

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР –
факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова

Кафедра физики

Общий физический практикум

Лабораторная работа № 1.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ
УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ**

2011 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Задача посвящена определению величины ускорения свободного падения в поле силы тяжести g двумя экспериментальными методами: с помощью математического маятника (метод гравиметра) и путем измерения времени свободного падения тела с заданной высоты без начальной скорости (опыт Галилея). Соответственно, задача содержит два упражнения.

Введение

Движение тела под действием силы притяжения при отсутствии сопротивления воздуха принято называть свободным падением. При свободном падении с небольшой по сравнению с радиусом Земли R_3 высоты h все тела движутся с одним и тем же ускорением:

$$a = \frac{F_{тяж}}{m} = G \frac{M_3 \cdot m}{R_3^2 \cdot m} = G \frac{M_3}{R_3^2} \equiv g, \quad (1)$$

которое принято называть ускорением свободного падения и обозначать g . Вектор этого ускорения направлен вертикально вниз. В приведенном соотношении сила $F_{тяж}$ - сила притяжения между Землей и телом массы m . M_3 - масса Земли, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н*м²/кг - гравитационная постоянная. Ускорение свободного падения одинаково для всех тел и зависит от высоты над уровнем земной поверхности и от географической широты места наблюдения. Величина g изменяется приблизительно от значения $9,78$ м/с² на экваторе, до значения при-

близительно равного $9,83$ м/с² на полюсе. В частности, в Москве $g = 9,81523$ м/с².

Изменение величины ускорения свободного падения связано с отличием формы Земли от формы шара, с собственным вращением планеты и неравномерным распределением плотности. Линейная скорость вращения системы отсчета, связанной с местом проведения измерений, зависит от географической широты места измерений.

В соответствии с законом всемирного тяготения ускорение свободного падения на высоте h от поверхности Земли определяется соотношением:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}, \quad (2)$$

(нетрудно видеть, что при $h \ll R_3$ формула (2) переходит в (1)).

Влияние сопротивления воздуха на величину ускорения, с которым движутся различные тела, в значительной мере зависит от размеров и формы тел и скорости их движения. Но в отсутствие сопротивления воздуха все тела движутся с одним и тем же ускорением g , что доказано экспериментально с точностью до двенадцатого знака после запятой при определении численного значения величины g .

Существует довольно много способов экспериментального определения величины ускорения свободного падения. В данной задаче Вам предлагается две из них, которые в полной мере можно отнести к классическим.

УПРАЖНЕНИЕ №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Теоретическая часть

«Математическим маятником» принято считать маленькое (по своим размерам) тело - материальную точку, подвешенное на длинной (по сравнению с линейными размерами тела), невесомой и нерастяжимой нити, совершающей движение в вертикальной плоскости под действием сил тяжести (рис. 1). Если отклонить нить на небольшой угол α , то на тело будет действовать сила \vec{F} , являющаяся равнодействующей двух сил: притяжения к Земле $m\vec{g}$ и натяжения нити \vec{T} . Очевидно, что $\vec{F} = -m\vec{g} \cdot \sin\alpha$, где α - угол отклонения нити от равновесного положения. Если угол α мал, то можно считать (проверьте сами) $\sin\alpha \approx \frac{x}{l}$, где x - смещение тела в горизонтальном направлении, l - длина маятника.

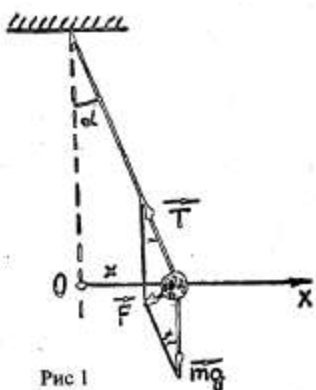


Рис 1

Поскольку направления смещения тела x и действия силы \vec{F} противоположны, можно записать $F = -mg \frac{x}{l}$. С другой стороны, по второму закону Ньютона $F = ma = m\ddot{x}$. В итоге, по-

ведение системы в рамках наших допущений описывается дифференциальным уравнением второго порядка (порядок дифференциального уравнения определяется порядком старшей производной):

$$m\ddot{x} = -mg \frac{x}{l}, \text{ или} \tag{3}$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \tag{4}$$

$$\text{где } \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Известно, что решениями уравнения (5) являются гармонические функции $\sin(\omega_0 t)$ и $\cos(\omega_0 t)$. Это означает, что в нашей системе после первоначального отклонения от положения равновесия возникнут свободные незатухающие колебания с собственной частотой ω_0 , а их период будет равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \tag{5}$$

Использование этого соотношения и является основным при выполнении данного упражнения, поскольку позволяет, зная длину нити математического маятника и период малых колебаний маятника, определить ускорение свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \tag{6}$$

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка

Вам предлагается измерить с достаточно высокой точностью (которую Вы должны оценить самостоятельно) периоды малых колебаний двух математических маятников с разными телами и различными длинами подвеса и на основании

соотношения (6) рассчитать величину ускорения свободного падения на широте г. Москвы.

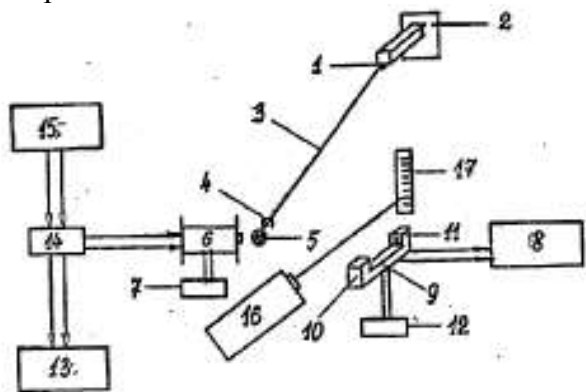


Рис. 2

Экспериментальная установка представляет собой два маятника различной длины (рис 2). Верхние концы нитей зафиксированы в специальных подвесах (1), установленных на кронштейнах (2), закрепленных на стене над лабораторным столом. К нижним концам нитей (3) прикреплены крючки или втулки (4) с резьбой, к которым можно подвешивать различные тела (5). Отклонив нити на небольшие углы от положения равновесия и отпустив тела, можно получить почти гармонические колебания системы. Фиксация начального положения маятника осуществляется с помощью стартового электромагнита (6), закрепленного на штативе (7). Регистрация числа колебаний маятника осуществляется счетчиком числа импульсов (8), к которому подключен фотоэлектрический датчик (9). Последний представляет собой светоизлучатель (10) -лампочку и линзу, и фото приемник (11), конструктивно объединенных в одном корпусе, закрепляемом на штативе (12). Измерение времени нескольких колебаний маятника (нескольких периодов колебаний) производится с помощью электронного секундомера (13). Пуск секундомера производится одновременно с выключением электропитания

стартового магнита (6). Окончание счета времени происходит в момент включения питания этого магнита и, соответственно, в момент остановки тела маятника - в момент окончания колебаний. Включение и выключение электромагнита (а следовательно, и секундомера) производится тумблером, установленным на пульте управления (14). Электропитание стартового магнита осуществляется с помощью низковольтного блока питания (15). Для точного определения длины маятника используется осветитель (16) и линейка (17), закрепленная на стене.

Порядок выполнения эксперимента

Работу над упражнением начните с определения длины маятника. Для этого можно рекомендовать проекционный способ. Включите осветитель (16) и установите его на левом краю лабораторного стола так, чтобы тень от тела, подвешенного на нити (5), оказалась рядом с делениями линейки (17), закрепленной на стене. При этом центр линзы осветителя центр тела центр тени должны быть на одной горизонтальной линии, параллельной поверхности, стола. Расстояние от точки подвеса нити (3) к кронштейну до одного из делений линейки (17) указано для каждого маятника (на стене рядом с экспериментальной установкой). Произведите измерение расстояния от этого деления до центра тени с помощью линейки (17) и определите длину используемого маятника.

Перед началом измерений периода колебаний первого маятника включите цепь электропитания, стартового электромагнита (6), закрепленного на штативе (7), установите его на необходимой высоте так, чтобы центр тела находился на оси сердечника электромагнита. Расположите штатив (7) на оси на таком расстоянии от тела (5) (маятник находится в положении равновесия), чтобы максимальный угол отклонения маятника от этого положения составлял бы $\alpha = 5^\circ$ ($\sin 5^\circ \cong$

0.0872). Установите фотоэлектрический датчик (9) так, чтобы находящееся в положении равновесия тело нити полностью перекрывало световой пучок от излучателя (10) к фотоприемнику (11) датчика (9). Далее, подведите тело к стартовому электромагниту. При этом положение тела окажется зафиксированным.

Период колебаний маятника определяется путем измерения времени нескольких полных колебаний маятника τ и подсчетом их числа. Рекомендуется проводить измерения для не менее 10 полных колебаний. Обратите внимание на то, что счетчиком (8) регистрируется число импульсов N^* , которое в 2 раза превышает число полных колебаний (периодов) N , так как маятник пересекает световой поток фотоэлектрического датчика два раза за один период. Очевидно, что период колебаний маятника определяется из соотношения:

$$T = \frac{2\tau}{N^*}, \quad (7)$$

Для начала измерений выключите тумблер на пульте управления (14). При этом выключится электропитание магнита, маятник придет в движение в момент его начала включится электрический секундомер. Для прекращения колебаний и, следовательно, счета времени и числа колебаний, вновь включите тумблер в тот момент, когда тело (5) окажется в непосредственной близости от сердечника электромагнита. Тело "прилипнет" к сердечнику и прекратится счет времени τ . Эта операция требует некоторой тренировки, так как если включить электромагнит не вовремя, возникает существенная погрешность в определении времени τ . Рассчитайте период колебаний маятника в соответствии с соотношением (7) и определите искомое значение величины ускорения свободного падения g , исходя из соотношения (6).

Для повышения точности результата измерения g рекомендуется повторить эксперимент не менее трех раз и вычис-

лить среднее значение. Все результаты измерений и расчетов занесите в таблицу, форму которой можете выбрать самостоятельно. В этой же таблице обязательно укажите погрешности отдельных измерений и окончательных результатов. После этого повторите все измерения для второго маятника и сопоставьте полученные результаты измерения g друг с другом.

По отдельному указанию преподавателей Вам могут быть предложены для проведения измерений еще несколько тел (с разными геометрическими размерами и массами, различной формы). В этом случае аккуратно произведите смену тел на нитях, вывинчивая из одних и ввинчивая в другие крючки или втулки (4). Проведение дополнительных экспериментов с телами разной формы и различными массами, позволит Вам существенно расширить полученный экспериментальный материал и установить ряд любопытных фактов, например, установить, что период колебаний математического маятника не зависит от его массы. Заметим что поскольку в выражение (5) для периода малых колебаний входят только длина нити маятника и ускорение свободного падения, можно сделать вывод о точном совпадении величины инертной массы m_i , с величиной гравитационной массы m_g . В противном случае из второго закона Ньютона для тела, движущегося в поле тяготения, следовало бы иное, чем (5) выражение для периода малых колебаний математического маятника:

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

В заключение, несколько слов об ошибках эксперимента. Определяя экспериментальное значение величины g из соотношения (как следует из (6) и (7)):

$$g = \pi^2 l \frac{N^{*2}}{\tau^2}, \quad (9)$$

Обратите внимание на то, что основную погрешность в окончательный результат вносят ошибки измерений длины маятника l и времени τ . Можно рекомендовать при определении погрешности окончательного результата рассчитать, воспользовавшись абсолютными погрешностями измерения величин l и τ , относительные погрешности этих величин, затем определить относительную погрешность величины g (с учетом вычисления средних значений), и лишь затем рассчитать абсолютную погрешность экспериментально измеренного значения величины ускорения свободного падения g .

Напомним, что при измерениях и расчетах следует пользоваться только системой единиц СИ.

УПРАЖНЕНИЕ №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ В ОПЫТЕ ГАЛИЛЕЯ.

Теоретическая часть

При выполнении этого упражнения величина g определяется экспериментально путем измерения времени свободного падения тела с заданной высоты h без начальной скорости. Из известного кинематического соотношения для равно-

ускоренного движения $h = V_0 t + \frac{at^2}{2}$ для случая свободного

падения с нулевой начальной скоростью ($V_0 = 0$), имеем:

$$g = \frac{2h}{\tau^2}, \quad (10)$$

где h - расстояние, пройденное телом с момента начала падения за время τ . Это соотношение и является основным при выполнении данного упражнения. Вам предлагается экспе-

риментально измерить 2-4 значения времени падения тел τ для различных значений высоты h . Для уменьшения погрешности результата рекомендуется каждое измерение повторять не менее 3-х раз и рассчитать среднее значение g . Полученные результаты следует сопоставить с результатами первого упражнения и попытаться объяснить расхождения с теоретическим.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Здесь цифрами обозначены: штатив с нанесены на нем риски (1), стартовый узел (2) с установленным на нем электромагнитом (3); па-

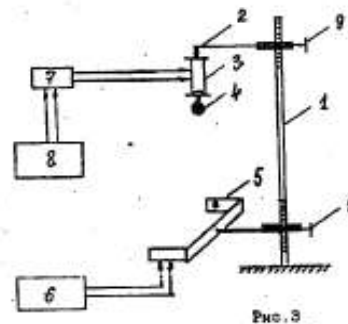


Рис. 3

дающее тело (4); фотоэлектрический датчик (5), (аналогичный, датчику (9) упражнение 1); счетчик-секундомер (6) (тот же самый, что использовался в первом упражнении); пульт управления (7) и блок электропитания (8) магнита. Для определения расстояния h на штативе нанесены риски с интервалом 0.01 м. Расстояние между двумя внутренними жирными рисками на штативе составляет 1 м. Крайние жирные риски отстоят от внутренних на расстояние 0.15 м. каждая. Положения стартового узла (2), а следовательно, и начальное положение падающего тела и положение фотоэлектрического датчика (5) можно менять для этого необходимо ослабит винты (9), придерживая при этом узлы, установить их в новые положения и о зафиксировать с помощью винтов (9). При включенном питании электромагнита пада-

ны риски с интервалом 0.01 м. Расстояние между двумя внутренними жирными рисками на штативе составляет 1 м. Крайние жирные риски отстоят от внутренних на расстояние 0.15 м. каждая. Положения стартового узла (2), а следовательно, и начальное положение падающего тела и положение фотоэлектрического датчика (5) можно менять для этого необходимо ослабит винты (9), придерживая при этом узлы, установить их в новые положения и о зафиксировать с помощью винтов (9). При включенном питании электромагнита пада-

ющее тело (шарик) удерживается в неподвижном состоянии. При включении тумблера на пульте управления цепь питания электромагнитом разрывается, и тело начинает падение. Одновременно с этим происходит включение счетчика-секундомера. В тот момент, когда тело пересекает световой пучок фотоэлектрического датчика, в нем вырабатывается импульс, приводящий к остановке счета времени.

Порядок выполнения эксперимента

Выполнение упражнения начните с тщательной настройки установки. Дело в том, что для успешного проведения предлагаемого Вам эксперимента необходимо чтоб падающее тело пролетело бы точно посередине между излучателем света и приемником фотоэлектрического датчика. Добиться этого можно лишь аккуратным подбором взаимного положения стартового электромагнита и датчика. Сначала потренируйтесь, естественно постаравшись не повредить датчик, маленькие шарики, а затем приступайте к измерениям.

Далее установите первое из выбранных Вами значений расстояния h . Обратите внимание на точное определение положения нижней границы падающего тела, поскольку срабатывание фотоэлектрического датчика происходит тогда, когда эта граница пересекает пучок света. Затем проделайте два-три эксперимента для каждого из предложенных Вам преподавателем тел. Они имеют разные массы и обладают различной формой. Если это необходимо, определите массы тел с помощью весов. Для проведения опыта включите электропитание магнита, установите и зафиксируйте тело, включите счетчик-секундомер и установите нулевое значение на его индикаторе. После этого выключите тумблер на пульте управления и проведите отсчет времени τ свободного падения. Повторите эксперимент 2-3 раза, затем замените тело.

Лишь после проведения нескольких экспериментов с различными телами измените высоту падения h , переставив в новое положение стартовый узел или фотоэлектрический датчик (или одновременно и то, и другое).

Результаты всех измерений занесите в таблицу и рассчитайте экспериментальные значения величины g для каждого опыта затем, найдите средние значения для каждого из использованных тел. Не забудьте оценить погрешности всех полученных результатов, воспользовавшись рекомендациями, приведенными в упражнении 1.

Результаты, полученные при выполнении упражнения 1 и 2, сопоставьте друг с другом и постарайтесь объяснить причины их расхождения между собой.

И, что очень важно - объясните, почему полученные Вами экспериментальные значения величины ускорения свободного падения g несколько отличаются от приведенного в начале описания задачи значения.

Рекомендованная литература

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Механика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н., «Механика: учебное пособие», т. 1.
3. Сивухин Д.В., «Общий курс физики», т. 1.
4. Ландсберг Г.С., «Элементарный учебник физики», т. 1.
5. Сергеев С.П. «Обработка результатов физического эксперимента».