ускорением $\vec{a}_1$.

При вращении шкива возникает момент силы трения в оси $M_{mp}$. Уравнения движения грузов и шкива, согласно второму закону Ньютона и закону динамики вращательного движения, имеют вид:

$$\begin{cases} (m+m_1)\vec{a}_1 = (m+m_1)\vec{g} + \vec{T}_1 \\ (m+m_2)\vec{a}_2 = (m+m_2)\vec{g} + \vec{T}_2 \\ J\vec{\varepsilon} = \vec{M}_{T_1'} + \vec{M}_{T_2'} + \vec{M}_{mp} \quad . \end{cases} \qquad (27)$$

Здесь $\vec{T}_1, \vec{T}_1', \vec{T}_2, \vec{T}_2'$ – силы натяжения нити; $\vec{M}_{T_1'}$, $\vec{M}_{T_2'}$, $\vec{M}_{mp}$ – соответственно, моменты сил натяжения $\vec{T}_1'$, $\vec{T}_2'$ и момент силы трения, действующей на шкив; $J$ – момент инерции шкива относительно оси вращения.

Система уравнений (27) в проекции на координатную ось $OY$ принимает следующий вид:

$$\begin{cases} -(m+m_1)a=(m+m_1)g-T_1 \\ (m+m_2)a=(m+m_2)g-T_2 \\ J\dfrac{a}{R}=(T_2-T_1)R-M_{mp} \end{cases} \qquad (28)$$

Здесь учтено, что модули ускорения связанных тел одинаковы: $a_2=a_1=a$. Сила натяжения нерастяжимой и невесомой нити одинакова по всей длине, т.е. $T_1'=T_1$, $T_2=T_2'$. Угловое ускорение шкива:

$$\varepsilon=\frac{a}{R},$$

где $R$ – радиус шкива. Моменты сил натяжения соответственно равны:

$$M_{T_1'}=T_1R, \quad M_{T_2'}=T_2R \quad .$$

Момент инерции шкива относительно оси вращения:

$$J=\frac{m_{шк}R^2}{2},$$

где $m_{шк}$ – масса шкива. Решая систему уравнений (28) относительно ускорения, находим:

$$a=\frac{(m_2-m_1)g-\dfrac{M_{mp}}{R}}{2m+m_1+m_2+\dfrac{m_{шк}}{2}} \quad . \qquad (29)$$

Введем новые обозначения: $\Delta m=m_2-m_1$ – масса перегрузка; $F_{mp}=\dfrac{Mmp}{R}$ – эффективная сила трения, приведенная к



радиусу шкива; $M=2m+m_1+m_2+\dfrac{m_{шк}}{2}$ – приведенная масса системы. Тогда уравнение (29) можно представить в виде:

$$a=\frac{\Delta mg-F_{mp}}{M} \quad . \qquad (30)$$

Из этого выражения видно, что **ускорение грузов прямо пропорционально величине** $\Delta mg-F_{mp}$ **(при постоянной приведенной массе *M*) и обратно пропорционально приведенной массе системы *M* (при постоянной величине** $\Delta mg-F_{mp}$**).** Проверка утверждения: ускорение грузов линейно зависит от величины $\Delta mg$ (при постоянной приведенной массе M=const). Выражение (30) можно записать в виде:

$$a=\frac{1}{M}\Delta mg-\frac{F_{mp}}{M} \quad . \qquad (31)$$

Если приведенная масса системы $M$ в серии опытов постоянна и сила трения не зависит от скорости движения (для случая сравнительно небольших скоростей подтверждается экспериментально), то для каждого значения перегрузка $\Delta m$ при движении системы будет наблюдаться ускорение, линейно зависящее от величины $\Delta mg$. Тогда зависимость ускорения $a=f(\Delta mg)$ является линейной вида $y=kx+b$, где в качестве углового коэффициента прямой выступает величина, обратная приведенной массе: $k=\dfrac{1}{M}$. Коэффициент $b=-\dfrac{F_{mp}}{M}$, переменные $x=\Delta mg$, $y=a$. Графиком указанной зависимости $a = f(\Delta mg)$ является прямая, не проходящая через начало системы координат (рисунок 5).

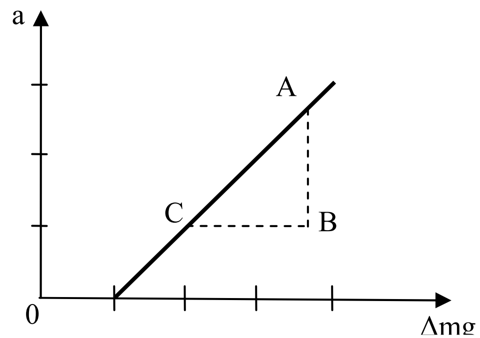


Рисунок 5 − Зависимость ускорения грузов от массы перегрузки

Таким образом, для выполнения опытов необходимо проводить измерение ускорения грузов при различных массах перегрузка $\Delta m = m_2 - m_1$, но при постоянной приведенной массе системы *M*. Для обеспечения неизменности приведенной массы в опытах следует устанавливать на платформы несколько грузов и менять перегрузок перекладыванием грузов с одной платформы на другую. По угловому коэффициенту прямой можно определить приведенную массу системы:

$$k = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{M} \quad . \qquad (32)$$

Длина отрезка, отсекаемого прямой на оси абсцисс *OX*, равна величине силы трения $F_{mp}$.

Из кинематики известно, что при вращательном равноускоренном движении тела из положения покоя угловое ускорение определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{2\varphi}{t^2} ,$$

где $\varphi$ – угол поворота шкива. Тогда ускорение грузов

$$a = \varepsilon R = \frac{2\varphi R}{t^2} \quad . \qquad (33)$$



## Описание экспериментальной установки

Приборы и принадлежности: модель машины Атвуда на базе лабораторного комплекса ЛКМ-2, набор грузов, нить с платформами и измерительная система ИСМ-5.

Экспериментальная установка смонтирована на базе лабораторного комплекса ЛКМ-2. На стойке укреплен двухступенчатый шкив, вращающийся вокруг горизонтальной оси, через шкив перекинута легкая (условно невесомая) нить с платформами одинаковой массы *m*. На платформы могут устанавливаться грузы различных масс $m_1$ и $m_2$, которые приводят систему “платформы-грузы” в поступательное движение с ускорением $\vec{a}_1$ , $\vec{a}_2$, шкив – во вращение с угловым ускорением $\varepsilon$. Описанное устройство называется машиной Атвуда. На стойке вместе со шкивом укреплена шкала для измерения углов, а на валу шкива закреплен непрозрачный диск. Этот диск и шкив имеют специальные прорези. Диск находится между двумя диодами (светодиод и фотодиод). В момент, когда прорезь на шкиве совпадает с нулевой отметкой по шкале, прорезь на диске находится между диодами. При повороте шкива свет, испускаемый светодиодом, перекрывается диском и не попадает на фотодиод. Начинается отсчет времени таймером ИСМ-5. Если тумблер «1/ΔT/2» находится в положении «1», таймер измерит время одного оборота шкива ($\varphi$=2$\pi$). Если тумблер находится в положении «2», таймер измерит время двух оборотов шкива ($\varphi$=4$\pi$). Расстояние, на которое сместится груз, равно соответственно одной или двум длинам окружности канавки шкива (такое измерение позволяет обойтись без шкалы на стойке и без измерения расстояния линейкой).

## Измерения и обработка результатов

1. Подготовить к работе прибор ИСМ-5. Выбрать положение тумблера «1/ΔT/2» и записать соответствующее значение угла φ. Тумблер «Однокр.» в верхнее положение. Все остальные тумблеры, кроме тумблера «Сеть», в среднее положение.
2. На платформах установить по одинаковому набору грузов (рекомендуется $m_1 = m_2 = 0{,}2кг;\ 0{,}25кг$). Перекинуть нить с грузами через большую ступень шкива (R=25,0±0,5мм). При этом система должна находиться в равновесии.

Таблица 3 - Результаты измерений и вычислений

| № п/п | $\Delta m$ кг | $\Delta mg$ Н | $t_i$, с | $\bar{t}$, с | $\overline{\Delta t}$, с | $\bar{a}$ м/с$^2$ | $\overline{\Delta a}$ м/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | 1.<br>2.<br>3. | | | | |
| 2 | | | 1.<br>2.<br>3. | | | | |
| 3 | | | 1.<br>2.<br>3. | | | | |

3. Включить установку тумблером «Сеть».
4. Часть грузов на левой платформе переложить на правую, рассчитать массу перегрузка *Δm*. Результат записать в таблицу 3. Рекомендуется перекладывать только грузы массой 10*г* и 20*г*,



так, чтобы масса перегрузка $\Delta m = m_2 - m_1$ была равна 20*г*, 40*г*, 60*г*.
5. Для данного перегрузка измерить время *t* поворота шкива на угол *φ*. Измерение проводится следующим образом. Легкий груз опускают и удерживают прижатым к основанию установки. Поворачивая шкив, устанавливают щель на шкиве на ноль (на панели ИСМ-5 загорается индикатор). При горящем индикаторе нажимают кнопку «Готов» для перевода таймера в режим ожидания. Затем отпускают нижний груз (например, левой рукой) и ловят его после первого звукового сигнала этой же рукой, так, чтобы грузы не ударились об основание и не разлетелись. Таймер зафиксирует время *t* одного (положение тумблера «1») или двух (положение тумблера «2») оборотов шкива после начала движения. Опыт провести три раза. Записать показания таймера в таблицу 3.
6. Повторить пункты 5-6 еще для двух других значений *Δm* (масса *M* системы при этом должна оставаться постоянной). Результаты измерений внести в таблицу 3.
7. Выключить установку. Сдать принадлежности преподавателю.
8. Для каждого опыта вычислить среднее значение времени падения $\bar{t}$ и по формуле (33) среднее ускорение $\bar{a}$. По заданной надежности измерений оценить доверительные интервалы для времени и ускорения:

$$\overline{\Delta t} = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2 + \Delta t_3^2}{n(n-1)}}\ ;$$

$$\overline{\Delta a} = \bar{a}\sqrt{\left(\frac{\overline{\Delta R}}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\overline{\Delta t}}{\bar{t}}\right)^2}\ .$$

Здесь $n$ – количество измерений, $\Delta t_i$ - абсолютные погрешности измерения времени. Погрешность измерения радиуса шкива $\Delta \overline{R}$ принять равной 0,5*мм*.

9. По средним значениям построить график зависимости $a = f(\Delta mg)$. По формуле (32) вычислить приведенную массу $M$ системы. По графику на рис.5 определить значение силы трения $F_{тр}$.

10. По формуле

$$g = \frac{Ma + F_{тр}}{\Delta m}$$

вычислить ускорение свободного падения для трех значений $\Delta m$.

11. По алгоритму для прямых измерений оценить доверительный интервал $\overline{\Delta g}$ для ускорения свободного падения.

## Контрольные вопросы

1. Сформулировать и объяснить II закон Ньютона. Что называется равнодействующей силой?
2. В чем заключается сущность проверки II закона Ньютона для данной системы?
3. Объяснить устройство и принцип действия машины Атвуда.
4. Какие силы приводят в действие машину Атвуда? Перечислить и объяснить природу этих сил.
5. От чего зависит угловой коэффициент прямой на рисунке 5?
6. Что характеризует отрезок, отсекаемый прямой на оси абсцисс на рисунке 5?



# Лабораторная работа №117
## Изучение колебаний пружинного маятника

Цель работы**:** измерение коэффициента жесткости пружины и ускорения свободного падения, изучение законов колебательного движения.

## Краткая теория

*Колебательным движением* (колебанием) называется процесс, при котором система, многократно отклоняясь от положения равновесия, вновь возвращается к нему. Если этот возврат совершается через равные промежутки времени, то колебания называются *периодическими.*

Колебания называются *свободными* (или собственными), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему. В отсутствие диссипативных сил (сил трения, сопротивления среды и т.д.) не происходит рассеяния энергии в окружающую среду. В этом случае свободные колебания будут незатухающими.

Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний имеет следующий вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0 x = 0 \quad , \tag{34}$$

где $x$ – смещение колебательной системы от положения равновесия, $\omega_0$ – циклическая частота колебаний. Решением данного уравнения является функция:

$$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad . \tag{35}$$

Здесь $A$ - амплитуда колебаний, $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ - фаза колебаний, $\varphi_0$- начальная фаза колебаний. Амплитудой колебаний называется максимальное смещение колебательной системы от положения равновесия.

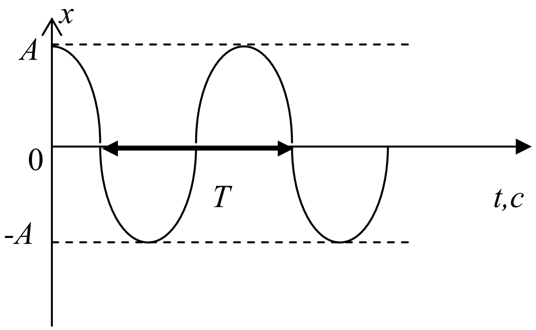


Рисунок 6 − График гармонических колебаний

Колебания также характеризуются периодом и частотой. Период $T$ равен промежутку времени, в течение которого фаза колебаний изменяется на $2\pi$ радиан. Частота $\nu$ численно равна числу полных колебаний, совершенных системой за одну секунду. Период и частота колебаний связаны между собой соотношением:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad .$$

Частота колебаний измеряется в единицах *Герц(Гц)*.

Система, движение которой описывается уравнением вида (34), называется *гармоническим осциллятором*, а колебания – *гармоническими*. График гармонических колебаний представлен на рисунке 6.

Простейшим примером гармонического осциллятора является пружинный маятник (рисунок 7). Тело массой $m$ (материальная точка) подвешено на упругой пружине с коэффициентом жесткости $k$.



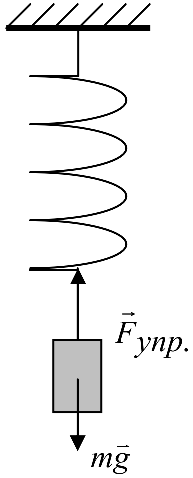


Рисунок 7 − Пружинный маятник

На груз действуют две силы: сила тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$ и зависящая от смешения $x$ сила упругости $\vec{F}_{упр.} = -k\vec{x}$. Знак минус в этой формуле показывает, что сила упругости всегда направлена в сторону, противоположную смещению $x$. При растяжении пружины силы тяжести и упругости противоположны, а при сжатии имеют одинаковые направления. В состоянии равновесия груза сила упругости уравновешивает силу тяжести: $kx = mg$. Тогда статическое значение коэффициента жесткости пружины:

$$k_{стат.} = \frac{mg}{x}, \qquad (36)$$

где $g=9{,}81 м/с^2$ - ускорение свободного падения на Земле.

По второму закону Ньютона уравнение движения пружинного маятника имеет вид:

$$ma = -kx \quad \text{или}$$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad .$$

Для приведения данного уравнения к дифференциальному уравнению гармонического осциллятора (34), необходимо ввести обозначение $\omega_0^2 = k/m$.

Таким образом, пружинный маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad . \tag{37}$$

Период колебаний пружинного маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad . \tag{38}$$

Отсюда находим динамическое значение коэффициента жесткости пружины:

$$k_{дин.} = \frac{4\pi^2 m}{T^2} . \tag{39}$$

## Описание экспериментальной установки

Приборы и принадлежности: лабораторный комплекс ЛКМ-2, набор грузов, пружины различной жесткости, измерительная линейка.

На базе лабораторного комплекса ЛКМ-2 собирается установка, показанная на рисунке 8. Пружину 2 прикрепляют к основанию 1 с помощью специального крючка. Ко второму концу пружины прикрепляется нить, которая перекидывается через шкив 3. К концу нити подвешивается наборный груз 4. Период колебаний маятника определяется с помощью измерительной системы ИСМ-5. Для этого необходимо, чтобы при равновесном положении системы щель шкива 5 оказалось в зазоре фотодатчика. Этого добиваются, аккуратно поворачивая шкив, придерживая при этом груз. Тумблер «2/ΔT/1» на передней панели измерительной системы ИСМ-5 устанавливается в положение «2», тогда таймер покажет период колебаний $T$.



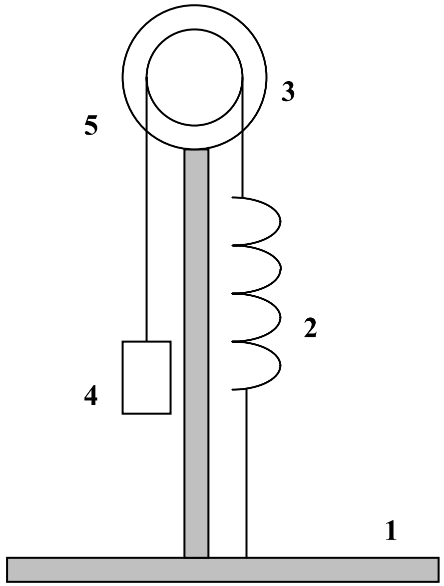


Рисунок 8 − Экспериментальная установка

## Измерения и обработка результатов

По заданию преподавателя провести измерения для разных пружин, имеющихся в комплекте ЛКМ-2, а также для последовательного и параллельного соединений этих пружин. Вычисления следует выполнять в системе единиц измерения СИ. Результаты измерений и вычислений оформить в виде таблицы 4.

1. В состоянии равновесия для грузов с разными массами $m_1$ и $m_2$ измерить расстояния $x_1$ и $x_2$ от основания стойки до этих грузов.

2. Измерить периоды колебаний $T_1$ и $T_2$ для грузов $m_1$ и $m_2$ соответственно.

3. По формулам (40), (41), (42) вычислить коэффициент жесткости пружины и ускорение свободного падения.

$$k_{стат.} = \frac{g\Delta m}{\Delta x} = \frac{g(m_2 - m_1)}{x_2 - x_1}, \qquad (40)$$

$$k_{дин.} = \frac{4\pi^2(m_2 - m_1)}{T_2^2 - T_1^2}, \qquad (41)$$

$$g = \frac{4\pi^2(x_2 - x_1)}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (42)$$

4. По формуле для косвенных измерений оценить систематические погрешности.

Таблица 4 - Результаты измерений и вычислений

| | Пружина №1 | | Пружина №2 | | Параллельное соединение | | Последовательное соединение | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Массы грузов, *кг* | $m_1$= | $m_2$= | $m_1$= | $m_2$= | $m_1$= | $m_2$= | $m_1$= | $m_2$= |
| Координаты грузов, *м* | $x_1$= | $x_2$= | $x_1$= | $x_2$= | $x_1$= | $x_2$= | $x_1$= | $x_2$= |
| Период колебаний, *с* | $T_1$= | $T_2$= | $T_1$= | $T_2$= | $T_1$= | $T_2$= | $T_1$= | $T_2$= |
| $g$, $м/с^2$ | | | | | | | | |
| $k_{стат.}$, *Н/м* | | | | | | | | |
| $k_{дин.}$, *Н/м* | | | | | | | | |



## Контрольные вопросы

1. Какое движение называется колебаниями?
2. Какие колебания называются свободными и незатухающими?
3. Какие колебания называются гармоническими? Написать уравнение этих колебаний.
4. Что называется гармоническим осциллятором?
5. Что называется амплитудой, фазой, периодом и частотой колебаний? Построить график гармонических колебаний и показать на нем амплитуду и период.
6. Какие силы действуют на пружинный маятник? Написать уравнение движения пружинного маятника и доказать формулу (38) для периода колебаний.
7. Объяснить методику измерения ускорения свободного падения при помощи пружинного маятника.

## Литература

1. Детлаф, А.А. Курс физики : учебное пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2001. – 718 с.
2. Лабораторный комплекс ЛКМ-2 «Законы механики» / Паспорт и техническое описание / – М. : ВЛАДИС, 2003. – 60 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990. – 478 с.

## Содержание





**Учебное издание**

**Абдуллин Айрат Махмутович**
кандидат технических наук, доцент

**Биктагиров Вахит Валиахметович**
кандидат химических наук, доцент

**Яковлева Елена Владимировна**
доктор педагогических наук, доцент

# ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ НА БАЗЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ЛКМ-2

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Корректор Габдурахимова Т.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 03.11.2010.
Подписано в печать 11.11.2010.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 2,25. Тираж 100.
Заказ №47.

НХТИ (филиал) ГОУ ВПО «КГТУ», г. Нижнекамск, 423570,
ул. 30 лет Победы, д. 5а.