

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Н. А. Гладков, Ю. А. Струков, А. С. Чуев

Баллистический маятник

*Методические указания к выполнению
лабораторной работы по курсу общей физики*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2016

УДК 531.5
ББК 22.213
Г52

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/70/book1379.html>

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве методических указаний*

*Рецензент
доцент В. А. Велданов*

Гладков, Н. А.

Г52 Баллистический маятник : методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу общей физики / Н. А. Гладков, Ю. А. Струков, А. С. Чуев. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 12, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4339-0

Изложены основные теоретические сведения о законах сохранения момента импульса и энергии во вращательном движении. Приведено описание лабораторной установки, даны указания по проведению измерений и обработке их результатов.

Для студентов 2-го курса всех специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 531.5
ББК 22.213

ISBN 978-5-7038-4339-0

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016

Предисловие

Изучение баллистического маятника связано с изучением фундаментальных законов природы: законов сохранения импульса, момента импульса и энергии. Эти законы определяются свойствами симметрии пространства и времени и лежат в основе современных физических представлений о строении мира. Данные законы действуют на всех уровнях природы: в микро-, макро- и мегамире, хотя их проявление на каждом физическом уровне имеет свои особенности. Так, в механике макромира незаметны квантуемость момента импульса (квантом момента импульса является постоянная Планка — очень малая величина) и наблюдаемые в микромире нарушения закона сохранения энергии, происходящие в силу соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Цель данной лабораторной работы — закрепление теоретических знаний в области классической механики по законам сохранения импульса, момента импульса и энергии, приобретение навыка в постановке эксперимента и обработке результатов его проведения.

В процессе данной работы студенты получают практический опыт проведения эксперимента и результаты, подтверждающие теоретические сведения по выполнению в макромире законов классической механики, изучаемых ими на лекционных занятиях и по учебной литературе. В частности, работа нацелена на изучение взаимосвязи момента импульса и момента инерции вращающихся тел.

После успешного выполнения лабораторной работы студенты будут:

- знать принцип работы и конструктивное устройство баллистического маятника с пружинным метателем тел и оптическим измерителем их скорости;
- владеть методикой неконтактного измерения скорости движения метаемых тел;
- уметь получать, формировать и обрабатывать экспериментальные данные с привлечением статистических методов, наглядно представлять результаты и формулировать выводы о работе;
- понимать взаимосвязь различных механических величин, характеризующих поступательное и вращательное движения.

При подготовке к выполнению работы студентам рекомендуется ознакомиться с рекомендуемой литературой, приводимой в конце методических указаний.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Историческое предназначение баллистических маятников состоит в измерении скорости снарядов, пуль и других тел, метаемых с большими скоростями. В конструктивном отношении в зависимости от конкретного предназначения баллистические маятники сильно различаются, однако все они имеют достаточно массивную мишень, что определяет значительный момент инерции подвижной части маятника. Это обстоятельство, в свою очередь, позволяет маятнику оставаться практически неподвижным при внедрении тела в мишень, движение маятника начинается только после окончания внедрения тела в его мишень.

Аналогично работает баллистический гальванометр, который также имеет достаточно большой момент инерции подвижной части, что позволяет ему измерять малые количества заряда при кратковременных импульсах тока.

Итак, процесс внедрения шарика в мишень баллистического маятника можно рассматривать как абсолютно неупругий удар.

На рис. 1 представлена упрощенная схема баллистического маятника, который состоит из жесткого стержня, к нижнему концу которого прикреплена мишень — ловушка метаемого тела. Другой конец стержня закреплен на оси вращения, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости рисунка.

В данной лабораторной работе в качестве метаемого тела используется стальной шарик массой $m = 33$ г и диаметром $d = 20$ мм.

При выстреле шарик движется со скоростью v и попадает в мишень баллистического маятника, в которой застревает. Для механической системы (МС), состоящей из шарика и маятника, должен выполняться закон сохранения момента импульса МС относительно оси вращения маятника (точки O):

$$mvr = J\omega_z, \quad (1)$$

где mvr — момент импульса шарика до момента его внедрения в мишень; $J\omega_z$ — момент импульса МС относительно оси Oz после

внедрения шарика в мишень; J — момент инерции МС относительно той же оси Oz ; ω_z — проекция угловой скорости вращения МС на ось Oz .

Ось Oz , направление которой определяется правилом правого винта, совпадает с осью вращения маятника. При этом

$$J = J_0 + mr^2, \quad (2)$$

где J_0 — момент инерции маятника относительно оси Oz ; mr^2 — момент инерции застрявшего в мишени шарика относительно той же оси.

Дальнейшее движение МС (после внедрения шарика в мишень) происходит в соответствии с уравнением динамики вращательного движения этой МС относительно оси Oz :

$$J \varepsilon_z = -(M + m)gl \sin \alpha, \quad (3)$$

где ε_z — проекция углового ускорения МС на ось Oz ; M — масса баллистического маятника; g — ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; l — расстояние от оси вращения Oz до точки C (центра масс МС); α — угол отклонения маятника от вертикального положения.

Знак минус в уравнении (3) показывает, что движение МС после внедрения шарика в мишень будет замедленным.

Поскольку после окончания внедрения шарика в мишень для описания последующего движения МС диссипативными силами разной природы можно пренебречь, для такой МС должен выполняться закон сохранения механической энергии:

$$\frac{J \omega_z^2}{2} = (M + m)gl(1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

Левая часть уравнения (4) соответствует кинетической энергии МС сразу после окончания внедрения шарика в мишень. Впоследствии эта кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию МС

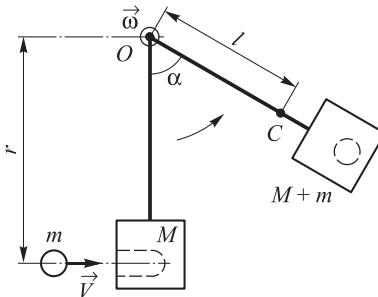


Рис. 1. Схема баллистического маятника

в поле тяжести Земли, чему соответствует правая часть уравнения (4). Здесь α — максимальный угол отклонения маятника.

Если из уравнения (1) выразить угловую скорость

$$\omega_z = \frac{mvr}{J}, \quad (5)$$

а затем равенство (5) подставить в (4), то после соответствующих преобразований можно прийти к зависимости следующего вида:

$$v^2 = \frac{2J(M+m)gl}{m^2r^2}(1-\cos\alpha). \quad (6)$$

Зависимость (6) интересна тем, что если откладывать по оси ординат величину v^2 , а по оси абсцисс — величину $1-\cos\alpha$, то график, соответствующий зависимости (6) в этих координатах, будет иметь вид прямой линии.

Для того чтобы было удобнее работать с таким графиком, приведем формулу (6) к безразмерному виду. С этой целью разделим правую и левую части зависимости (6) на величину v_0^2 , где $v_0 = 1$ м/с. Тогда выражение (6) примет вид

$$\tilde{v}^2 = \frac{2J(M+m)gl}{m^2r^2v_0^2}(1-\cos\alpha), \quad (7)$$

где $\tilde{v} = v/v_0$ — безразмерная скорость.

График зависимости \tilde{v}^2 от $1-\cos\alpha$, соответствующий формуле (7), представлен на рис. 2.

Тангенс угла наклона прямой, изображенной на графике рис. 2, будет равен дробному сомножителю в правой части формулы (7):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2J(M+m)gl}{m^2r^2v_0^2}. \quad (8)$$

Рис. 2. График зависимости безразмерной скорости \tilde{v}^2 от $1-\cos\alpha$

Формула (8) позволяет вычислить момент инерции J на основе других величин, входящих в эту формулу.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 3), содержащая баллистический маятник, состоит из металлической пластины 2, вертикально закрепленной на лабораторном столе с помощью опор 1. К пластине 2 прикреплен баллистический маятник, представляющий собой стержень 5 с мишенью 6 для улавливания выстреливаемого шарика.

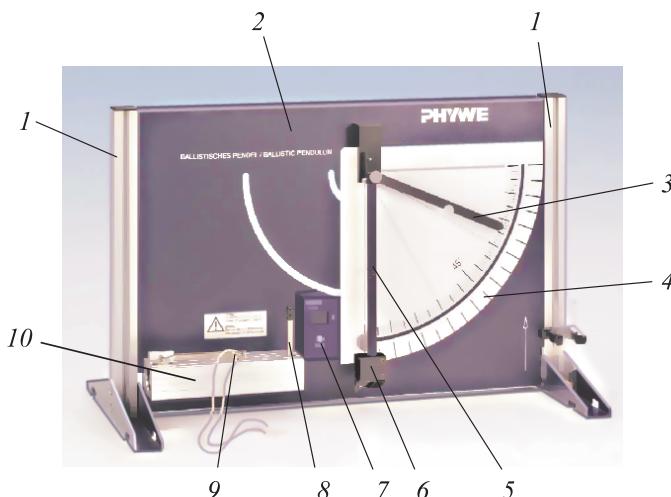


Рис. 3. Устройство экспериментальной установки:
1 — опоры; 2 — металлическая пластина; 3 — подвижная стрелка; 4 — угломерная шкала; 5 — стержень баллистического маятника; 6 — мишень маятника; 7 — цифровой измеритель скорости; 8 — рукоятка взведения; 9 — спусковой рычаг; 10 — пусковое устройство

В мишии сделано специальное отверстие, в которое попадает металлический шарик, вылетающий из пускового устройства 10. Внутри пускового устройства находится пружина со штоком. Взведенное пусковое устройство можно зафиксировать в трех различных положениях с помощью рукоятки 8. Шток снабжен магнитом, который удерживает шарик от перемещения до выстрела. Пусковой механизм приводится в действие с помощью спускового рычага 9. После выстрела шарик совместно со стержнем 5, мише-

нью 6 и стрелкой 3 перемещается в вертикальной плоскости. Максимальное отклонение маятника в вертикальной плоскости от положения равновесия определяется по отклонению от нулевого значения подвижной стрелки 3 на угломерной шкале 4. Для прямого измерения скорости шарика установка имеет цифровой измеритель скорости 7, снабженный двумя фоторегистраторами. Цифровой измеритель скорости 7 крепится к пластине 2.

Метрологические данные приборов, используемых в лабораторной установке, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические данные приборов

№ п/п	Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Абсолютная приборная погрешность
1	Угломерная шкала	0...90°	90	1,0°	$(\Delta\alpha)_{\text{пп}} = 0,5^\circ$
2	Цифровой измеритель скорости	0...10 м/с	—	0,01 м/с	$(\Delta v)_{\text{пп}} = 0,01 \text{ м/с}$

Параметры экспериментальной установки:

$$(m \pm \Delta m) = (33,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$(M \pm \Delta M) = (97,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$(r \pm \Delta r) = (0,250 \pm 0,001) \text{ м};$$

$$(l \pm \Delta l) = (0,160 \pm 0,001) \text{ м.}$$

ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В ходе лабораторной работы осуществляются измерения максимального угла отклонения баллистического маятника и скорости полета шарика.

На рабочем месте студента в лаборатории необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда.

Поскольку «неправильно» вылетающий из пускового устройства шарик может нанести механические травмы и вызвать порчу

лабораторного оборудования, перед каждым выстрелом необходимо убедиться, что шарик прикреплен к центру магнита, а отверстие мишени 6 находится точно напротив отверстия пускового устройства.

Работу следует выполнять в строгом соответствии с изложенным ниже порядком.

1. Включить в сеть цифровой измеритель скорости 7. Цифровое табло должно загореться. Нажать кнопку «Reset» на лицевой панели измерителя, чтобы обнулить его показания.

2. Убедиться, что пружина пускового устройства 10 не сжата. Вставить шарик в отверстие пускового устройства, прикрепив его точно к центру магнита.

3. С помощью рукоятки 8 сжать пружину пускового устройства и зафиксировать ее в первом положении деформированного состояния.

4. Убедиться, что отверстие мишени 6 находится точно напротив отверстия пускового устройства 10, а конец подвижной стрелки 3 указывает на нуль угломерной шкалы.

5. Выполнить выстрел, потянув вверх за спусковой рычаг 9.

6. Зафиксировать угол α максимального отклонения маятника по показаниям подвижной стрелки 3 на шкале 4. Результат измерения записать в табл. 2.

7. По показаниям цифрового измерителя скорости определить скорость v шарика и записать ее в табл. 2.

8. Повторить измерения угла α максимального отклонения маятника и скорости v шарика в соответствии с пп. 2–7 еще 4 раза.

9. С помощью рукоятки 8 сжать пружину пускового устройства 10 и зафиксировать ее во втором положении деформированного состояния.

10. Повторить операции, указанные в пп. 2, 4–7, при втором положении сжатой пружины. Для этого измерения деформированного состояния пружины провести 5 раз. Результаты измерений также занести в табл. 2.

11. С помощью рукоятки 8 сжать пружину и зафиксировать ее в третьем положении деформированного состояния.

12. Повторить операции, указанные в пп. 2, 4–7, при третьем положении деформированного состояния пружины. Измерения провести 5 раз. Результаты измерений также занести в табл. 2.

Таблица 2

**Измерение максимального угла отклонения маятника
и прямые измерения скорости шарика**

№ п/п	Измеряемые и вычисляемые параметры				
	α_i , град	$\Delta\alpha_i$, град	v_i , м/с	Δv_i , м/с	Δv_i^2 , м ² /с ²
<i>Положение I рукоятки</i>					
1					
⋮					
5					
Среднее значение					
<i>Положение II рукоятки</i>					
1					
⋮					
5					
Среднее значение					
<i>Положение III рукоятки</i>					
1					
⋮					
5					
Среднее значение					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Используя данные табл. 2, вычислить средние значения угла отклонения маятника $\langle\alpha\rangle$ и скорости $\langle v \rangle$, абсолютные погрешности отдельных измерений $\Delta\alpha_i$ и Δv_i , средние квадратичные погрешности $\sigma_{\bar{\alpha}}$ и $\sigma_{\bar{v}}$ для трех различных деформированных состояний пружины по формулам

$$\langle\alpha\rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i; \quad \Delta\alpha_i = |\langle\alpha\rangle - \alpha_i|; \quad \sigma_{\bar{\alpha}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \Delta\alpha_i^2}{5(5-1)}};$$

$$\langle v \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i; \quad \Delta v_i = |\langle v \rangle - v_i|; \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \Delta v_i^2}{5(5-1)}}.$$

Результаты расчетов занести в табл. 2.

2. Определить полную абсолютную погрешность угла $\Delta\alpha$ и скорости Δv :

$$\Delta\alpha = t_{P,n} \sigma_{\bar{\alpha}} \pm (\Delta\alpha)_{\text{пп}}; \quad \Delta v = t_{P,n} \sigma_{\bar{v}} \pm (\Delta v)_{\text{пп}}.$$

Абсолютные приборные погрешности $(\Delta\alpha)_{\text{пп}}$ и $(\Delta v)_{\text{пп}}$ взять из табл. 1. Значение коэффициента Стьюдента $t_{P,n}$ для нашего случая принять равным 1,2.

Определить относительные погрешности измерений угла α и скорости v по формулам

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\langle \alpha \rangle}; \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta v}{\langle v \rangle}.$$

3. Разместить экспериментальные результаты табл. 2 в системе координат \tilde{v}^2 от $(1 - \cos \alpha)$ (см. рис. 2), где $\tilde{v} = \frac{v}{v_0} = \frac{v}{1 \text{ м/с}}$.

Данные, полученные для трех начальных деформированных состояний пружины, должны образовать на координатной плоскости 15 экспериментальных точек. От начала координат и через полученное поле экспериментальных данных провести прямую линию так, чтобы число экспериментальных точек слева и справа от проведенной прямой было приблизительно одинаковым.

4. Вычислить по графику значение $\tan \beta$. При вычислении $\tan \beta$ брать наиболее удаленные от начала координат точки прямой.

5. Вычислить момент инерции МС (маятник + шарик) в соответствии с формулой (8):

$$J = \frac{m^2 r^2 v_0^2 \tan \beta}{2(M+m)gl}. \quad (9)$$

Тогда момент инерции маятника согласно (2) будет равен

$$J_0 = J - mr^2. \quad (10)$$

6. Рассчитать момент инерции МС и маятника по формулам (9) и (10).

Строго говоря, в величину J_0 входит, в соответствии с методикой проведения эксперимента, момент инерции стрелки З. Но момент инерции самого маятника с шариком на порядок больше момента инерции стрелки. Поэтому моментом инерции стрелки можно пренебречь.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Форма отчета о лабораторной работе должна соответствовать общепринятым на кафедре физики требованиям. Предварительный отчет, который студент готовит до выполнения лабораторной работы, должен включать: наименование и номер лабораторной работы, краткое изложение цели работы, основные теоретические сведения по теме лабораторной работы, письменный ответ на пять контрольных вопросов методички, выбираемых студентом самостоятельно, схему лабораторной установки с обозначениями и расшифровкой позиций, заготовки таблиц для размещения данных. Окончательный отчет должен включать раздел по обработке экспериментальных данных с выполнением необходимых расчетов, заключение или выводы по работе. Выводы по работе должны отражать достижение поставленных целей и формулируются студентом самостоятельно.

Результаты выполнения заданий приводят в виде таблиц и графиков. Графики следует выполнять на миллиметровой бумаге.

ЭТАПЫ КОНТРОЛЯ И ГРАДАЦИЯ ОЦЕНOK

Контроль успешности выполнения лабораторной работы осуществляется в три этапа:

1) допуск к лабораторной работе, который заключается в проверке преподавателем наличия у студента предварительно подготовленного отчета и демонстрации им знаний теории по теме ла-

бораторной работы и методике ее выполнения; при отсутствии предварительно подготовленного отчета студент к выполнению лабораторной работы не допускается;

2) наблюдение за самостоятельным выполнением студентом лабораторной работы с проверкой правильности записи и разумности значений получаемых результатов;

3) защита студентом выполненной лабораторной работы, которая состоит в проверке качества отчета, достоверности полученных результатов, а также ответах на контрольные и дополнительные вопросы преподавателя по теме лабораторной работы.

Лабораторная работа считается защищенной, если за нее начислен 1 балл и более. Максимальная оценка составляет 3 балла.

Градация оценок за лабораторную работу:

3 — лабораторная работа выполнена в срок и защищена в соответствии с графиком; хорошее качество отчета, полные и правильные ответы на вопросы, задаваемые на защите;

2 — лабораторная работа выполнена в срок, но защищена с нарушением графика, качество отчета удовлетворительное, неполные ответы на вопросы, задаваемые при защите;

1 — лабораторная работа выполнена со значительным нарушением графика без уважительных причин, качество отчета и его содержание неудовлетворительные, неправильные ответы на задаваемые вопросы;

0 — лабораторная работа не выполнена и не защищена.

Защита лабораторной работы проводится в форме устных вопросов и ответов по теме или тестирования. Защита проводится в течение 10 мин, задается не менее трех вопросов. Защита лабораторной работы спустя два месяца с момента ее выполнения не может оцениваться выше одного балла.

Лабораторная работа считается успешно выполненной, если студент ее защитил и получил в сумме не менее двух баллов.

Студенты, допущенные к защите, но не набравшие достаточно-го минимума баллов, могут быть допущены к повторной защите в сроки, установленные кафедрой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое баллистический маятник?
2. Как формулируется закон сохранения импульса?
3. Как формулируется закон сохранения механической энергии?
4. Что называется моментом импульса материальной точки и твердого тела относительно точки и относительно оси вращения?
5. Что называется моментом инерции материальной точки и твердого тела?
6. Какими формулами определяется кинетическая энергия материальной точки и твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси?
7. Какие физические величины в лабораторной работе определяются в результате прямых измерений, а какие в результате косвенных?
8. Как определить приборную погрешность круговой шкалы?
9. Как определить приборную погрешность цифрового измерителя скорости?
10. Перечислите единицы измерения и размерности физических величин, используемых в данной работе, запишите уравнения их связи.

Литература

Иродов И.Е. Механика. Основные законы. 12-е изд. М.: БИНОМ. 2014. 309 с.

Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 1: Механика. М.: АСТ. 2008. 336 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 1: Механика. М.: Физматлит; МФТИ, 2005. 559 с.

Содержание

Предисловие	3
Основные теоретические сведения	4
Описание лабораторной установки	7
Задание и порядок выполнения работы	8
Обработка результатов измерений	10
Требования к отчету о лабораторной работе	12
Этапы контроля и градация оценок	12
Контрольные вопросы	14
Литература	15

Учебное издание

Гладков Николай Алексеевич
Струков Юрий Алексеевич
Чуев Анатолий Степанович

Баллистический маятник

Редактор *С.А. Серебрякова*
Художник *Я.М. Ильина*
Корректор *О.Ю. Соколова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 16.12.2015. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 50 экз. Изд. № 508-2015. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com