

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

Ю. Ц. Батомункуев

ФИЗИКА. МЕХАНИКА

Проверка законов механики на лабораторных установках «Баллистический маятник» и «Маятник Обербека»

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума для обучающихся
по всем направлениям подготовки и специальностям
(уровень бакалавриата, уровень специалитета)

Новосибирск
СГУГиТ
2022

УДК 53

Б284

Рецензенты: кандидат физико-математических наук, доцент, СибГУТИ
А. Г. Черевко

кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *В. С. Корнеев*

Батомункуев, Ю. Ц.

Б284 Физика. Механика. Проверка законов механики на лабораторных установках «Баллистический маятник» и «Маятник Обербека» : практикум / Ю. Ц. Батомункуев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 43 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907513-67-9

Практикум подготовлен доцентом, кандидатом технических наук Ю. Ц. Батомункуевым на кафедре физики СГУГиТ.

Издание содержит теоретические сведения и методику выполнения лабораторных работ по механике. Определяются требуемые физические величины и проверяются основные законы механики: закон сохранения импульса, закон сохранения механической энергии, закон сохранения момента импульса, второй закон Ньютона, основной закон вращательного движения, теорема о кинетической энергии, теорема Штейнера. Текст каждого задания лабораторной работы содержит: цель задания, подробный порядок выполнения и перечень контрольных вопросов и заданий.

Практикум по дисциплине «Физика» предназначен для обучающихся всех направлений подготовки бакалавров.

Рекомендован к изданию кафедрой физики, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 53

ISBN 978-5-907513-67-9

© СГУГиТ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Общие теоретические сведения	5
Лабораторная работа № 1. Баллистический маятник	17
Задание 1.1 Определение скорости пули на лабораторной установке «Баллистический маятник».....	17
Задание 1.2. Проверка закона сохранения импульса на лабораторной установке «Баллистический маятник»	19
Задание 1.3. Проверка закона сохранения механической энергии на лабораторной установке «Баллистический маятник»	21
Задание 1.4. Проверка закона сохранения момента импульса на лабораторной установке «Баллистический маятник»	24
Задание 1.5. Определение коэффициента жесткости пружины на лабораторной установке «Баллистический маятник»	26
Лабораторная работа № 2. Маятник Обербека.....	29
Задание 2.1. Проверка основного закона вращательного движения на лабораторной установке «Маятник Обербека»	29
Задание 2.2. Проверка теоремы о кинетической энергии на лабораторной установке «Маятник Обербека»	32
Задание 2.3. Проверка второго закона Ньютона на лабораторной установке «Маятник Обербека».....	34
Задание 2.4. Определение момента инерции маятника Обербека	36
Задание 2.5. Проверка теоремы Штейнера на лабораторной установке «Маятник Обербека»	39
Библиографический список.....	42

ВВЕДЕНИЕ

В практикум включены лабораторные работы по механике, которые входят в учебную программу курса физики всех направлений подготовки бакалавров в Сибирском государственном университете геосистем и технологий и выполняются на лабораторных установках «Баллистический маятник» и «Маятник Обербека». Описание каждого задания лабораторных работ содержит: цель задания, подробный порядок выполнения и перечень контрольных вопросов. В практикуме излагаются теории лабораторных установок «Баллистический маятник» и «Маятник Обербека», в которых приведены аналитические выражения, позволяющие количественно описать и объяснить механические явления в этих установках. В каждом задании лабораторных работ проводятся измерения и вычисления величин, характеризующих данные лабораторные установки, а также проверяются основные законы механики. Во всех заданиях лабораторных работ определяются погрешности измерений и среднеквадратичные погрешности полученных результатов измерений и вычислений.

ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Теория баллистического маятника

Распространенной лабораторной установкой для изучения и проверки законов механики [1, 2] является баллистический маятник с голографическим элементом (ГЭ), схема которого представлена на рис. 1.1.

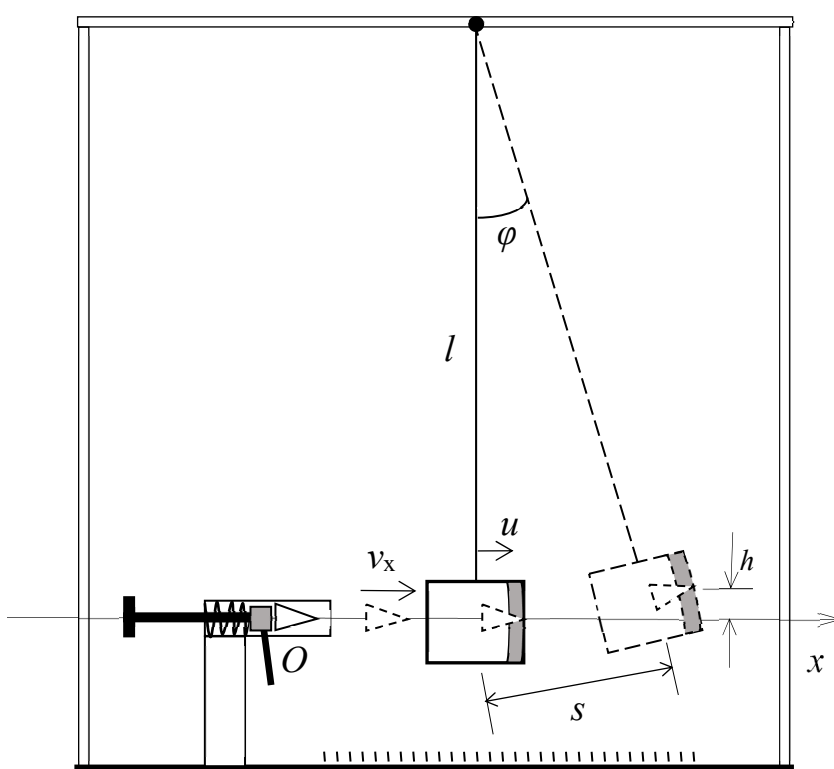


Рис. 1.1. Баллистический маятник

Баллистический маятник включает в себя цилиндр (металлический цилиндрический стакан), подвешенный в горизонтальном положении к раме, закрепленной на основании, стреляющее пулей устройство и линейку, также закрепленные на этом же основании [3]. Пуля представляет собой маленький сплошной металлический цилиндр с острием на конце. На дно цилиндрического стакана нанесен толстый слой пластилина. Ось ствола

стреляющего устройства и цилиндра устанавливаются при помощи ГЭ вдоль оси Ox . Линейка расположена на основании параллельно оси Ox .

Стреляющее устройство имеет ствол, затвор с бойком, затворную пружину, курок. Стреляющее устройство находится на стойке, закрепленной к основанию. Перед выстрелом затвор с бойком отводится назад, при этом затворная пружина максимально сжимается. Пуля в стволе устанавливается вплотную к бойку. При нажатии на курок затворная пружина начинает резко разжиматься и толкать боек. Боек вместе с пулей начинают ускоренно двигаться в стволе стреляющего устройства. При этом потенциальная энергия пружины переходит в кинетическую энергию бойка и пули, а также в работу против силы трения скольжения пули. Из теоремы о кинетической энергии следует, что изменение кинетической энергии пули с бойком равно сумме работ силы упругости пружины и силы трения скольжения пули и бойка. Если пренебречь этой работой силы трения скольжения, то при распрямлении пружины получаем, что потенциальная энергия W_p пружины

$$W_p = \frac{kx^2}{2}$$

переходит в суммарную кинетическую энергию W_k пули и бойка

$$W_k = \frac{(m + m_b)v_x^2}{2},$$

где k – коэффициент жесткости пружины; x – величина сжатия пружины; m , m_b – массы пули и бойка; v_x – скорость пули при вылете из ствола.

Скорость пули v_x будет равна

$$v_x = \sqrt{\frac{k}{m + m_b}}x_m, \quad (1.1)$$

где x_m – максимальная величина сжатия пружины.

Зависимость ускорения a_x , скорости v_x и перемещения x пули от времени при движении пули в стволе могут быть получены из решения второго закона Ньютона

$$a_x = -\Omega^2 x, \quad (1.2)$$

где величина Ω равна

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m + m_b}}.$$

Так, получаем, что ускорение a_x пули в стволе зависит от времени t как $a_x = x_m \Omega^2 \cos(\Omega t)$, скорость $v_x - v_x = x_m \Omega \sin(\Omega t)$, перемещение $x - x = -x_m \cos(\Omega t)$.

Соответствие формул для ускорения a_x и перемещения x второму закону Ньютона (1.2) проверяется просто их подстановкой.

Если пренебречь влиянием воздуха и считать, что при движении пули в воздухе на нее действует только сила тяжести, то у пули имеется ускорение a_y , направленное вниз и равное ускорению свободного падения g . Соответствующая этому ускорению a_y составляющая скорости v_y направлена вниз и равна

$$v_y = -gt,$$

где t – время движения пули в воздухе.

Модуль скорости v пули при $v_y \ll v_x$ в воздухе равен

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \approx v_x \left(1 + \frac{g^2 t^2}{2v_x^2} \right),$$

а перемещение s

$$s \approx v_x t \left(1 + \frac{g^2 t^2}{8v_x^2} \right).$$

При попадании в цилиндр маятника пуля вместе с цилиндром испытывают неупругий удар, и цилиндр с застрявшей пулей отклоняется от верти-

кального положения равновесия. При этом цилиндр вместе с пулей перемещается на величину s , поднимаясь на высоту h , равную (см. рис. 1.1)

$$h = \frac{s^2}{2l},$$

где l – длина подвеса.

Скорость v_x пули до удара в цилиндр может быть определена из закона сохранения импульса $mv_x = (m + M)u$, где M – масса цилиндра, и равна

$$v_x = \left(1 + \frac{M}{m}\right)u,$$

где u – начальная скорость цилиндра, направленная вдоль оси Ox .

Начальная скорость цилиндра u может быть найдена из закона сохранения механической энергии

$$\frac{(m + M)u^2}{2} = (m + M)gh$$

и равна

$$u = s_m \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где s_m – максимальное перемещение цилиндра маятника.

Получаем, что скорость v_x пули до удара связана с величиной максимального перемещения s_m цилиндра соотношением

$$v_x = \left(1 + \frac{M}{m}\right)s_m \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Сравнивая это выражение с формулой (1.1) скорости пули после вылета из ствола, определяем, что масса m пули и максимальное перемещение s_m цилиндра маятника (при массе M цилиндра маятника много большей массы m пули) связаны соотношением

$$mx_m \sqrt{\frac{k}{m + m_b}} = Ms_m \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Из закона сохранения импульса следует, что в момент удара пули в цилиндр выполняется закон сохранения момента импульса, а именно момент импульса L_o системы «пуля – цилиндр маятника» до удара равен $L_o = mvl$ и равен моменту импульса L после удара $L = (m + M)ul$.

Изменение кинетической энергии системы «пуля – цилиндр маятника» при ударе равно в основном работе деформации пластилина A_d , равной из теоремы о кинетической энергии

$$A_d = \frac{mv_x^2}{2} - \frac{(m + M)u^2}{2}.$$

Зная величину перемещения s_d пули внутри пластилина можно найти среднюю силу торможения F_a пули в пластилине

$$F_a = \frac{A_d}{s_d},$$

среднее ускорение a_a из второго закона Ньютона

$$a_a = \frac{F_a}{m}$$

и время t движения пули в пластилине

$$t = \frac{m(v_x - u)}{F_a}.$$

Сразу после удара можно считать, что цилиндр маятника перемещается по прямой, с ускорением a , которое может быть найдено из второго закона Ньютона как

$$a = \frac{F}{m + M} = -\frac{gs}{l} = -\frac{gut}{l}, \quad (1.3)$$

где сила F равна

$$F = -\frac{(m+M)gs}{l}$$

и направлена против скорости u . При этом скорость цилиндра v будет равна

$$v = u - \frac{gut^2}{2l} = u \left(1 - \frac{gt^2}{2l} \right), \quad (1.4)$$

а перемещение s

$$s = ut - \frac{gut^3}{6l} = ut \left(1 - \frac{gt^2}{6l} \right), \quad (1.5)$$

где t – время движения цилиндра маятника.

Эти формулы применимы при времени t много меньшем времени максимального перемещения s_m цилиндра. Более точные формулы, устанавливающие зависимости ускорения a , скорости v и перемещения s пули от времени t (вместе с цилиндром), могут быть получены из решения второго закона Ньютона

$$a = -\frac{g}{l}s,$$

а именно: ускорение a

$$a = -\frac{gs_m}{l} \sin \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t \right), \quad (1.6)$$

скорость v

$$v = \sqrt{\frac{g}{l}} s_m \cos \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t \right), \quad (1.7)$$

перемещение s

$$s = s_m \sin \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t \right). \quad (1.8)$$

При времени t , стремящемся к нулю, формулы (1.6)–(1.8) переходят в полученные выше формулы (1.3)–(1.5).

Формулы (1.6)–(1.8) позволяют в любой момент времени определить требуемые механические величины как для отклоняющегося цилиндра, так и для пули, находящейся внутри этого цилиндра, в том числе угол поворота

$$\varphi = \frac{s}{l}$$

(при этом длина дуги кривой траектории считается равной длине перемещения s), угловую скорость

$$\omega = \frac{v}{l}$$

и угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{a}{l}.$$

Так, импульс p пули равен

$$p = mu \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right),$$

кинетическая энергия W_k равна

$$W_k = \frac{mu^2 \cos^2\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right)}{2},$$

работа A равна

$$A = -\frac{mu^2 \sin^2\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right)}{2}.$$

Таким образом, применение законов механики позволяет описать и объяснить движение пули и цилиндра маятника в лабораторной установке «Баллистический маятник».

Теория маятника Обербека

Во всех лабораторных практикумах университетских курсов физики учебной установкой, на которой проводится изучение и проверка законов механики, является маятник Обербека, схема которого представлена на рис. 1.2.

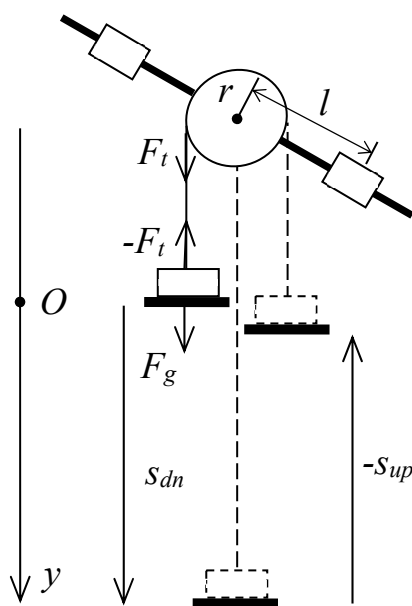


Рис. 1.2. Маятник Обербека

Маятник включает в себя шкив на валу с горизонтальной осью вращения, два (или четыре) стержня с цилиндрическими грузиками (по одному на каждом стержне) и подставку, подвешенную на нити к шкиву [3, 4]. На подставку устанавливаются плоские гири с разной массой, суммарная масса подставки и гирь равна m . Стержни радиально симметрично закреплены с противоположных сторон шкива. На стержнях цилиндрические грузики установлены на одинаковых расстояниях l от оси вращения до центров грузиков и имеют одинаковые массы m_w . Если подвешенную подставку с гирей поднять на некоторую высоту, наматывая при этом нить на шкив, то при опускании подставки маятник (а именно – вал, шкив и стержни с цилиндрическими грузами) начнет вращаться с угловым ускорением ε

$$\varepsilon = \frac{M - M_f}{I},$$

где M – вращающий момент сил; M_f – момент сил трения вала; I – момент инерции маятника (вращающейся части маятника).

При этом угловая скорость ω_1 вращения маятника равна

$$\omega_1 = \varepsilon t_1,$$

а угол поворота φ_1 равен

$$\varphi_1 = \frac{\varepsilon t_1^2}{2},$$

где t_1 – время опускания. Вращающий момент M создается силой натяжения F_t нити, разматывающейся со шкива, и равен

$$M = rF_t,$$

где r – радиус шкива. Момент инерции маятника

$$I = I_o + Nm_w l^2,$$

где N – количество грузиков на стержнях маятника; I_o – момент инерции маятника при предполагаемом расположении этих грузиков на оси вращения.

За положительное направление векторных величин, характеризующих вращение маятника, принято вращение против часовой стрелки.

На подставку (с гирями) действуют две силы: сила натяжения F_t нити, направленная вверх, и сила тяжести $F_g = mg$, направленная вниз (g – ускорение свободного падения). При силе тяжести F_g большей по модулю силы натяжения нити F_t подставка с гирей опускается с ускорением a , равным из второго закона Ньютона

$$a = \frac{F_g - F_t}{m}.$$

За положительное направление векторов прямолинейного движения принято направление вниз (ось Oy направлена вниз). Время опускания t_1 подставки равно

$$t_1 = \sqrt{\frac{2s_1}{a}},$$

где s_1 – перемещение подставки с гирей с верхнего до нижнего положения.

Скорость v_1 подставки при этом равна

$$v_1 = at_1.$$

Кинетическая энергия W_k подставки с гирей

$$W_k = \frac{mv_1^2}{2}.$$

По теореме о кинетической энергии изменение кинетической энергии ΔW_k маятника

$$\Delta W_k = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{I\omega_1^2}{2}$$

равно сумме работы A_g силы тяжести

$$A_g = mgs_1$$

и работы A_f момента сил трения M_f

$$A_f = -\frac{M_f s_1}{r}.$$

Из этой теоремы момент инерции I маятника равен

$$I = mr^2 \left(\frac{A_g}{W_k} - \frac{A_f}{W_k} - 1 \right).$$

Если работой A_f момента сил трения можно пренебречь, то движение маятника происходит в соответствии с законом сохранения механической энергии

$$\frac{mv_1^2}{2} + \frac{I\omega_1^2}{2} - mgs_1 = \text{const}$$

и изменение кинетической энергии подставки при опускании равно работе

$$A = (F_g - F_t)s_1.$$

При достижении подставки с гирей нижнего положения (полного разматывания нити) и последующем его равнозамедленном подъеме со скоростью v_2 (в результате наматывания нити на шкив), равном

$$v_2 = -v_1 + at_2,$$

вращение маятника будет происходить равнозамедленно в том же направлении с угловой скоростью

$$\omega_2 = \omega_1 - \varepsilon t_2,$$

где v_1 , ω_1 – соответственно скорость подставки и угловая скорость маятника, когда подставка находится в нижнем положении; t_2 – время подъема подставки вверх.

Перемещение s_2 подставки с гирей вверх при этом равно

$$s_2 = s_1 - v_1 t_2 + \frac{at_2^2}{2},$$

а угол поворота φ_2 маятника

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \omega_1 t_2 - \frac{\varepsilon t_2^2}{2},$$

где φ_1 – угол поворота маятника при опускании подставки с гирей. Вращение маятника прекратится при достижении подставки верхнего положения

(с противоположной стороны шкива, см. рис. 1.2). Для этого момента времени из теоремы о кинетической энергии следует, что работа силы тяжести

$$A_g = mg(s_1 - s_2)$$

равна работе момента сил трения

$$A_f = \frac{M_f(s_1 + s_2)}{r},$$

так как изменение кинетической энергии маятника по сравнению с началом движения равно нулю, поэтому момент сил трения M_f равен

$$M_f = \frac{mgr(s_1 - s_2)}{s_1 + s_2}.$$

Далее до опускания подставки в нижнее положение будет происходить ускоренное вращение маятника в противоположном направлении, которое перейдет в замедленное вращение в том же направлении при последующем подъеме подставки. При повторном достижении подставки верхнего положения маятник завершит первое колебание. Затем движения маятника будут повторяться, при этом подставка с гирей будет совершать перемещение вверх-вниз (для устранения боковых колебаний подставки с гирей из стороны в сторону устанавливается дополнительный маленький блок), а вал, шкив и стержни с цилиндрическими грузиками – вращаться то в одну, то в другую сторону. Из-за наличия момента сил трения эти движения маятника постепенно прекращаются. В момент прекращения движения маятника подставка с гирей установится в самом нижнем положении. Если момент сил трения M_f будет мал, то повторяющиеся движения маятника будут продолжаться довольно долго [4]. Для более точного определения координаты у подставки с гирей в установке может быть использован компактный голографический нивелир.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Приборы и принадлежности: баллистический маятник, набор пуль, измерительная линейка, видеокамера.

Задание 1.1. Определение скорости пули на лабораторной установке «Баллистический маятник»

Цель задания 1.1: определить скорость пули на лабораторной установке «Баллистический маятник».

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Баллистический маятник». Установить цилиндр маятника соосно со стволом стреляющего устройства с помощью ГЭ и зарядить его пулей массой m . Произвести выстрел, после которого цилиндр маятника с застрявшей в нем пулей переместится на величину s , равную

$$s = x - x_0,$$

где x , x_0 – конечная и начальная координаты цилиндра маятника, отсчитываемые по линейке.

Измерить величины координат x , x_0 и перемещения s . Для более точного определения координат x , x_0 и скорости пули необходимо записать на видео полет пули и отклонение цилиндра (с пулей) маятника. Повторить измерения еще 3–4 раза с той же пулей. С помощью видеокамеры провести запись каждого эксперимента.

2. Для каждого выстрела найти скорость пули v по формуле

$$v = \left(1 + \frac{M}{m}\right) s \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; l – длина подвеса маятника (величина l указана на установке); M – масса цилиндра маятника.

Эта формула является следствием законов сохранения импульса и механической энергии в системе «пуля – цилиндр маятника». Определить среднюю скорость v_a и среднеквадратичную погрешность Δv_a (доверительный интервал) скорости пули.

3. После каждого выстрела найти скорость v_e пули по формуле

$$v_e = \frac{s_e}{t},$$

где s_e – перемещение пули за время t на участке полета пули до удара с цилиндром маятника.

Время t обратно пропорционально частоте кадров в секунду видео записи полета пули. Найти среднее значение скорости $v_{e,a}$ и среднеквадратичную погрешность $\Delta v_{e,a}$ (доверительный интервал). Сравнить значения скоростей пули v и v_e .

Результаты измерений и вычислений представить в табл. 2.1. Сформулировать вывод.

Таблица 2.1

n	M , кг	m , кг	x_0 , м	x , м	s , м	u , м/с	v , м/с	v_a , м/с	Δv_a , м/с	s_e , м	t , с	v_e , м/с	$v_{e,a}$, м/с	$\Delta v_{e,a}$, м/с
1														
2														
3														
4														

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цель и порядок выполнения задания 1.1.
2. Указать, в какие моменты времени и какими законами механики можно пользоваться для объяснения движения пули.
3. Определить механические величины, характеризующие полет пули после вылета из стреляющего устройства до удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

4. Определить механические величины, характеризующие движение пули после удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

Задание 1.2. Проверка закона сохранения импульса на лабораторной установке «Баллистический маятник»

Цели задания 1.2:

- 1) проверить закон сохранения импульса;
- 2) определить зависимость скорости пули от ее массы.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой «Баллистический маятник». Установить цилиндр маятника с массой M в неподвижное положение и зарядить стреляющее устройство пулей с массой m . Произвести выстрел, после которого цилиндр маятника с застрявшей в нем пулей переместится на величину

$$s = x - x_0,$$

где x , x_0 – конечная и начальная координаты цилиндра маятника, отсчитываемые по линейке. Измерить величины координат x , x_0 и перемещения s . Для более точного определения координат x , x_0 , перемещения s необходимо записать на видео полет пули и отклонение цилиндра (с пулей) маятника. Повторить измерения еще 4–5 раз с пулями разной массы (с помощью видеокамеры провести запись каждого эксперимента).

После каждого выстрела определить начальную скорость u цилиндра маятника по формуле

$$u = s\sqrt{\frac{g}{l}},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, l – длина подвеса маятника (величина l указана на установке). Найти импульс p цилиндра маятника

$$p = (m + M)u.$$

2. Определить скорости v_e пули по формуле

$$v_e = \frac{s_e}{t},$$

где s_e – перемещение пули за время t на участке полета пули до удара с цилиндром маятника. Величины s_e и t измерить по видео записи полета пули. Время t обратно пропорционально частоте кадров видео в секунду. Найти импульс p_o системы «пуля – цилиндр маятника» перед ударом пули с цилиндром

$$p_o = mv_e.$$

Для проверки закона сохранения импульса построить график зависимости величин импульсов p и p_o (рис. 2.1).

3. Скорости пули v определить из закона сохранения импульса

$$v = \frac{p}{m}.$$

Построить графики зависимости скоростей пули v и v_e от их масс m .

Результаты измерений и вычислений представить в табл. 2.2. Сформулировать вывод.

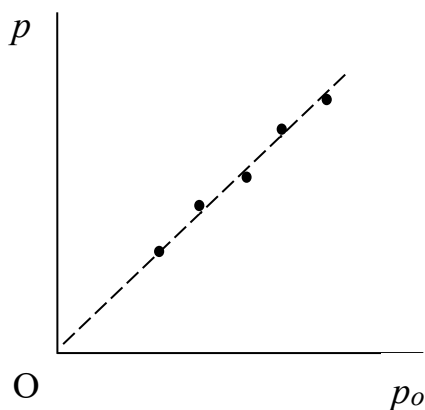


Рис. 2.1. Проверка закона сохранения импульса

Таблица 2.2

n	M , кг	m , кг	x_0 , м	x , м	s , м	u , м/с	p , кг·м/с	s_e , м	t , с	v_e , м/с	p_0 , кг·м/с	v , м/с
1												
2												
3												
4												
5												

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цели и порядок выполнения задания 1.2.
2. Указать, в какие моменты времени и какими законами механики можно пользоваться для объяснения движения пули.
3. Определить механические величины, характеризующие полет пули после вылета из стреляющего устройства до удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).
4. Определить механические величины, характеризующие движение пули после удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

Задание 1.3. Проверка закона сохранения механической энергии на лабораторной установке «Баллистический маятник»

Цели задания 1.3:

- 1) проверить закон сохранения механической энергии;
- 2) определить начальную скорость цилиндра маятника на лабораторной установке «Баллистический маятник».

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Баллистический маятник». Установить цилиндр маятника с массой M в неподвижное положение и зарядить стреляющее устройство пулей с массой m . Произвести выстрел, после которого цилиндр маятника вместе с застрявшей в нем пулей переместится на величину

$$s = x - x_0,$$

где x , x_0 – конечная и начальная координаты цилиндра маятника, отсчитываемые по линейке.

Для более точного определения координат x , x_0 , перемещения s необходимо провести с помощью видеокамеры запись каждого смещения цилиндра маятника.

2. Определить максимальное перемещение s_m цилиндра маятника. По кадрам видео записи для не менее 5 положений цилиндра маятника определить его перемещение s , время t этого перемещения и скорость v , равную

$$v(t) = s_m \sqrt{\frac{g}{l}} \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right),$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; l – длина подвеса маятника (величина l указана на установке).

Найти кинетическую энергию

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

и потенциальную энергию

$$W_p = \frac{mgs^2}{l}$$

цилиндра маятника в каждый момент времени t . Для проверки закона сохранения механической энергии построить график зависимости величины кинетической энергии W_k от потенциальной энергии W_p (рис. 2.2). Из графика определить начальную кинетическую энергию цилиндра W_o . Найти начальную скорость цилиндра маятника v_o , равную

$$v_o = \sqrt{\frac{2W_o}{m}},$$

сравнить с вычисленной начальной скоростью $v = v(t)$ при $t = 0$ с.

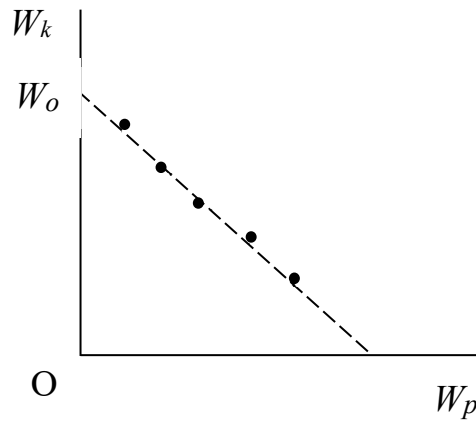


Рис. 2.2. Проверка закона сохранения механической энергии

Результаты измерений и вычислений представить в табл. 2.3. Сформулировать вывод.

Таблица 2.3

n	M , кг	m , кг	x_0 , м	x , м	s , м	t , с	v , м/с	W_k , Дж	W_p , Дж	W_0 , Дж	v_0 , м/с
1											
2											
3											
4											
5											

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цели и порядок выполнения задания 1.3.
2. Указать, в какие моменты времени и какими законами механики можно пользоваться для объяснения движения пули.
3. Определить механические величины, характеризующие полет пули после вылета из стреляющего устройства до удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).
4. Определить механические величины, характеризующие движение пули после удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

Задание 1.4. Проверка закона сохранения момента импульса на лабораторной установке «Баллистический маятник»

Цели задания 1.4:

- 1) проверить закон сохранения момента импульса;
- 2) определить скорость пули на лабораторной установке «Баллистический маятник».

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Баллистический маятник». Установить цилиндр маятника с массой M в неподвижное положение и зарядить стреляющее устройство пулей с массой m . Произвести выстрел, после которого цилиндр маятника с застрявшей в нем пулей переместится на величину s , равную

$$s = x - x_0,$$

где x , x_0 – конечная и начальная координаты цилиндра маятника, отсчитываемые по линейке.

Измерить величины координат x , x_0 и перемещения s . Для более точного определения координат x , x_0 , перемещения s необходимо выполнить запись на видеокамеру полет пули и отклонение цилиндра маятника после попадания пули. Повторить измерения еще 4–5 раз с пулями разной массы.

2. После каждого выстрела найти начальную угловую скорость ω цилиндра маятника по формуле

$$\omega = s \sqrt{\frac{g}{l^3}},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; l – длина подвеса маятника (величина l указана на установке).

Определить момент импульса L цилиндра маятника

$$L = I\omega,$$

где I – момент инерции цилиндра маятника вместе с пулей, равный

$$I = (m + M)l^2.$$

3. Найти скорость v_e пули по формуле

$$v_e = \frac{s_e}{t},$$

где s_e – перемещение пули за время t на участке полета пули до удара с цилиндром маятника.

Величины s_e и t измерить по видео записи полета пули. Определить момент импульса L_o системы «пуля – цилиндр маятника» перед ударом пули с цилиндром, равный

$$L_o = mv_e l.$$

Для проверки закона сохранения момента импульса построить график зависимости величин L и L_o (рис. 2.3).

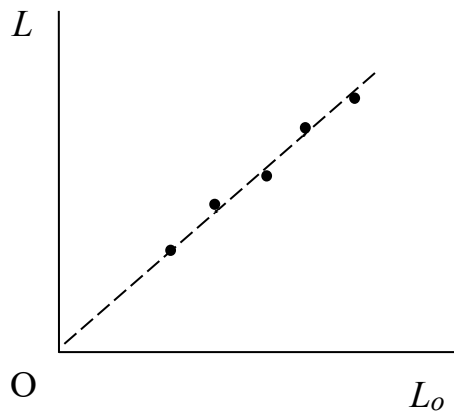


Рис. 2.3. Проверка закона сохранения момента импульса

4. Скорости пули v определить из закона сохранения момента импульса

$$v = \frac{L}{ml}.$$

Сравнить значения скоростей пули v и v_e .

Результаты измерений и вычислений представить в табл. 2.4. Сформулировать вывод.

Таблица 2.4

n	M , кг	m , кг	x_0 , м	x , м	s , м	ω , рад/с	I , кг·м ²	L , кг·м ² /с	L_0 , кг·м ² /с	s_e , м	t , с	v_e , м/с	v , м/с
1													
2													
3													
4													
5													

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цели и порядок выполнения задания 1.4.
2. Указать, в какие моменты времени и какими законами механики можно пользоваться для объяснения движения пули.
3. Определить механические величины, характеризующие полет пули после вылета из стреляющего устройства до удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).
4. Определить механические величины, характеризующие движение пули после удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

Задание 1.5. Определение коэффициента жесткости пружины на лабораторной установке «Баллистический маятник»

Цели задания 1.5:

- 1) проверить закон сохранения импульса;
- 2) определить коэффициент жесткости пружины и массу бойка стреляющего устройства баллистического маятника.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Баллистический маятник». Установить цилиндр маятника в неподвижное положение и зарядить стреляющее устройство пулей. Произвести выстрел, после которого цилиндр маятника с застрявшей в нем пулей переместится на величину

$$s = x - x_0,$$

где x , x_0 – конечная и начальная координаты цилиндра маятника, отсчитываемые по линейке. Измерить координаты x , x_0 и перемещение s . Для более точного определения координат x , x_0 , перемещения s необходимо записать на видео перемещение цилиндра маятника после попадания пули. Повторить измерения еще 4–5 раз с пулями разной массы.

2. Из закона сохранения импульса следует, что при массе m пули много меньше массы M цилиндра маятника величина η , равная отношению массы пули к перемещению цилиндра маятника

$$\eta = \frac{m}{s},$$

нелинейно зависит от массы пули m , а именно

$$\eta = \sqrt{c(m + m_b)},$$

где m_b – масса бойка стреляющего устройства; c – коэффициент пропорциональности.

Построить график зависимости величины η^2 от массы пули m (рис. 2.4). Из графика определить коэффициент пропорциональности

$$c = \frac{\Delta\eta^2}{\Delta m},$$

где $\Delta\eta^2$ и Δm – разности величин η^2 и m для двух точек на графике.

Найти коэффициент жесткости k пружины

$$k = \frac{M^2 g}{cl\xi^2},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; l – длина подвеса маятника; ξ – длина сжатия пружины стреляющего устройства (значения l и ξ указаны на установке).

Определить массу бойка

$$m_b = \frac{\eta_o^2}{c},$$

где величина η_o^2 определяется из графика (см. рис. 2.4).

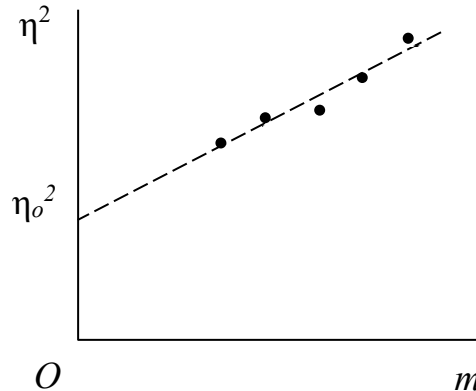


Рис. 2.4. Зависимость величины η^2 от массы пули m

Результаты измерений и вычислений представить в табл. 2.5. Сформулировать вывод.

Таблица 2.5

n	M , кг	m , кг	x_o , м	x , м	s , м	η , кг/м	η^2 , кг ² /м ²	$\Delta\eta^2$, кг ² /м ²	Δm , кг	c , кг·м ²	k , н/м	m_b , кг
1												
2												
3												
4												
5												

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цели и порядок выполнения задания 1.5.
2. Указать, в какие моменты времени и какими законами механики можно пользоваться для объяснения движения пули.
3. Определить механические величины, характеризующие полет пули после вылета из стреляющего устройства до удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).
4. Определить механические величины, характеризующие движение пули после удара в цилиндр маятника (момент времени указывается преподавателем).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МАЯТНИК ОБЕРБЕКА

Приборы и принадлежности: маятник Обербека с вертикальной линейкой, набор плоских гирь, видеокамера, секундомер.

Задание 2.1. Проверка основного закона вращательного движения на лабораторной установке «Маятник Обербека»

Цели задания 2.1:

- 1) проверить основной закон вращательного движения;
- 2) определить момент сил трения и момент инерции маятника Обербека.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Маятник Обербека». Записать в табл. 3.1 значения заданных величин маятника Обербека: массы m гирек вместе с массой подставки (на которую гири укладываются), радиус катушки r , на которую наматывается нить. Вращая маятник Обербека и наматывая нить на катушку, поднять подставку с гирями до верхней начальной координаты y_0 (значение координаты y_0 отсчитывать по низу подставки). Отпустить подставку и измерить время t опускания и соответствующее перемещение подставки

$$s = y - y_0,$$

где y – нижняя координата подставки. Повторить измерения значений t и s с разными гирями (не менее 4–5 измерений). Для более точного измерения величин t и s рекомендуется выполнить на видео запись каждого опускания подставки с гирями.

2. При каждом опускании подставки с гирями определить ускорение a подставки

$$a = \frac{2s}{t^2},$$

силу натяжения F_t нити

$$F_t = m(g - a),$$

где ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, а также угловое ускорение β , равное

$$\beta = \frac{a}{r},$$

и вращающий момент сил M_r маятника Обербека

$$M_r = rF_t.$$

Построить по точкам (β, M_r) график зависимости углового ускорения β от вращающего момента сил M_r . Если точки (β, M_r) располагаются вблизи прямой (рис. 3.1), то прямая пропорциональность между величинами β и M_r , соответствующая основному закону вращательного движения, подтверждается. Точка пересечения этой прямой с осью, на которой отложены значения вращающего момента сил M_r , задает значение момента сил трения M_f .

3. Для каждого значения момента сил M_r определить момент инерции I из основного закона вращательного движения

$$I = \frac{M_r - M_f}{\beta},$$

среднее значение I_a момента инерции и среднеквадратичную погрешность ΔI_a . Среднее значение I_a сравнить с величиной

$$I = \frac{\Delta M_r}{\Delta \beta},$$

где ΔM_r и $\Delta\beta$ – разности значений M_r и β для двух выбранных точек на графике прямой $\beta(M_r)$ (см. рис. 3.1).

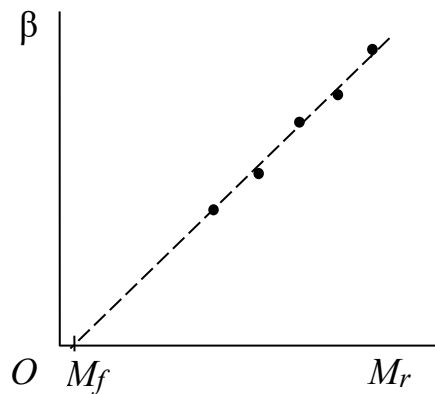


Рис. 3.1. Проверка основного закона вращательного движения

Полученные результаты представить в табл. 3.1 и сформулировать вывод.

Таблица 3.1

n	r , м	m , кг	s , м	t , с	a , м/с ²	F_t , н	β , рад/с ²	M , н·м	M_f , н·м	I , кг·м ²	I_a , кг·м ²	ΔI , кг·м ²	ΔI_a , кг·м ²
1													
2													
3													
4													
5													

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цели и порядок выполнения задания 2.1.
2. Как зависят от массы подвешенных на нити гирек сила натяжения нити, вращающий момент сил маятника Обербека?
3. Определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение подставки с гирей.
4. Зная массу и расстояние от оси вращения грузика, закрепленного на стержне маятника Обербека, определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение этого грузика.

Задание 2.2. Проверка теоремы о кинетической энергии на лабораторной установке «Маятник Обербека»

Цели задания 2.2:

- 1) проверить теорему о кинетической энергии;
- 2) определить работу момента сил трения и момент инерции маятника Обербека.

Порядок выполнения

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой «Маятник Обербека». Записать в таблицу значения заданных величин маятника Обербека: массы m гирек вместе с массой подставки (на которую укладываются гири), радиус катушки r , на которую наматывается нить. Вращая маятник Обербека и наматывая нить на катушку, поднять подставку с гирями до верхней начальной координаты y_0 (значение координаты y_0 отсчитывать по низу подставки). Отпустить подставку и измерить время t опускания и перемещение s подставки

$$s = y - y_0,$$

где y – нижняя координата подставки. Повторить измерения значений t и s с разными гирями (не менее 4–5 измерений). Для более точного определения величин t и s рекомендуется сделать видеозапись каждого опускания подставки с гирями.

2. При каждом опускании подставки с гирями определить в момент времени t ее скорость

$$v = \frac{2s}{t},$$

изменение кинетической энергии

$$\Delta W_k = \frac{mv^2}{2}$$

и работу силы тяжести

$$A = mgs,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

По полученным значениям построить график зависимости изменения кинетической энергии ΔW_k от работы силы тяжести A . Точка пересечения этой прямой с осью, на которой отложены значения работы силы тяжести A , задает значение работы момента сил трения A_f (рис. 3.2).

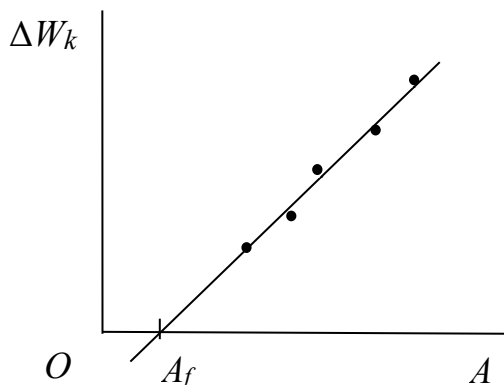


Рис. 3.2. Проверка теоремы о кинетической энергии

3. Для каждого значения работы силы тяжести A определить момент инерции I из теоремы о кинетической энергии

$$I = 2(A - A_f - \Delta W_k) \frac{r^2}{v^2},$$

среднее значение I_a момента инерции и среднеквадратичную погрешность ΔI_a .

Результаты представить в табл. 3.2 и сформулировать вывод.

Таблица 3.2

n	$r, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$s, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$\Delta W_k, \text{ Дж}$	$A, \text{ Дж}$	$A_f, \text{ Дж}$	$I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$I_a, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta I_a, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
1												
2												
3												
4												
5												

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цели и порядок выполнения задания 2.2.
2. Как зависят от массы гирек их кинетическая энергия, работа силы тяжести, кинетическая энергия вращения маятника Обербека?
3. Определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение подставки с гирей.
4. Зная массу и расстояние от оси вращения грузика, закрепленного на стержне маятника Обербека, определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение этого грузика.

Задание 2.3. Проверка второго закона Ньютона на лабораторной установке «Маятник Обербека»

Цели задания 2.3:

- 1) проверить второй закон Ньютона;
- 2) проверить зависимость момента инерции маятника Обербека от координаты грузиков на стержнях.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Маятник Обербека». Записать в табл. 3.3 значения заданных величин маятника Обербека: массу m гирек вместе с массой подставки (на которую укладываются гири), радиус шкива (катушки) r , на которую наматывается нить. Установить и закрепить грузики на стержнях маятника на одинаковых расстояниях (максимально близко) от оси вращения. Измерить координату грузика как расстояние l от оси вращения до центра грузиков. Вращая маятник и наматывая нить на катушку, поднять подставку с гирями до верхней начальной координаты y_0 (значение координаты y_0 отсчитывать по низу подставки). Отпустить подставку и измерить время t опускания и перемещение s подставки

$$s = y - y_0,$$

где y – нижняя координата подставки. Повторить измерения значений l , t и s с теми же гирями (не менее 4–5 измерений) удаляя от оси вращения и закрепляя симметрично грузики на стержнях маятника.

Для более точного определения t и s рекомендуется снять на видео каждое опускание подставки с гирями.

2. Для момента времени опускания t определить скорость

$$v = \frac{2s}{t}$$

и ускорение подставки

$$a = \frac{2s}{t^2},$$

суммарную силу

$$F = \frac{mv^2}{2s},$$

действующую на подставку с гирями. По полученным значениям точек (a , F) построить график зависимости ускорения a от силы F (рис. 3.3).

3. Определить силу натяжения F_t нити

$$F_t = m(g - a),$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, и момент инерции

$$I = \frac{F_t r^2}{a}.$$

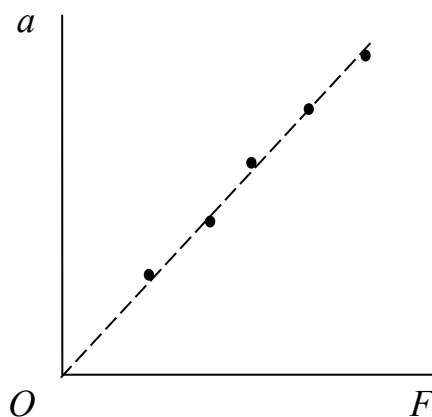


Рис. 3.3. Проверка второго закона Ньютона

По полученным значениям точек (I, l^2) построить график зависимости момента инерции

$$I = I_o + m_w l^2$$

от величины l^2 (m_w – масса всех грузиков; I_o – момент инерции маятника Обербека с грузиками, находящимися на оси вращения маятника).

Результаты представить в табл. 3.3 и сформулировать вывод.

Важно: момент сил трения маятника Обербека должен быть малым, чтобы им можно было пренебречь (то есть пренебречь различием перемещений подставки вниз и вверх).

Таблица 3.3

n	$r, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$l, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$a, \text{ м/с}^2$	$F, \text{ Н}$	$F_f, \text{ Н}$	$I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$l^2, \text{ м}^2$
1											
2											
3											
4											
5											

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цели и порядок выполнения задания 2.3.
2. Как зависит ускорение опускающей подставки с гирей от силы натяжения нити и момента инерции маятника Обербека?
3. Определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение подставки с гирей.
4. Зная массу и расстояние от оси вращения грузика, закрепленного на стержне маятника Обербека, определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение этого грузика.

Задание 2.4. Определение момента инерции маятника Обербека

Цели задания 2.4:

- 1) проверить закон сохранения механической энергии;
- 2) определить момент инерции маятника Обербека.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки «Маятник Обербека». Записать в таблицу значения заданных величин маятника Обербека: массы m гирек вместе с массой подставки (на которую укладываются гири), радиус r катушки, на которую наматывается нить. Вращая маятник Обербека и наматывая нить на катушку, поднять подставку с гирями до верхней начальной координаты y_0 (значение координаты y_0 отсчитывать по низу подставки). Отпустить подставку и измерить время t ее опускания и соответствующее перемещение

$$s = y - y_0,$$

где y – нижняя координата подставки. Повторить измерения значений t и s с разными гирями (не менее 4–5 измерений). Для более точного определения величин t и s рекомендуется записать на видеокамеру каждое опускание подставки с гирями.

2. При каждом опускании подставки определить ее скорость

$$v = \frac{2s}{t},$$

кинетическую энергию

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

и начальную потенциальную энергию

$$W_0 = mgs,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. По полученным значениям построить график зависимости кинетической энергии W_k от начальной потенциальной энергии W_0 (рис. 3.4). Определить момент инерции I из закона сохранения механической энергии как

$$I = mr^2 \left(\frac{W_0}{W_k} - 1 \right),$$

среднее значение I_a момента инерции и среднеквадратичную погрешность ΔI_a .

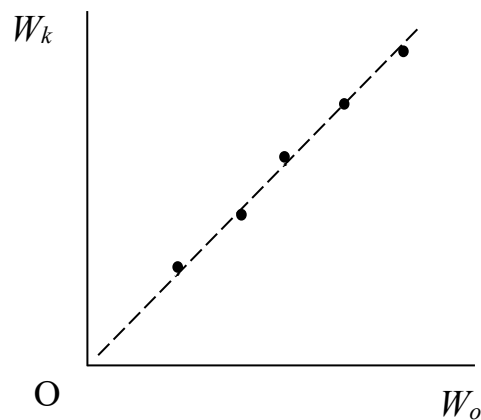


Рис. 3.4. Проверка закона сохранения механической энергии

Полученные результаты представить в табл. 3.4 и сформулировать вывод.

Важно: момент сил трения маятника Обербека должен быть малым, чтобы им можно было пренебречь (то есть пренебречь различием перемещений подставки вниз и вверх).

Таблица 3.4

n	r , м	m , кг	s , м	t , с	v , м/с	W_k , Дж	W_o , Дж	I , кг·м ²	I_a , кг·м ²	ΔI , кг·м ²	ΔI_a , кг·м ²
1											
2											
3											
4											
5											

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цели и порядок выполнения задания 2.4.
2. Как зависят от массы подвешенных на нити гирек кинетическая и потенциальная энергии гирек, кинетическая энергия вращения маятника Обербека?
3. Определите механические величины, характеризующие движение подвешенной на нити гири в заданный момент времени.

4. Зная массу и расстояние от оси вращения грузика, закрепленного на стержне маятника Обербека, определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение этого грузика.

Задание 2.5. Проверка теоремы Штейнера на лабораторной установке «Маятник Обербека»

Цели задания 2.5:

- 1) проверить теорему Штейнера для грузиков, установленных на стержнях маятника Обербека;
- 2) определить момент инерции грузика относительно оси, проходящей через его центр масс.

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой «Маятник Обербека». Записать в табл. 3.5 значения заданных величин маятника Обербека: массу m гири вместе с массой подставки (на которую укладывается гиря), массу m_w грузика, устанавливаемого на стержни маятника, радиус катушки r , на которую наматывается нить. Вращая маятник без грузиков на стержнях и наматывая нить на катушку, поднять подставку до верхней начальной координаты y_0 (значение координаты y_0 отсчитывать по низу подставки). Отпустить подставку и измерить время t опускания, перемещение подставки вниз

$$s_1 = y_1 - y_0$$

и последующее перемещение вверх

$$s_2 = y_1 - y_2,$$

где y_1 , y_2 – соответственно нижняя координата при опускании и верхняя координата при подъеме подставки.

Повторить измерения значений t , s_1 , s_2 с той же гирей на подставке, устанавливая грузики в разных (в не менее 4–5) участках стержней маятника (симметрично относительно оси шкива). Измерить координату гру-

зика как расстояние l от оси вращения до центра грузика. Для более точного определения t , s_1 , s_2 рекомендуется выполнить запись на видеокамеру каждого перемещения подставки с гирей вдоль вертикальной оси Oy .

2. Найти начальную потенциальную энергию подставки с гирей

$$W_p = mgs_1,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Для момента времени t определить скорость

$$v = \frac{2s}{t},$$

кинетическую энергию подставки

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

и работу момента сил трения

$$A_f = \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} W_p.$$

Найти момент инерции I маятника

$$I = 2(W_p - A_f - W_k) \frac{r^2}{v^2}$$

и момент инерции I_w грузика

$$I_w = I - I_o,$$

где I_o – момент инерции маятника без грузика.

3. По полученным значениям точек (I_w, l^2) построить график зависимости момента инерции I_w грузика от величины l^2 (рис. 3.5). По теореме Штейнера определить момент инерции грузика $I_{cm} = I_w - m_w l^2$ относитель-

но оси, проходящей через его центр масс. Найти среднее значение $I_{a.cm}$ и среднеквадратичную погрешность $\Delta I_{a.cm}$.

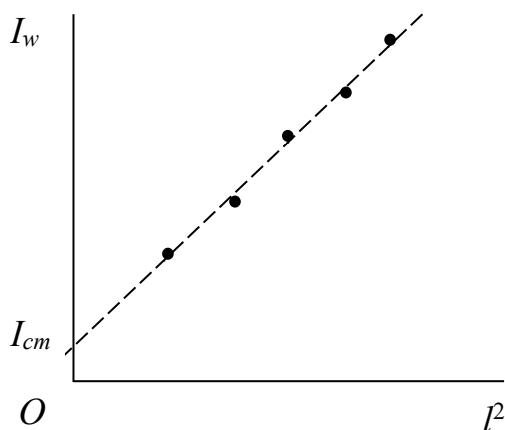


Рис. 3.5. Проверка теоремы Штейнера

Полученные результаты представить в табл. 3.5 и сформулировать вывод.

Таблица 3.5

n	$r, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$m_w, \text{ кг}$	$l, \text{ м}$	$s_1, \text{ м}$	$s_2, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$W, \text{ Дж}$	$W_k, \text{ Дж}$	$A_f, \text{ Дж}$	$I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$I_w, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$l^2, \text{ м}^2$	$I_{cm}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$I_{a.cm}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta I_{a.cm}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цели и порядок выполнения задания 2.5.
2. Определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение подставки с гирей.
3. Зная массу и расстояние от оси вращения грузика, закрепленного на стержне маятника Обербека, определите в заданный момент времени механические величины, характеризующие движение этого грузика.
4. Опишите вращение маятника Обербека в заданный момент времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тюшев А. Н., Вылегжанина В. Д. Курс лекций по физике. Ч. 1. Механика : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 144 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т.1 Механика. Молекулярная физика : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2016. – 436 с.
3. Физика. Механика. Электричество. Магнетизм : сб. описаний лабораторных работ / И. Н. Карманов, В. С. Корнеев, Д. С. Михайлова, Д. М. Никулин, А. С. Сырнева, С. Л. Шергин ; под общ. ред. И. Н. Карманова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 77 с.
4. Батомункуев Ю. Ц., Шергин С. Л. Физика. Избранные главы физики : лабораторный практикум по физике. Ч. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 44 с.

Учебное издание

Батомункуев Юрий Цыдыпович

ФИЗИКА. МЕХАНИКА

**Проверка законов механики на лабораторных установках
«Баллистический маятник» и «Маятник Обербека»**

Редактор *О. В. Георгиевская*

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 24.11.2022. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,49. Тираж 340 экз. Заказ 197.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.