

В.А. Есина

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КАК ВИД УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Одной из основных задач высшего образования является формирование и развитие научного мировоззрения студентов. На это нацелено большинство дисциплин, изучаемых в высшей школе. Однако ведущая роль принадлежит фундаментальным наукам. К их числу относится и физика.

Изучение физики способствует становлению и развитию физического мышления, освоению современной физической картины мира и на этой основе - формированию научного мировоззрения, а также созданию научного фундамента для изучения общетехнических и специальных дисциплин.

Физика не только дает студентам совокупность современных представлений об окружающем мире, но и вооружает научным методом познания явлений и процессов. Суть этого метода, пригодного для исследований в любой области человеческой деятельности, кратко может быть представлена в неразрывной связи элементов: наблюдение явления или процесса → теоретическое осмысление результатов наблюдения → проверка выводов теории на опыте.

Это определяет и наиболее разумный метод преподавания физики как учебной дисциплины. Под таким методом понимается метод, при котором основные элементы преподавания соответствуют основным элементам процесса научного познания. Последнее означает, что все атрибуты процесса научного познания (анализ и синтез; абстрагирование, идеализация, обобщение и ограничение; аналогия, моделирование, формализация; аксиоматика; индукция и дедукция; историческое и логическое) должны органически присутствовать в преподавании физики. В этом и трудность, и особая интеллектуальная привлекательность, с одной стороны, преподавания, с другой - изучения физики.

Отношение к физике как к модели процесса научного познания определяет место и значение физического практикума в преподавании физики, как и вообще эксперимента в преподавании любой дисциплины.

Каждая лабораторная работа - маленькое, не самостоятельно поставленное, но самостоятельно выполненное исследование. Оно требует предварительной подготовки: изучения литературы, анализа лекционного теоретического материала, а также освоения экспериментальной установки, приборов, правил работы с ними.

В лаборатории студенты приобретают умение анализировать полученные экспериментальные результаты, выделять главное, существенное, отвлекаясь от несущественного, делать правильные выводы из сопоставления теории и эксперимента. Они приходят к пониманию роли идеализаций, учатся получать путем остроумных экстраполяций результаты для условий, реально недостижимых в условиях Земли и, может быть, самое главное, приобретают опыт творческой деятельности. Лабораторная работа как вид учебной деятельности развивает логическое мышление, формирует и стимулирует творческое мышление.

Помимо этого в процессе лабораторной работы студенты осознают, что любое измеренное значение физической величины не может быть абсолютно точным, поскольку несет в себе систематические и случайные погрешности измерения. Первые связаны с тем, что не существует абсолютно точных приборов и абсолютно точных методик измерения, вторые являются следствием случайных неконтролируемых помех, влияние которых на процесс измерения невозможно учесть непосредственно.

В психолого-педагогическом аспекте лабораторная работа как вид учебной деятельности является, без сомнения, одной из важнейших форм познавательной деятельности.

В психологическом плане процесс усвоения знаний есть процесс усвоения тех действий, в которых эти знания занимают определенное место. Одним из видов такой деятельности, в ходе которой происходит усвоение знаний в области физики, является лабораторная работа.

Согласно психологической теории учения [1-3], содержанием обучения должно быть поэтапное формирование умственных действий. Но умственные действия есть действия свернутые, со-

вершаемые во внутреннем плане. Обучаемый переходит к ним от действий развернутых, совершаемых во внешнем плане. Лабораторная работа занимает значимое место среди тех видов учебной деятельности, которые позволяют перейти от развернутых действий к свернутым, т.е. реализуют этап итериоризации.

Выполнение лабораторной работы, получение ответа на вопросы, поставленные в ней как цель лабораторной работы, требуют от студента иногда и догадки, изобретательности (хотя трудно, конечно, поставить лабораторную работу с эвристическими элементами, которую можно было бы выполнить за два академических часа, отводимых на нее учебным планом), что позволяет испытать напряжение ума и радость победы, пусть и маленькой. Но даже если задача, поставленная в лабораторной работе, и не имеет выраженной эвристической направленности, выполнение ее приносит удовлетворение от хорошо и правильного сделанного дела. А это - пусть небольшой, но шаг в приобретении позитивного эмоционально-ценностного опыта.

Поэтому с полным основанием можно говорить, что лабораторная работа как вид учебной деятельности дает студентам знания, умения, навыки, опыт творческой деятельности, эмоционально-ценностный опыт, вооружает студентов методом научного познания.

В качестве примера методического пособия, ориентирующего деятельность студента при выполнении лабораторной работы, предлагаются методические указания к новой на нашей кафедре лабораторной работе "Физический маятник. Определение ускорения свободного падения".

При разработке пособия за основу принято то положение, что лабораторная работа, независимо от ее принадлежности к конкретному разделу физики, является моделью исследования, структурные составляющие которого являются общими для всех типов исследований. Методические указания должны содержать теоретическое обоснование поставленной задачи исследования, вытекающие из данного обоснования возможности экспериментального решения задачи, выбор метода, последовательность экспериментальных действий, способы рациональной обработки экспериментальных результатов, включать оценку допускаемых экспериментальных погрешностей.

Важно, чтобы в отчете по лабораторной работе студенты самостоятельно формулировали конкретную цель исследования и в конце отчета приводили выводы, сопряженные с данной целью.

## Методические указания к лабораторной работе "Физический маятник. Определение ускорения свободного падения"

### 1. Краткая теория

#### 1.1. Физический маятник

Под физическим маятником понимают твердое тело, совершающее колебания под действием собственной силы тяжести  $m \cdot \vec{g}$  вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр тяжести тела  $C$  (рис. 1). Эта ось называется *осью качания маятника*. Точка  $O$ , являющаяся точкой пересечения оси качания маятника с вертикальной плоскостью, перпендикулярной оси качания и проходящей через центр тяжести маятника, называется *точкой подвеса маятника*. Колебания маятника характеризуются углом  $\alpha$  отклонения прямой  $OC$  от равновесного положения.

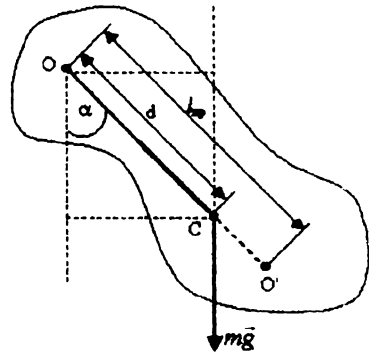


Рис. 1. Физический маятник

Уравнением движения физического маятника является основной закон динамики для вращательного движения твердого тела:

$$J \cdot \varepsilon = M \quad , \quad (1)$$

где  $J$  - момент инерции тела относительно оси качания,

$\varepsilon$  - угловое ускорение тела;

$M$  - результирующий вращательный момент относительно оси качания, действующий на тело.

При отсутствии трения в подвесе это уравнение имеет вид

$$J \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mg \cdot d \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $d$  - кратчайшее расстояние от центра тяжести до оси качения.

Вращательный момент силы тяжести  $m\vec{g}$  всегда стремится вернуть тело в положение равновесия, поэтому вращательному моменту и отклонению от положения равновесия приписывают противоположные знаки.

При *малых* колебаниях маятника  $\sin \alpha \cong \alpha$ . Тогда уравнение движения приобретает вид

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mgd}{J} \alpha = 0. \quad (3)$$

Это есть дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Его решением является гармоническая функция вида

$$\alpha = \alpha_0 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где  $\alpha_0$  - амплитуда колебаний угла  $\alpha$ ;

$\varphi_0$  - начальная фаза;

$\omega$  - циклическая частота.

Циклическая частота  $\omega$  и период колебаний  $T$ , согласно уравнению (3), соответственно определяются как

$$\omega = \sqrt{\frac{mgd}{J}}, \quad (5)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}}, \quad (6)$$

Следовательно, в отсутствие трения *малые* колебания физического маятника являются гармоническими. При больших колебаниях период колебаний зависит от амплитуды  $\alpha_0$ .

## 1.2. Математический маятник. Приведенная длина физического маятника

Предельным случаем физического маятника, вся масса которого сосредоточена в его центре инерции (центре тяжести), является математический маятник, т.е. математический маятник - это материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести (рис.2). Длина маятника  $l = d$ , момент инерции относительно оси качания  $J = ml^2$ . Соответственно для математического маятника формулы (5) и (6) преобразуются следующим образом:



Рис.2. Математический маятник

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (7)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (8)$$

Из сопоставления формул (6) и (8) получается, что математический маятник с длиной

$$l_{np} = \frac{J}{md} \quad (9)$$

будет иметь такой же период колебаний, как данный физический маятник. Величину (9) называют *приведенной длиной* физического маятника. Приведенная длина физического маятника - это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом данного физического маятника.

По теореме Штейнера,  $J_0 = J_c + md^2$ , тогда

$$l_{np} = \frac{J_c}{md} + \frac{md^2}{md} = d + \frac{J_c}{md} > d.$$

Период колебания физического маятника можно выразить через приведенную длину  $l_{пр}$ . Из (6) и (9) следует

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_{пр}}{g}} . \quad (10)$$

### 1.3. Центр качания физического маятника. Оборотный маятник

Точка  $O'$ , лежащая на продолжении прямой  $OC$  (см. рис. 1) на расстоянии  $l_{пр}$  от точки  $O$  подвеса маятника, называется *центром качания* физического маятника.

Центр качания  $O'$  и точка подвеса  $O$  обладают свойством взаимности: если маятник подвесить так, чтобы его ось качания проходила через точку  $O'$ , то точка  $O$  будет совпадать с новым положением центра качания маятника, т.е. приведенная длина и период колебаний маятника останутся прежними.

На этом свойстве основано определение ускорения свободного падения с помощью так называемого *оборотного маятника*.

Оборотным называется маятник, у которого имеются две параллельные друг другу, закрепленные у его концов опорные призмы, на которые он может поочередно подвешиваться. Вдоль маятника могут перемещаться и закрепляться на нем тяжелые грузы. Перемещая грузы и меняя расстояния между призмами, можно добиться того, чтобы при подвешивании маятника на любую из призм период колебаний был одинаков. Тогда расстояние между опорными ребрами призм будет равно  $l_{пр}$ . Измерив период колебаний маятника и зная  $l_{пр}$ , можно найти ускорение свободного падения по формуле

$$g = \frac{4\pi^2 l_{пр}}{T^2} . \quad (11)$$

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из оборотного физического маятника, фотозлектрического датчика и комбинированного миллисекундомера (рис. 3).

На вертикальной стойке основания 1 жестко закреплен кронштейн 2, который может поворачиваться вокруг стойки на  $360^\circ$  и фиксироваться в любом выбранном положении. Кронштейн имеет проточенные риски в месте подвеса маятника для фиксации положения опорных призм. На кронштейне 2 подвешен на опорной призме 3 физический оборотный маятник 4, который состоит из стального стержня 5 с двумя грузами 6. Грузы 6 и опорные призмы 3 могут перемещаться по всей длине стержня 5 и фиксироваться в требуемом положении. Стержень 5, длиной 59 см, имеет кольцевые проточки, нанесенные через 1 см, которые служат для

надежной фиксации грузов и опорных призм, а также для отсчета расстояний между ними. Грузы и опорные призмы имеют размеры по длине стержня, кратные 10 (20) мм и элементы фиксации, находящиеся строго посередине этих размеров, что облегчает определение расстояния между ними.

Датчик фотозлектрический 7 с помощью кронштейна 8 закреплен в нижней части вертикальной стойки и имеет возможность перемещаться как вдоль, так и вокруг вертикальной стойки и фиксироваться в любом положении. Датчик предназначен для выдачи электрических сигналов на миллисекундомер 9.

Физический комбинированный миллисекундомер 9 выполнен как самостоятельный прибор с цифровой индексацией времени и количества полных периодов колебаний маятника. Миллисекундомер жестко закреплен на основании 1. Измеряемое количество

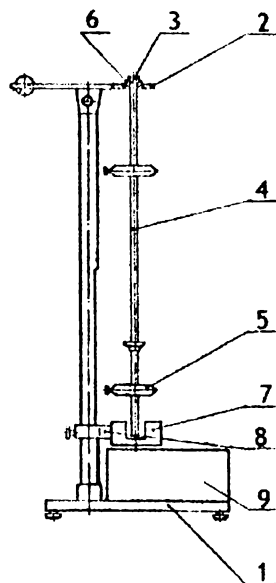


Рис. 3. Оборотный физический маятник



колебаний - не более 99. Измеряемые промежутки времени - не более 99,999 с. На лицевой панели секундомера имеются управляющие кнопки: "Сеть", "Стоп", "Сброс".

### *3. Порядок выполнения работы*

Исследуя малые колебания физического маятника, можно решать разные экспериментальные задачи. Например, можно измерять момент инерции твердого тела или системы твердых тел по периоду колебаний и сравнивать экспериментально полученное значение с теоретически рассчитанным. Можно экспериментально определять ускорение свободного падения  $g$ .

В последнем случае цель работы сводится к экспериментальному определению приведенной длины физического маятника, т.е. к нахождению такого расстояния между опорными призмами, при котором при последовательном подвешивании маятника на обе призмы период колебаний его будет одинаков. Этого можно добиться либо изменяя расстояние между опорными призмами при неизменном положении грузов, либо изменяя положение грузов при неизменном положении призм, либо меняя и то и другое.

Выберем первый способ, т.е. будем определять приведенную длину физического маятника, изменяя расстояние между опорными призмами.

При этом способе последовательность выполнения работы заключается в следующем:

1. Изучить экспериментальную установку, составить список приборов, принадлежностей, указать их характеристики.

2. На стержне физического маятника закрепить одну опорную призму (пусть это будет точка подвеса, т.О) на расстоянии 4 см и один груз на расстоянии ~16 см от конца стержня, второй груз - на расстоянии ~ 6 см от другого конца стержня, вторую опорную призму (точка подвеса т.О') - на расстоянии  $l$  от первой призмы ( $l$  - расстояние между опорными ребрами призм; см. таблицу).

3. Осторожно подвесить маятник на верхний кронштейн на одной из опорных призм (т.О). Проверить надежность фиксации призмы в кольцевых проточенных рисках кронштейна.

4. Установить нижний кронштейн с фотоэлектрическим датчиком так, чтобы стержень 5-го физического маятника пересекал луч света от лампочки датчика к фотозаэлементу, т.е. оптическую ось фотодатчика.

5. Подключить к разьему "Вход" на миллисекундомере фотоэлектрический датчик. Нажать кнопку "Сеть" на лицевой панели миллисекундомера, при этом должны загореться лампочки фотодатчика и цифровые индикаторы.

6. Отвести рукой маятник на  $5-6^\circ$  (не более  $10^\circ$ ) и свободно (без толчка) отпустить его.

7. Нажать кнопку "Сброс". Убедиться, что в этот момент на цифровых индикаторах появились нули.

8. Подождать, пока пройдут 6 колебаний, и нажать кнопку "Стоп". При этом прибор дождется завершения уже начатого 7-го колебания и покажет время 7 полных колебаний.

9. Число полных колебаний  $n$  и время  $n$  колебаний  $t$  занести в таблицу.

10. Подвесить маятник на другой опорной призме (т.О') и повторно выполнить пункты 6 - 9.

11. Изменить расстояние  $l$  между призмами, перемещая вторую призму (возможные значения  $l$  приведены в таблице) и повторить пункты 6 - 10. Для опытов 2-5 и  $l_{\text{тр}}$  таблица заполняется так же, как для опыта 1.

## Экспериментальные результаты

Но- мер опыта	$l,$ см	$\sqrt{l},$ см <sup>1/2</sup>	$n_0$	$t_0,$ с	$T_0,$ с	$n_0$	$t_0,$ с	$T_0,$ с	$\Delta T,$ с	$\bar{T}_0 - T_{0p}$ с	$(\bar{T}_0 - T_{0p})^2,$ с <sup>2</sup>
1	30		7 7 7 7 7		$\bar{T}_0 =$			$\bar{T}_0 =$			
2	34										
3	38										
4	42										
5	46										
	$l_{np}$										

### 4. Обработка результатов измерений

1. В каждом опыте, поделив общее время колебаний  $t$  на число колебаний  $n$ , найти период колебаний  $T$ . Полученные значения занести в таблицу.

2. Для каждого значения  $l$  найти среднее значение  $T$  при подвешивании маятника последовательно на обе призмы. Средние значения  $T_0$  и  $T_{0'}$  занести в таблицу.

3. Добиться совпадения  $T_0$  и  $T_{0'}$ , меняя расстояния между опорными призмами в принципе можно, но это потребует больших затрат времени. Рациональнее для каждого  $l$  найти  $\Delta T = \bar{T}_0 - \bar{T}_{0'}$ , построить график зависимости  $\Delta T$  от  $\sqrt{l}$  (в соответствии с формулой (10) эта зависимость должна быть линейной) и найти то значение  $\sqrt{l}$  при котором  $\Delta T = 0$  (рис.4). Возведя найденное значение в квадрат, получим приведенную длину  $l_{np}$  физического маятника.

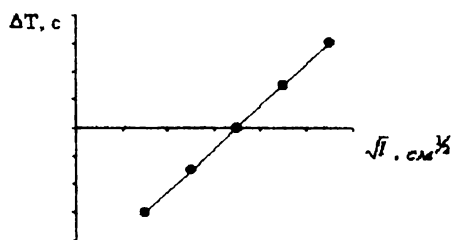


Рис.4. Зависимость  $\Delta T$  от  $\sqrt{l}$

4. Установить вторую опорную призму (т.О') на расстоянии  $l_{np}$  от первой (т. О). Измерить период колебаний  $T$ , подвешивая маятник последовательно на обе призмы. Убедиться, что значения  $T_0$  и  $T_0'$  совпадают с точностью до 1%.

5. Используя найденные значения  $T$  и  $l_{np}$ , рассчитать ускорение свободного падения  $g$  по формуле (11).

### 5. Расчет ошибок измерения

1) Вычислить неисключенную относительную  $\gamma$  и абсолютную  $\theta$  систематические погрешности.

Исходя из формулы (11),

$$\gamma_g = \pm \frac{\Theta_g}{g} = \pm \frac{\Theta_{l_{np}}}{l_{np}} + \frac{2\Theta_T}{T}, \quad (12)$$

где  $\Theta_{l_{np}} = \pm 1 \text{ см}$ ;

$$\Theta_T = \pm 0,001 \text{ с} ;$$

$$\Theta_g = \pm k \cdot \gamma \cdot g, \quad (13)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от выбранного значения доверительной вероятности (для  $\alpha=0,95$  и  $k=1,1$ ).

2) Вычислить абсолютную случайную погрешность  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_g = \pm t_{\alpha,n} \cdot S_g, \quad (14)$$

где  $t_{\alpha,n}$  - коэффициент Стьюдента для  $n=5$  и  $\alpha=0,95$ ;

$S_g$  - среднеквадратическое отклонение для  $g$ .

В соответствии с формулой (11)

$$S_g = \sqrt{\left(\frac{4\pi^2 l_{np}}{T^3} S_T\right)^2 + \left(\frac{4\pi^2}{T^2} S_{l_{np}}\right)^2} = \frac{4\pi^2 l_{np}}{T^2} \sqrt{\left(2\frac{S_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{S_{l_{np}}}{l_{np}}\right)^2} =$$

$$= g \sqrt{4\left(\frac{S_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{S_{l_{np}}}{l_{np}}\right)^2},$$

где  $S_T$  - среднеквадратическое отклонение для  $T$ ;

$S_{l_{np}}$  - среднеквадратическое отклонение для  $l_{np}$ .

Приведенную длину физического маятника  $l_{np}$  находили методом экстраполяции экспериментальных значений  $\Delta T(l_{np})$  на  $\Delta T=0$ . Не учитывая погрешность графической экстраполяции, в первом приближении можно считать, что случайная погрешность в  $l_{np}$  определяется случайной погрешностью  $T$ . Тогда

$$S_g = g \frac{S_T}{T} \sqrt{5}. \quad (15)$$

Здесь  $S_T$  находим для одного из опытов, например для опыта, в котором  $l = 38$  см, по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum (\bar{T}_0 - T_{0i})^2}{n(n-1)}}, \quad (16)$$

где  $n$  - число опытов.

3) Записать результирующую абсолютную погрешность  $\Delta$  измерения  $g$  по приближенной формуле

$$\Delta g = \pm(\epsilon_g + \theta_g). \quad (17)$$

4) Запись окончательного результата определения  $g$ :

$$g = g \pm \Delta g. \quad (18)$$

5) По итогам выполненной лабораторной работы необходимо сформулировать краткие, но исчерпывающие выводы.

## 6. Контрольные вопросы

1. Что такое физический маятник?
2. Что такое центр тяжести твердого тела?
3. Что такое момент инерции?
4. Как определяется момент инерции твердого тела?
5. Каким законом описывается движение физического маятника? Сформулируйте его.
6. Что такое вращательный момент? Чему равен вращательный момент силы  $m\vec{g}$ ?
7. Какими являются малые колебания физического маятника? Откуда это следует?
8. Как получить формулу для периода колебаний физического маятника?
9. Почему эта формула справедлива лишь для небольших отклонений физического маятника от положения равновесия?
10. Что такое математический маятник?
11. Что такое приведенная длина физического маятника?
12. Что такое оборотный маятник?
13. Что такое центр качания физического маятника?
14. Почему приведенная длина физического маятника всегда больше расстояния от точки подвеса до центра тяжести?
15. Как можно определить ускорение свободного падения при исследовании малых колебаний оборотного маятника?

## Литература

1. Талызина Н.Ф. Управление процессом освоения знаний. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.
2. Талызина Н.Ф. Теория планомерного формирования умственных действий сегодня //Вопр. психологии. 1993. №1.
3. Гальперин П.Я. Психология мышления и учение о поэтапном формировании умственных действий. М.: Наука, 1996.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. М.: Наука, 1978.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1980.
6. Лабораторный практикум по физике /Под ред. А.С. Ахматова. М.: Высш. шк., 1980.