Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО МАЯТНИКА РМ-04

Методические указания к выполнению лабораторной работы 15

Красноярск 2015

УДК 537.2 (075.5)

Рецензент
кандидат физико-математических наук, доцент И. В. Уваев
(Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева)

Печатается по решению методической комиссии ИКТ

Изучение гармонических колебаний с помощью универсального маятника РМ-04 : метод. указания к выполнению лаб. работы 15 / сост. П. П. Машков ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 22 с.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лабораторная работа 15 «Изучение гармонических колебаний с помощью универсального маятника РМ-04» выполняется студентами первого и второго курсов технических направлений подготовки очной и заочной формы обучения после лабораторной работы 1 «Обработка результатов эксперимента» при изучении ими раздела физики «Механические колебания и волны». По содержанию и объему лабораторная работа соответствует программе курса общей физики для высших технических учебных заведений.

В данных методических указаниях приведены краткие теоретические сведения по темам «Гармонические колебания», «Гармонический осциллятор», «Физический и математический маятники», описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы, контрольные вопросы и библиографический список с рекомендуемой для изучения литературой.

Лабораторная работа выполняется в течение двух академических часов. По полученным результатам оформляется отчет установленного образца, приведенный в приложении. Уровень освоения материала по теме определяется в ходе защиты студентами лабораторной работы.

Лабораторная работа 15

ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО МАЯТНИКА РМ-04

Цель работы: изучение колебаний математического и оборотного маятников и измерение ускорение свободного падения.

Оборудование: математический маятник, оборотный маятник, электронный счетчик-секундомер.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Гармоническое колебательное движение

Колебательным движением, или просто *колебанием*, называют всякое движение или изменение состояния, характеризуемое той или иной степенью повторяемости во времени значений физических величин, определяющих это движение или состояние. Колебательные процессы широко распространены в природе и технике, например качание маятника часов, переменный электрический ток и т. д. При колебательном движении маятника изменяется координата его центра масс, в случае переменного тока колеблются напряжение и ток в цепи. Физическая природа колебаний может быть разной, поэтому выделяют колебания механические, электромагнитные и др. Однако различные колебательные процессы имеют одинаковые характеристики и описываются одинаковыми уравнениями. Отсюда следует целесообразность единого подхода к изучению колебаний различной физической природы.

Колебания называются *свободными*, или *собственными*, если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему, т. е. систему, совершающую колебания. Простейшим типом колебаний являются *гармонические колебания* – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Гармонические колебания величины s описываются уравнением вида

$$s = A\cos\left(\omega_0 t + \varphi\right), \tag{1}$$

где A – максимальное значение колеблющейся величины, называемое *амплитудой колебаний*; ω_0 – *круговая (циклическая) частота*; φ – *начальная фаза колебаний* в момент времени $t = 0$; $(\omega_0 t + \varphi)$ – фаза колебаний в момент времени t. Так как косинус изменяется в пределах от + 1 до –1, то s может принимать значения от $+A$ до $–A$.

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через промежуток времени T, называемый *периодом колебания*, за который фаза колебания получает приращение 2π, т. е. совершается одно полное колебание:

$$\omega_0(t+T)+\varphi=\left(\omega_0 t+\varphi\right)+2\pi,$$

откуда

$$T=\frac{2\pi}{\omega_0}. \tag{2}$$

Величина, обратная периоду колебаний,

$$\nu=\frac{1}{T}, \tag{3}$$

т. е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется *частотой колебаний*. Сравнивая (2) и (3), получим $\omega_0 = 2\pi\nu$.

Единицей частоты является герц (Гц): 1 Гц – это частота периодического процесса, при котором за 1 с совершается один цикл процесса (одно полное колебание).

Запишем первую и вторую производные по времени от гармонически колеблющейся величины s – скорость и ускорение соответственно:

$$\frac{ds}{dt}=-A\omega_0\sin\left(\omega_0 t+\varphi\right)=A\omega_0\cos\left(\omega_0 t+\varphi+\frac{\pi}{2}\right), \tag{4}$$

$$\frac{d^2s}{dt^2}=-A\omega_0^2\cos(\omega_0 t+\varphi)=A\omega_0^2\cos(\omega_0 t+\varphi+\pi), \tag{5}$$

т. е. здесь мы имеем гармонические колебания с той же циклической частотой. Амплитуды величин (4) и (5) равны $A\omega_0$ и $A\omega_0^2$ соответственно.

Фаза скорости (4) отличается от фазы величины (1) на $\frac{\pi}{2}$, а фаза ускорения (5) – от фазы величины (1) на π. Следовательно, в момент времени, когда $s = 0$, $\frac{ds}{dt}$ приобретает наибольшие значения, когда же s достигает максимального отрицательного значения, то $\frac{d^2s}{dt^2}$ имеет наибольшее положительное значение (рис. 1).

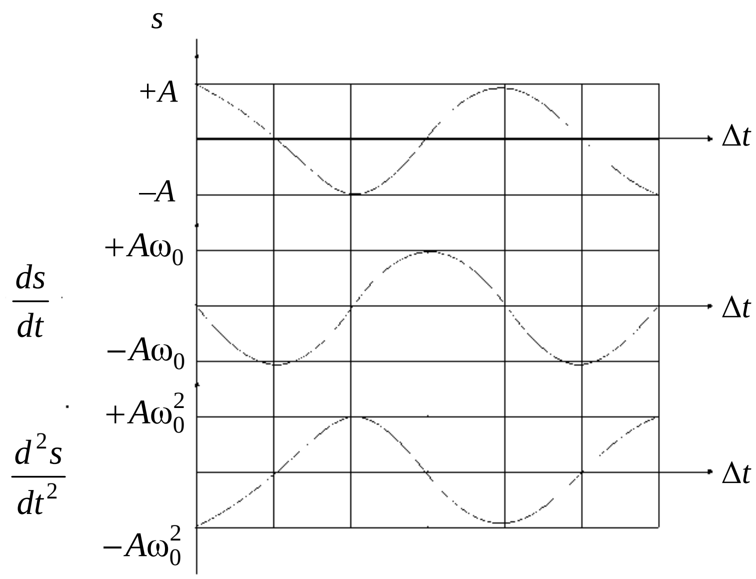


Рис. 1

Из выражения (5) следует дифференциальное уравнение гармонических колебаний

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0, \qquad (6)$$

где учтено, что $s = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$. Решением этого уравнения является выражение (1).

Гармонические колебания изображаются графически методом вращающегося вектора амплитуды, или методом векторных диаграмм. Для этого из произвольной точки O, выбранной на оси x, под углом φ, равным начальной фазе колебаний, откладывается вектор $\vec{A}$, модуль которого равен амплитуде A рассматриваемого колебания (рис. 2). Если этот вектор привести во вращение с угловой скоростью $\vec{\omega}_0$, то проекция конца вектора будет перемещаться по оси x

и принимать значения от $-A$ до $+A$, а колеблющаяся величина будет изменяться со временем по закону

$$s = A\cos\left(\omega_0 t + \varphi\right).$$

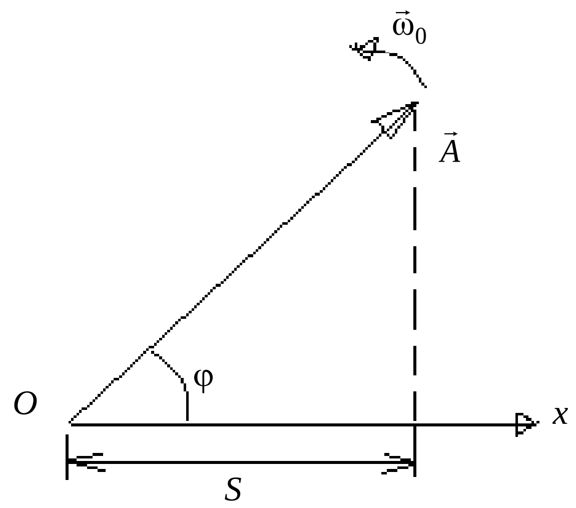


Рис. 2

Таким образом, гармоническое колебание можно представить проекцией на некоторую произвольно выбранную ось вектора амплитуды A, отложенного из произвольной точки оси под углом φ, равным начальной фазе, и вращающегося с угловой скоростью $\vec{\omega}_0$ вокруг этой точки.

Механические гармонические колебания

Пусть материальная точка совершает прямолинейные гармонические колебания вдоль оси координат x около положения равновесия, принятого за начало координат. Тогда зависимость координаты x от времени t задается уравнением, аналогичным уравнению (1), где $s = x$:

$$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi). \qquad (7)$$

Согласно (4) и (5), выражения для скорости v и ускорения a колеблющейся точки примут вид

$$v = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}),$$

$$a = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi) \qquad (8)$$

Сила $F = ma$, действующая на колеблющуюся материальную точку массой m, с учетом (1) и (8) может быть представлена следующим образом:

$$F = -m\omega_0^2 x.$$

Итак, сила пропорциональна смещению материальной точки из положения равновесия и направлена в противоположную сторону, т. е. к положению равновесия. Силы такого вида, независимо от их природы, принято называть *квазиупругими*.

Гармонический осциллятор. Пружинный, физический и математический маятники

Гармоническим осциллятором называется система, совершающая колебания, описываемые уравнением вида (6):

$$\ddot{s} + \omega_0^2 s = 0. \qquad (9)$$

Колебания гармонического осциллятора являются важным примером периодического движения и служат точной или приближенной моделью, используемой во многих задачах классической и квантовой физики. Примерами гармонического осциллятора являются пружинный, физический и математический маятники.

Пружинный маятник – это груз массой m, подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы $F = –kx$, где k – коэффициент упругости, в случае пружины называемый *жесткостью*. Уравнение движения маятника имеет вид

$$m\ddot{x} = -kx,$$

или

$$\ddot{x} + \frac{kx}{m} = 0.$$

Из выражений (9) и (1) следует, что пружинный маятник совершает гармонические колебания по закону $x = A\cos\left(\omega_0 t + \varphi\right)$ с циклической частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{10}$$

и периодом

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,. \tag{11}$$

Формула (11) справедлива для упругих колебаний в пределах, в которых выполняется закон Гука, и когда масса пружины мала по сравнению с массой тела.

Физический маятник – это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси подвеса, не проходящей через центр масс C тела (рис. 3).

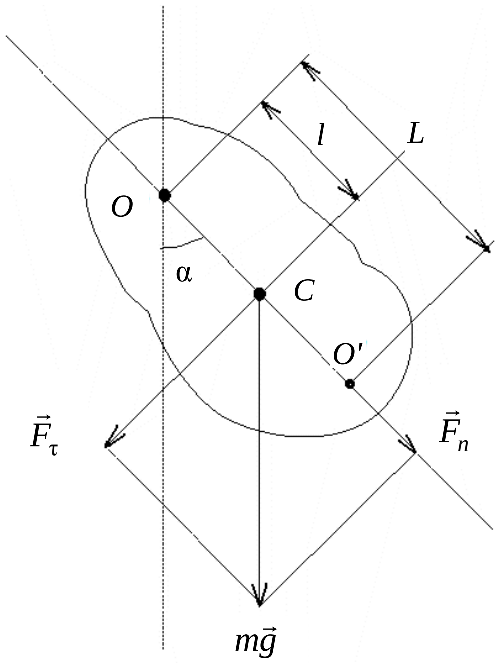


Рис. 3

Если маятник отклонен из положения равновесия на некоторый угол α, то в соответствии с уравнением динамики вращательного движения твердого тела момент M вращающей силы можно записать в виде

$$M = J\varepsilon = J\ddot{\alpha} = Fl = -mgl\sin\alpha \approx -mgl\alpha, \tag{12}$$

где J – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку O; $F = -mg\sin\alpha \approx -mg\alpha$ – возвращающая сила; l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника; $\sin\alpha \approx \alpha$ при малых углах отклонения маятника из положения равновесия. Уравнение (12) можно записать в виде

$$J\ddot{\alpha} + mgl\alpha = 0,$$

или

$$\ddot{\alpha} + \frac{mgl\alpha}{J} = 0.$$

Принимая

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}, \tag{13}$$

получим уравнение $\ddot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = 0$, идентичное (9), решение которого (1) известно:

$$\alpha = \alpha_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi\right). \tag{14}$$

Из выражения (14) следует, что при малых колебаниях физический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой ω_0 и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}, \tag{15}$$

где $L = \dfrac{J}{ml}$ – приведенная длина физического маятника.

Математический маятник – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m, подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

Момент инерции математического маятника

$$J = ml^2, \qquad (16)$$

где l – длина маятника.

Представив математический маятник как частный случай физического маятника в предположении того, что вся его масса сосредоточена в одной точке – центре его масс, и подставив выражение (16) в формулу (15), получим выражение для периода малых колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (17)$$

Сравнение формул (15) и (17) показывает, что если приведенная длина L физического маятника равна длине l математического маятника, то их периоды колебания одинаковы. Таким образом, приведенная длина математического маятника – это длина математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

Для всякого тела, рассматриваемого как физический маятник, можно указать две точки: точку подвеса и центр качания, обладающие свойством взаимозаменяемости. При переносе точки подвеса O в центр качания O' (см. рис. 3) прежняя точка подвеса становится новым центром качания. Следовательно, при переносе точки подвеса в центр качания период малых колебаний при качании вокруг осей, проходящих через эти точки, одинаков, а расстояние между ними равно приведенной длине физического маятника. На этом свойстве физического маятника и основано определение ускорения свободного падения в данной лабораторной работе.

Описание экспериментальной установки

Для измерения ускорения свободного падения предназначена экспериментальная установка РМ-04, общий вид которой приведен на рис. 4. Установка состоит из математического и оборотного маятников.

Оборотный маятник является частным случаем физического маятника. Оборотным будет такой маятник, у которого имеются две параллельные друг другу, закрепленные опорные призмы, за которые он может поочередно подвешиваться.

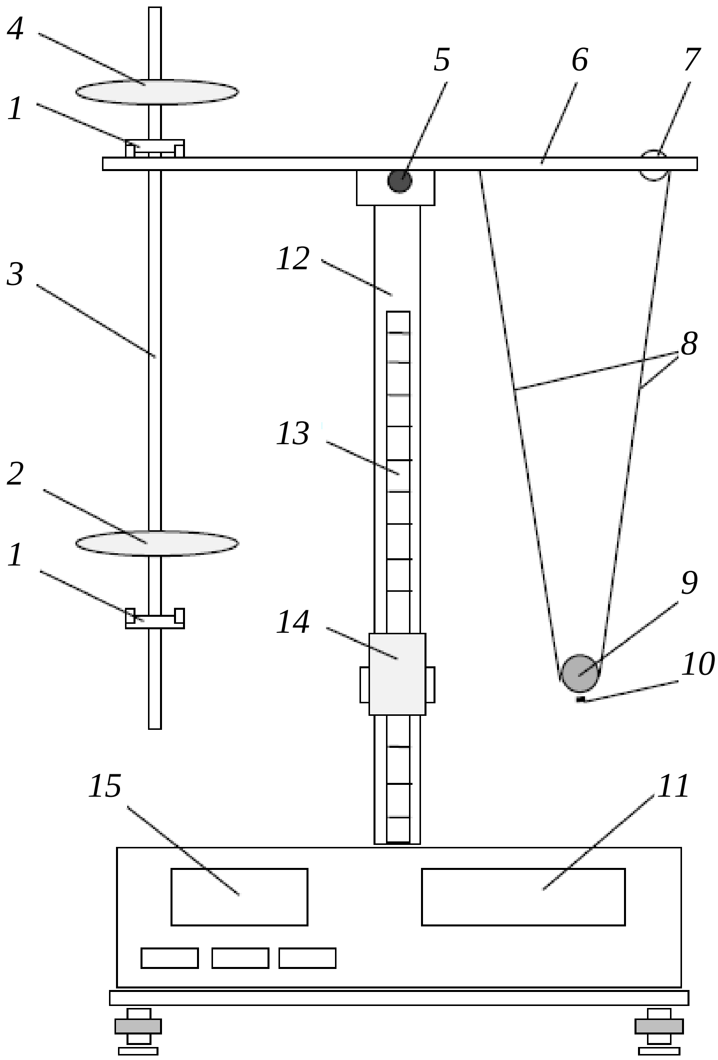


Рис. 4

Вдоль маятника могут перемещаться и закрепляться на нем тяжелые грузы. Перемещением грузов или опорных призм добиваются того, чтобы при подвешивании маятника за любую из призм период колебаний был одинаков. Тогда расстояние между опорными ребрами призм будет равным $L_{пр}$. Измерив период колебаний маятника и зная $L_{пр}$, из формулы

$$T_{об} = 2\pi\sqrt{\frac{L_{пр}}{g}} \tag{18}$$

можно найти ускорение свободного падения g.

Математический маятник представляет собой металлический шарик *9* на бифилярном подвесе *8*. Такой подвес позволяет колебаниям происходить строго в одной плоскости. Длина подвеса может изменяться в пределах 0,1…0,5 м вращением винта *7* и измеряется с помощью линейки *13*, укрепленной на стойке *12*.

Оборотный маятник состоит из металлического стержня *3*, на котором крепятся две способные перемещаться опорные призмы *1*, обращенные ножами навстречу друг другу, и два тяжелых чечевицеобразных груза *2* и *4*, перемещение которых существенно изменяет распределение масс. На стержне через 10 мм выполнены кольцевые нарезки, служащие для точного определения длины оборотного маятника (расстояния между ножами призм).

Установка РМ-04 снабжена фотоэлектрическим датчиком *14*, фиксирующим прохождение маятником положения равновесия. Нижний кронштейн вместе с фотодатчиком можно перемещать вдоль стойки и фиксировать в произвольно избранном положении. Сигнал с датчика подается на миллисекундомер *11* и счетчик числа полных колебаний *15*.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение ускорения свободного падения с помощью оборотного маятника.

Ускорение свободного падения можно выразить из формулы (18):

$$g = \frac{4\pi^2 L_{\text{пр}}}{T^2_{\text{об}}}, \tag{19}$$

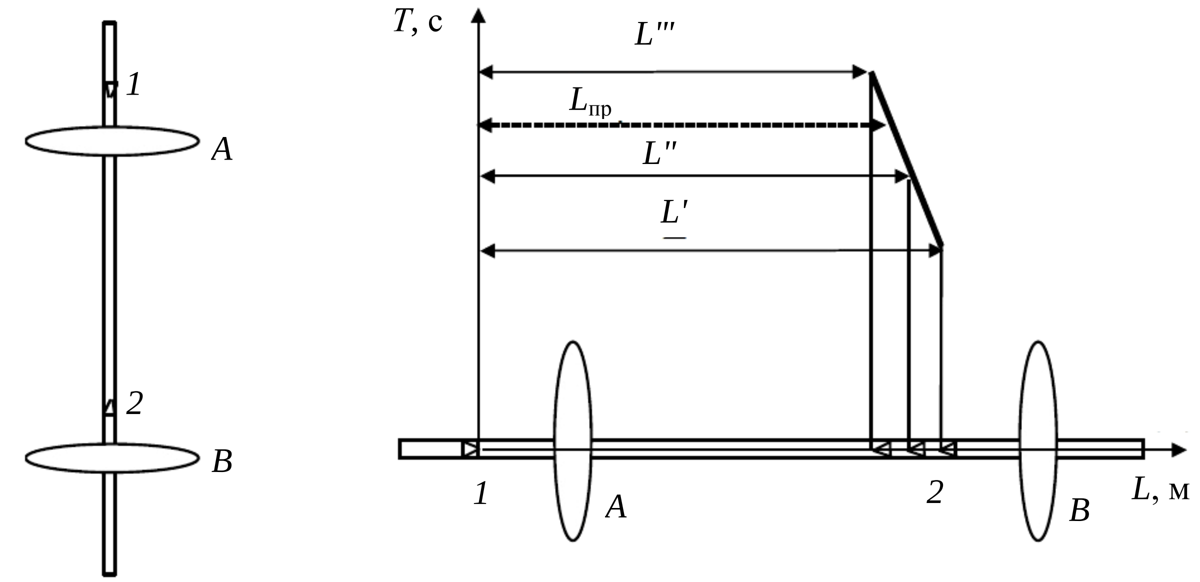
где $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина оборотного маятника, равная расстоянию между призмами, м; $T_{\text{об}}$ – период колебаний оборотного маятника, с,

$$T_{\text{об}} = \frac{t}{n}, \tag{20}$$

здесь t – время колебаний, с; n – количество измеренных полных колебаний.

1. Закрепить грузы (чечевицы) *2* на стержне оборотного маятника несимметрично (см. рис. 4), т. е. таким образом, чтобы одна из них находилась вблизи конца стержня, а другая ближе к его середине. Призмы маятника *1* закрепить по обеим сторонам центра тяжести, чтобы они были обращены друг к другу лезвиями.

Одну из них (призму *1* на рис. 5, *а*) поместить вблизи свободного конца, а вторую (призму *2* на рис. 5, *а*) – между грузами (чечевицами). Проверить, отвечают ли положения граней лезвий призм нарезкам на стержне.



а *б*

Рис. 5

2. Закрепить маятник на верхнем кронштейне на грани призмы *1*, находящейся вблизи конца стержня.

3. Нижний кронштейн вместе с фотоэлектрическим датчиком закрепить так, чтобы стержень маятника пересекал оптическую ось.

4. Отклонить маятник на 5…10° от положения равновесия и отпустить. Нажать клавишу «Сброс», после подсчета измерителем девяти полных колебаний нажать клавишу «Стоп». Секундомер покажет время n = 10 полных колебаний. По формуле (20) определить период колебаний оборотного маятника $T_{об}$. Опыт повторить пять раз. Данные занести в табл. 1.

5. Снять маятник и, не меняя положение грузов, закрепить его на призме *2*. Нижний кронштейн с фотоэлектрическим датчиком переместить так, чтобы маятник пересекал оптическую ось.

6. Отклонить маятник на 5…10° от положения равновесия, измерить период колебания T и сравнить результат с полученной раньше величиной $T_{об}$.

Таблица 1

№ опыта	t, с	$T_{об}$, с	ΔT, с	T'', с	T''', с	L'', м	L''', м
1 2 3 4 5							
		$\bar{T}_{об}$, с				$L_{пр}$, м	

7. Если $T > T_{об}$, то призму *2*, расположенную между грузами, переместить в направлении груза, находящегося в конце стержня, а если $T < T_{об}$, то в направлении середины стержня. Размещения грузов и положение призмы *1* не менять (рис. 5, *б*).

8. Повторно измерить период T и сравнить с величиной $T_{об}$. Перемещая призму *2*, найти два таких положения призмы, когда период колебаний несколько больше и несколько меньше периода $T_{об}$, и измерить эти периоды T'' и T''' с достаточно высокой точностью (10…20 колебаний). Измерить соответствующие расстояния между ножами призм L'' и L''' (см. рис. 5, *б*), подсчитывая количество нарезок на стержне между призмами, которые нанесены через каждые 10 мм. При измерении также можно воспользоваться линейкой. Данные занести в табл. 1.

9. Определить приведенную длину оборотного маятника $L_{пр}$ по формуле

$$L_{пр} = \frac{L'' + L'''}{2}.$$

10. По формуле (19) определить среднее ускорение свободного падения $\bar{g}$:

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2 L_{пр}}{\bar{T}_{об}^2}.$$

11. Рассчитать погрешность g по формулам:

$$\gamma = \frac{\Delta g}{\bar{g}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_{пр}}{L_{пр}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T_{об}}{\bar{T}_{об}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2},$$

$$\Delta g = \gamma \bar{g}.$$

12. Записать окончательный результат в виде $g = (\bar{g} \pm \Delta g)$.

Задание 2. Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

Определение ускорения свободного падения при помощи математического маятника осуществляется с помощью формулы, полученной из (17):

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \tag{21}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; l – длина математического маятника, м; T – период колебаний математического маятника, с.

13. Поворачивая верхний кронштейн, поместить над фотоэлектрическим датчиком математический маятник.

14. Вращая вороток на верхнем кронштейне, установить длину математического маятника, равную приведенной длине оборотного маятника $L_{пр}$, определенной в задании 1. Обратить внимание на то, чтобы черта на шарике была продолжением черты на корпусе фотоэлектрического датчика.

15. Привести математический маятник в движение, отклоняя шарик на 5…10° от положения равновесия.

16. Нажать кнопку «Сброс». После подсчета измерителем девяти колебаний нажать кнопку «Стоп».

17. По формуле (20) определить период колебаний T математического маятника. Измерения периода выполнить пять раз.

18. Заполнить табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	l, м	n	t, с	T, с	$\bar{T}$, с	ΔT, с
1						
2						
3						
4						
5						

19. По формуле (21) определить среднее ускорение свободного падения:

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2 l}{\bar{T}^2}.$$

20. Рассчитать погрешность g по формулам

$$\gamma = \frac{\Delta g}{\bar{g}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{\bar{l}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T}{\bar{T}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2},$$

$$\Delta g = \gamma \bar{g}.$$

21. Записать окончательный результат в виде $g = (\bar{g} \pm \Delta g)$.

22. Сравнить период колебаний T математического маятника с периодом колебаний $T_{об}$ оборотного маятника. Сравнить значения ускорения свободного падения g, полученные с помощью математического и оборотного маятников.

23. Оформить отчет.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятий «гармоническое колебание», «амплитуда, частота», «период», «фаза», «начальная фаза». Запишите уравнение гармонического колебания.

2. Нарисуйте графики гармонических колебаний, отличающихся друг от друга:
   – амплитудой;
   – частотой;
   – фазой;
   – начальной фазой.

3. Каким образом можно определить скорость и ускорение колеблющейся точки?

4. Дайте определение физического маятника, математического маятника.

5. Выведите формулы периода колебаний физического и математического маятников. Сравните их.

6. Сформулируйте понятие приведенной длины физического маятника. В чем состоит его физический смысл?

7. Каким свойством обладают точка подвеса и центр качаний? Каким образом это свойство используется в данной лабораторной работе?

Библиографический список

1. Бондарев, Б. В. Курс общей физики : учеб. пособие. В 3 т. Т. 1 : Механика / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 352 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие. В 4 т. Т. 1 : Механика. Молекулярная физика и термодинамика / И. В. Савельев. – М. : КноРус, 2009. – 528 с.
3. Свистунова, Б. Л. Физические основы механики. Сборник текстовых заданий : учеб. пособие / Б. Л. Свистунова. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 285 с.
4. Слинкина, Т. А. Семестровые задания по механике, молекулярной физике и термодинамике : учеб. пособие / Т. А. Слинкина, Л. И. Чернышева ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 3-е изд., перераб. и доп. – Красноярск, 2009. – 112 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебник / Т. И. Трофимова. – 10-е изд., стер. – М. : Академия, 2005. – 560 с.

Приложение

Образец оформления отчета по лабораторной работе

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

Кафедра физики

Лабораторная работа 15

**ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО
МАЯТНИКА РМ-04**

Выполнили студенты гр. _________
____
____
Принял преподаватель ____________
____

Красноярск 2015

I. Оборудование:

II. Цель работы:

III. Метод измерения:

Задание 1. Определение ускорения свободного падения с помощью оборотного маятника.

1. Результаты измерений:

№ опыта	t, с	$T_{об}$, с	ΔT, с	T'', с	T''', с	L'', м	L''', м
1 2 3 4 5							
		$\bar{T}_{об}$, с				$L_{пр}$, м	

2. Определить приведенную длину оборотного маятника $L_{пр}$:

$$L_{пр} = \frac{L'' + L'''}{2} = .$$

3. Определить среднее ускорение свободного падения $\bar{g}$:

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2 L_{пр}}{\bar{T}_{об}^2} = .$$

4. Рассчитать погрешность g по формулам:

$$\gamma = \frac{\Delta g}{\bar{g}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_{пр}}{L_{пр}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T_{об}}{\bar{T}_{об}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2} = ,$$

$$\Delta g = \gamma \bar{g} = .$$

5. Записать окончательный результат в виде

$$g = (\bar{g} \pm \Delta g) = .$$

Задание 2. Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

1. Результаты измерений:

№ опыта	l, м	n	t, с	T, с	$\bar{T}$, с	ΔT, с
1 2 3 4 5						

2. Определить ускорение свободного падения:

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2 l}{\bar{T}^2} = .$$

3. Рассчитать погрешность g по формулам:

$$\gamma = \frac{\Delta g}{\bar{g}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{\bar{l}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T}{\bar{T}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2} = .$$

$$\Delta g = \gamma \bar{g} = .$$

4. Записать окончательный результат в виде

$$g = (\bar{g} \pm \Delta g) = .$$

5. Сравнить период T математического маятника с периодом $T_{об}$ оборотного маятника. Сравнить значения ускорения свободного падения g, полученные с помощью математического и оборотного маятников. Сделать выводы.

Учебно-методическое издание

ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО МАЯТНИКА РМ-04

Методические указания

Составитель
Машков Павел Павлович

Редактор *Е. Г. Некрасова*
Оригинал-макет и верстка *М. А. Светлаковой*

Подписано в печать 21.09.2015. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 50 экз.
Заказ . С 555.

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 24.49.04.953.П. 000032.01.03 от 29.01.2003 г.

Редакционно-издательский отдел Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
Отпечатано в отделе копировально-множительной техники
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.