

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛИШЕРА НАВОИ

ПРАКТИКУМ ПО МЕХАНИКЕ

Самарканд - 2005

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛИШЕРА НАВОИ

ПРАКТИКУМ ПО МЕХАНИКЕ

Рекомендовано к печати
учебно-методическим
советом СамГУ

Самарканд - 2005

Практикум по механике: Методическое пособие / Составители: А.А.Якубов, Ф.Х.Тухватуллин, А.Жумабаев. - Самарканд: Изд-во СамГУ, 2005. - 66 с.

Пособие содержит описания лабораторных работ по основам физической механики и предназначено для студентов, обучающихся в бакалавриате вузов по направлению «Физика».

Составители: А.А.Якубов,
Ф.Х.Тухватуллин,
А.Жумабаев

Ответственный редактор: кандидат физико-математических наук,
доцент У.Б.Жураев

Рецензенты: доктор физико-математических наук,
профессор Ш.М.Мавлонов,
кандидат физико-математических наук,
доцент Г.Ходжаев

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ НОНИУСОВ

Нониусом называется дополнение к обычному масштабу (линейному или круговому), позволяющее повысить точность измерения с данным масштабом в 10-20 раз.

Техника непосредственного измерения длин и углов достигла к настоящему времени большого совершенства. Сконструирован ряд специальных приборов, так называемых компараторов, позволяющих измерять длину с точностью до 1 микрометра. Большинство из них основано на применении микроскопа и некоторых других оптических приспособлений. Но при этом почти всегда отсчетные приспособления снабжаются нониусами или микрометрами. В ряде случаев требуемая относительная точность измерения длины бывает такова, что можно удовлетвориться абсолютной точностью в сотые или даже в десятые доли миллиметра, а для углов – минутами или долями минут. В этом случае можно для измерения пользоваться обычными масштабными линейками и угломерами, снабженными нониусами. Примерами таких приборов являются штангенциркуль, буссоль, кипрегель.

Линейным нониусом называется маленькая линейка с делениями, которая может скользить вдоль большой линейки также с делениями, называемой масштабом (рис. 1).

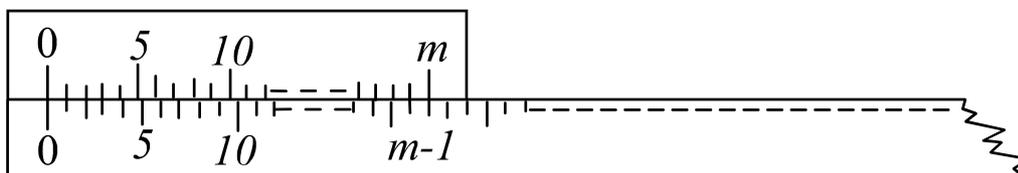


Рис. 1.

Деления на нониусе наносятся обычно так, что одно деление нониуса составляет $(m-1)/m = 1 - 1/m$ делений масштаба, где m – число делений масштаба. Именно это позволяет, пользуясь нониусом, производить отсчеты с точностью до $1/m$ части наименьшего деления масштаба. Пусть расстояние между соседними штрихами масштаба y , а между соседними штрихами нониуса x .

Можно написать, что $x = y - (y/m)$, откуда получаем $mx = (m-1)y$. Величина

$$\Delta x = y - x = y/m \quad (1)$$

носит название *точности нониуса*, она определяет максимальную погрешность нониуса. При достаточно мелких делениях масштаба деления нониуса делают более крупными.

В любом положении нониуса относительно масштаба одно из делений первого совпадает с каким-либо делением второго. Отсчет по нониусу

основан именно на способности глаза, фиксировать это совпадение делений нониуса и масштаба.

Рассмотрим теперь процесс измерения при помощи линейного нониуса. Пусть L – измеряемый отрезок (рис.2). Совместим с его началом нулевое деление основного масштаба. Пусть при этом его конец окажется между k и $(k+1)$ -м делением этого масштаба. Тогда можно написать

$$L = ky + \Delta L,$$

Где ΔL – неизвестная пока еще доля k -го деления масштаба.

Приложим теперь к концу отрезка L наш нониус так, чтобы нуль нониуса совпал с концом этого отрезка. Так как деления нониуса не равны делениям масштаба, то обязательно найдется на нем такое деление n , которое будет ближе всего подходить к соответствующему $(k+n)$ -му делению масштаба. Как видно из рис.2,

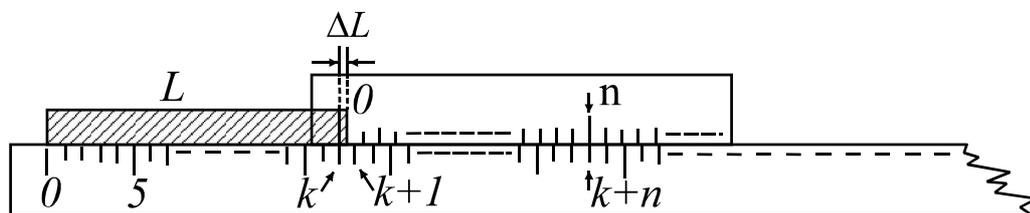


Рис.2.

$$\Delta L = ny - nx = n(y - x) = n\Delta x,$$

и вся длина будет равна, следовательно,

$$L = ky + n\Delta x$$

или согласно (1)

$$L = ky + ny/m, \quad (2)$$

что можно сформулировать следующим образом: *длина отрезка, измеряемого при помощи нониуса, равна числу целых делений масштаба плюс точность нониуса, умноженная на номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением масштаба.*

Погрешность, которая может возникнуть при таком методе отсчета, будет обуславливаться неточным совпадением n -го деления нониуса с $(k+n)$ -м делением масштаба, и величина ее не будет превышать, очевидно, $\Delta x/2$, ибо при большем совпадении этих делений одно из соседних делений (справа или слева) имело бы несовпадение, меньшее чем на $\Delta x/2$, и мы произвели бы отсчет по нему. Таким образом, можно сказать, что *погрешность нониуса равна половине его точности.*

Длина делений масштаба и число делений нониуса, а следовательно и точность нониуса, бывают самые разнообразные.

Круговой нониус в принципе ничем не отличается от линейного. Он представляет собой небольшую дуговую линейку, скользящую вдоль круга (лимба), разделенного на градусы или на еще более мелкие деления (рис.3). На линейке нанесены деления также в количестве m , общая длина которых равна $(m-1)$ делениям лимба, т.е.

$$m\alpha = (m-1)\beta,$$

где α и β - выраженные в градусах или минутах цены делений нониуса (α) и наименьшего деления лимба (β).

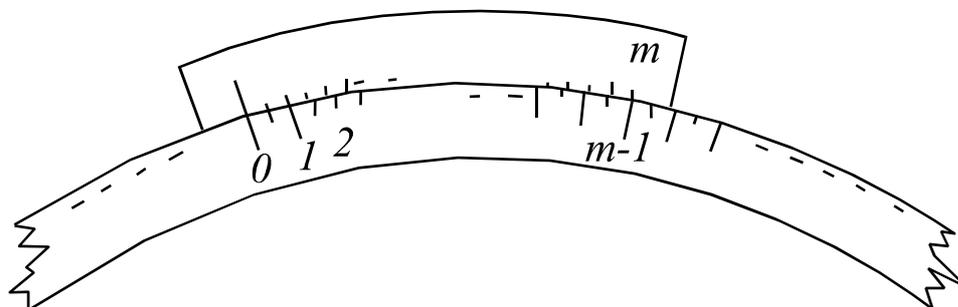


Рис.3.

Точность кругового нониуса будет выражаться формулой, совершенно аналогичной формуле (1),

$$\Delta\alpha = \beta/m.$$

Отсчитываемые от нуля лимбы углы (рис.4) будут вычисляться, очевидно, по формуле

$$\varphi = k\beta + n \cdot \Delta\alpha.$$

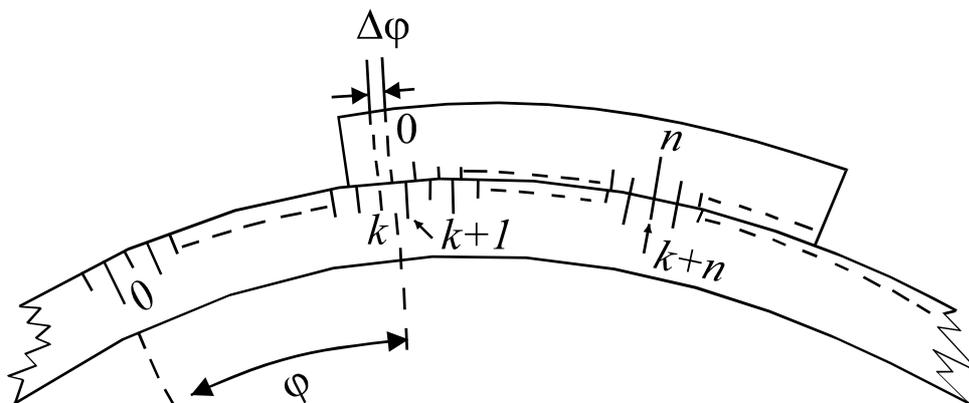


Рис.4.

Часто круговые нониусы в приборах, в которых необходимо отсчитывать углы в обоих направлениях (по часовой стрелке и против нее), состоят из двух совершенно одинаковых шкал, расположенных по обе стороны нуля. Легко сообразить, что при отсчетах следует всегда пользоваться той шкалой, которая идет вперед по направлению отсчетов.

Более точные нониусы применяются лишь в особо прецизионных приборах, в частности в астрономических.

Во многих случаях для облегчения отсчета нониусы (обоих видов) снабжаются скрепленными с ними лупами, при отсутствии же таковых рекомендуется пользоваться для отсчета обыкновенными ручными лупами.

Упражнение 1. Определение объема трубки и плотности ее материала при помощи штангенциркуля

Принадлежности: 1) штангенциркуль, 2) измеряемая трубка, 3) лупа.

Описание прибора. Штангенциркуль (рис.5) состоит из разделенного на миллиметры масштаба LM , вдоль которого может перемещаться перпендикулярная к его длине ножка CB с зажимным винтом C , служащим для ее закрепления; в ее обойме против делений масштаба сделан вырез, на скошенном краю которого, прилегающем к масштабу, нанесен нониус; когда ножки сдвинуты вплотную, то нуль нониуса совпадает с нулем масштаба. Неподвижная ножка LA , укрепленная в начале масштаба также перпендикулярно его длине, служит упором для измеряемого тела. Части FF обеих ножек служат для измерения внутренних размеров тел.

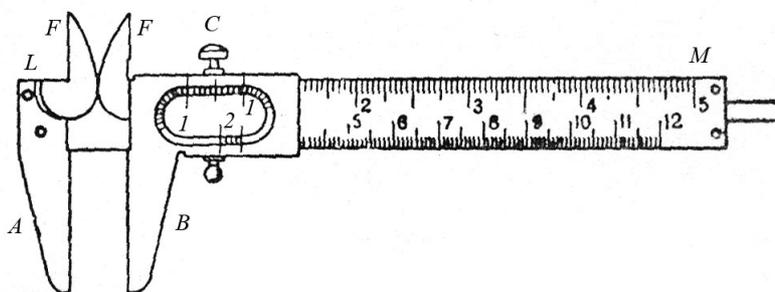


Рис.5.

Измерения. Для определения объема трубки необходимо определить ее геометрические размеры – длину и внутренний и внешний диаметры. Для определения плотности вещества трубки необходимо, кроме объема, определить ее массу.

Определение объема. Измерение длины производят следующим образом. Раздвинув достаточно ножки штангенциркуля, помещают между ними продольно трубку вблизи шкалы, ножку B подводят так, чтобы трубка была слегка зажата, и производят отсчет. Так как ножка B , а следовательно, и нуль нониуса переместились на длину трубки, то отсчитывают по масштабу целое число миллиметров до нуля нониуса и смотрят, какое деление нониуса совпадает с некоторым делением масштаба. Измерение повторяют несколько раз, повернув перед каждым из них трубку около ее оси на некоторый угол (около 45°). Из всех полученных результатов берут среднее арифметическое.

Далее производят измерение внешнего диаметра трубки. Измеряют одинаковое число раз на том и на другом конце трубки два взаимно-перпендикулярных диаметра, слегка зажимая трубку между ножками штангенциркуля и держа ее при этом перпендикулярно к длине масштаба. Из всех результатов берут среднее.

При измерении внутреннего диаметра трубки вводят части *FF* ножек штангенциркуля в трубку и разводят их настолько, чтобы обе они прилегали к внутренним стенкам трубки; производят отсчет; потом измеряют другой, перпендикулярный к первому, внутренний диаметр трубки. Такие же два измерения производят на другом конце. Берут из всех измерений среднее.

Из результатов измерений вычисляют объем трубки по элементарным геометрическим формулам:

$$V_{\text{трубки}} = \frac{\pi h(d_1^2 - d_2^2)}{4},$$

где h – длина (высота) трубки, d_1 и d_2 – внешние и внутренние диаметры трубки.

Определение плотности вещества трубки. Взвешивая трубку (на простых весах) с точностью до 0,1 г, находят ее массу и, зная ее объем, вычисляют плотность вещества трубки по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Вычисляются среднее значение измеряемых величин, абсолютные и относительные ошибки экспериментов. Результаты измерений и вычислений приводятся в таблице.

Объем трубки и плотность ее материала

№	h, см	d ₁ , см	d ₂ , см	V, см ³	m, г	ρ, г/см ³	ρ _{орт} , г/см ³	Δρ, г/см ³	Δρ _{орт} , г/см ³	N, %

Упражнение 2. Измерение толщины металлической пластинки и диаметров проволок микрометром

Принадлежности: 1) микрометр, 2) металлическая пластинка, 3) проволоки разных диаметров.

Описание микрометра. Микрометр (рис.6) служит для измерения диаметров проволок, небольших толщин пластинок и т.п. Он имеет вид тисков, в которых измеряемый объект зажимается с помощью винта. Ход винта обычно бывает равен 1 мм или 0,5 мм. На стержне винта *A* укреплен барабан *C* с нанесенной на нем шкалой, имеющий 50 или 25 делений. При зажатом винте нуль барабана стоит против нуля линейной шкалы *D*. Измеряемый предмет помещают между винтом и противоположным ему упором, затем вращая винт за головку *B*, доводят его до соприкосновения с

предметом. По линейной шкале отсчитывают миллиметры, а по шкале барабана – сотые доли миллиметра.

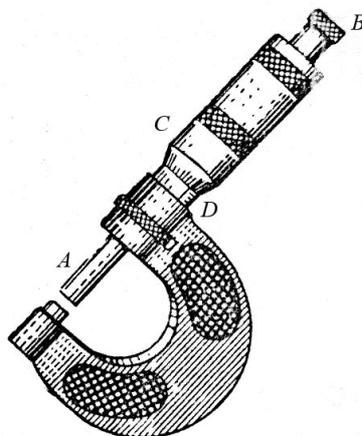


Рис.6.

Главным источником ошибок является неравномерность нажатия винта на измеряемый предмет. Для устранения этого недостатка современные микрометры снабжаются специальным приспособлением, не допускающим слишком сильного нажатия. Действие подобных приспособлений основано на трении, возникающим между стержнем винта *A* и рукояткой *B*, поворачивающей винт.

Измерения. Прежде чем пользоваться микрометром, необходимо убедиться, что микрометр исправен – нули его шкал совпадают.

Пластинку помещают между винтом и противоположным упором и вращением барабана *C* подводят торец винта к плоскости пластинки. Окончательное нажатие винтом на пластинку следует делать только рукояткой *B*.

Момент нажатия фиксируется слабым треском. После этого треска дальнейшее вращение рукоятки *B* бесполезно, а барабана *C* недопустимо. Производят отсчет по шкалам: миллиметры по линейной шкале, доли миллиметра по шкале на барабане.

Толщину пластинки необходимо измерить вблизи каждого из ее четырех углов не менее трех раз. За истинное значение принимают среднее арифметическое. Диаметры проволок измеряются подобным образом. Вычисляются абсолютные и относительные ошибки эксперимента. Результаты измерений и вычислений приводятся в таблице.

1. Толщина пластинки

№	d , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	Δd , мм	$\Delta d_{\text{ср}}$, мм	N , %
1					
2					
3					

2. Диаметр проволоки

№	d , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	Δd , мм	$\Delta d_{\text{ср}}$, мм	N , %
1					
2					
3					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое измерение? Погрешности измерений и их учет.
2. Нониусы. Точность нониуса.
3. Штангенциркуль и измерение на нем.
4. Микрометр и измерение на нем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. СПб.: Лань, 2005. 560 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Физматлит, 2005. 560 с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероновой. М.: Наука, 1967. С.48-51.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛАСТИНКИ И РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ СФЕРОМЕТРОМ

Описание сферометра. Сферометр служит для точного измерения толщины пластинок, а также для определения радиуса кривизны сферических поверхностей (например, оптических линз). Он состоит (рис. 1) из металлического треножника, в котором ходит вертикально стальной микрометрический винт, шаг которого точно определен и обычно бывает равен 1 или 0,5 мм. (В нашем случае шаг винта равен 0,5 мм; следовательно, два полных оборота винта перемещают его вверх или вниз на 1 мм.) Внизу винт оканчивается острием или шариком, а наверху несет диск D , разделенный по окружности на 250, 500 или 1000 частей. (В нашем случае диск разделен на 500 частей; это дает нам возможность производить измерения с точностью до 0,001 мм.) Сбоку треножника укреплена вертикальная линейка с нанесенными на ней делениями, по которой отсчитывается число полных оборотов винта, доли же оборота отсчитывают по диску D , замечая, какое деление диска стоит против ребра линейки. Винт вращают за головку. Ножки сферометра оканчиваются остриями, находящимися на равных расстояниях одно от другого.

При измерениях сферометром труднее всего точно уловить момент первого соприкосновения конца микрометрического винта с плоскостью, находящейся под ним. Для этого очень часто используют явление интерференции света. Иногда пользуются также особым приспособлением, которое состоит в следующем: микрометрический винт (рис.1) просверлен вдоль оси, и в этом канале ходит почти без трения стальной стержень, оканчивающийся внизу острием, а вверху – острым ребром, которое при соприкосновении стержня с подложенным под него предметом упирается в короткое плечо чувствительного рычага; этот последний, нажимая на выступ второго рычага, приподнимает его свободный конец, что дает возможность производить весьма точную установку, доводя конец рычага до одной высоты с ребром указательной призмы.

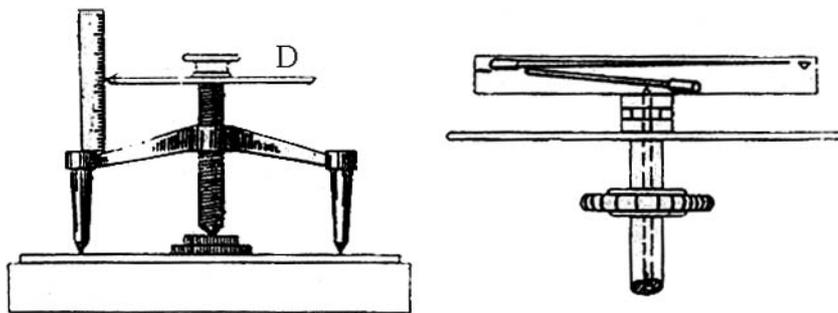


Рис.1.

Упражнение 1. Измерение толщины пластинки

Принадлежности: 1) сферометр, 2) плоскопараллельное стекло, 3) измеряемая стеклянная пластинка.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Сферометр осторожно ставят на плоскопараллельное стекло. Вращают медленно и плавно винт до тех пор, пока он не коснется стекла, т.е. конец рычага (рис. 1) поднявшись, установится против ребра призмы. В этом положении производят отсчет оборотов и долей оборота винта: отмечают по вертикальной шкале деление N_0 , соответствующее положению диска, а также деление на диске n_0 против ребра линейки. Затем, вывернув немного винт, снова приводят его в соприкосновение со стеклом и снова отсчитывают. Среднее арифметическое из 3-5 отдельных отсчетов дает средний отсчет N_0 и n_0 , соответствующий нулевому положению винта.
2. Затем, взвинтив достаточно винт, под ним кладут измеряемую стеклянную пластинку. Приводят винт в соприкосновение с измеряемой пластинкой, что улавливается указанным выше способом, и делают

отсчет, как и прежде, т.е. определяются N и n . Повторив операцию отсчетов несколько раз, берут среднее.

3. Вычтя из этого отсчета предыдущий (отсчет нулевого положения), получают значение толщины пластинки h . Разность отсчетов по линейке $N-N_0$ выразится целыми миллиметрами, а разность отсчетов по диску дает тысячные доли миллиметра: $(n-n_0)/1000$, следовательно,

$$h = \left(N - N_0 + \frac{n - n_0}{1000} \right) \text{мм.}$$

Упражнение 2. Определение радиуса кривизны линзы

Принадлежности: 1) сферометр, 2) плоскопараллельное стекло, 3) плоско-выпуклая линза, 4) штангенциркуль.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Ставят сферометр на плоскопараллельное стекло, ввинчивают медленно винт и замечают, когда конец рычага (рис. 1), поднявшись, установится против ребра призмы; в этом положении делают отсчет на линейке и диске D . Записав отсчет, вывинчивают немного винт и снова повторяют измерение. Среднее арифметическое из 3-5 отдельных отсчетов даст средний отсчет N_0 и n_0 , соответствующий нулевому положению винта.

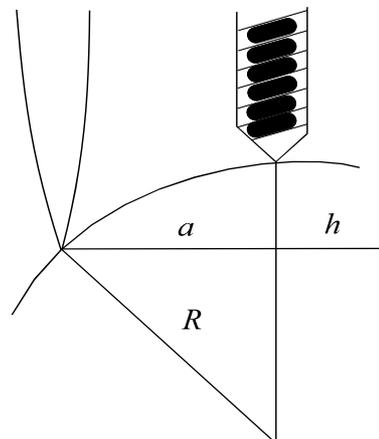


Рис.2.

2. Затем, вывинтив достаточно винт, переносят сферометр на исследуемую линзу и, установив его приблизительно на ее середине (добиваются прикосновения к линзе всех трех его ножек), ввинчивают винт до его соприкосновения с линзой, что улавливается указанным выше способом. Здесь делают также 3-5 отдельных отсчетов, из которых затем получают средний отсчет. Затем сдвигают сферометр на линзе несколько в сторону

и для этого нового его положения также получают средний отсчет из отдельных наблюдений. Таких положений сферометра на линзе берут не менее трех. Среднее из результатов этих трех измерений и представит собой положение винта, соответствующее вершине сферического сегмента, основанием которого служит круг, проходящий через острия ножек сферометра (рис. 2). Отсюда находится высота сегмента

$$h = \left(N - N_0 + \frac{n - n_0}{1000} \right) \text{ мм.}$$

3. После этого сферометр ставят на лист бумаги, нажимают слегка на весь прибор и измеряют штангенциркулем расстояния между отпечатками трех ножек сферометра, обозначенные на рис. 3, буквами b , и берут среднее значение.
4. Радиус кривизны определяется следующим образом. Из рис.2 по теореме Пифагора имеем: $R^2 = a^2 + (R - h)^2$, откуда

$$R = \frac{a^2 + h^2}{2h}. \quad (1)$$

Зная свойства биссектрисы угла равностороннего треугольника $H = \frac{3}{2}a$ (рис.3) и применяя теорему Пифагора, найдем:

$$\left(\frac{3}{2}a \right)^2 = b^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2, \text{ откуда } a = \frac{b}{\sqrt{3}}. \text{ Подставив значения } a \text{ в формулу (1)}$$

имеем:

$$R = \frac{b^2 + 3h^2}{6h}.$$

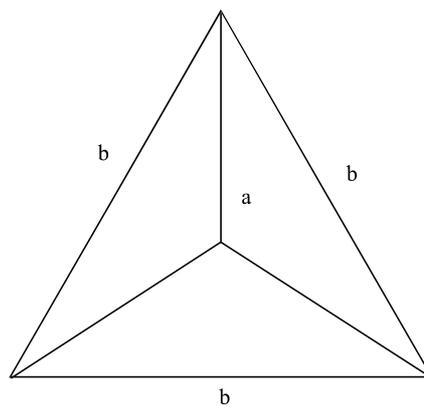


Рис.3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое измерение? Погрешности измерений и их учет.

2. Основные методы и приборы измерения различных физических величин (времени, температуры, давлений, массы, линейных и угловых величин).
3. Как устроен сферометр?
4. В чем отличие сферометра от штангенциркуля и микрометра?
5. Какую наименьшую толщину можно измерить сферометром?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1989. 576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И.Ивероновой. М.: Наука, 1967. С.48-51.
6. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М.: Высш.шк., 1970. С.5-39.

Лабораторная работа № 3

ТОЧНОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ

Принадлежности: 1) аналитические весы, 2) разновес, 3) взвешиваемое тело.

Описание весов. Масса тела m – физическая величина, являющаяся мерой инертности тела в поступательном движении. Отношение масс двух тел равно отношению их весов. На этом основано сравнение масс тел с помощью рычажных весов. Весом тела называется сила P , с которой неподвижное относительно Земли тело давит на опору вследствие притяжения его к Земле. Так как изменение веса тел для различных точек поверхности Земли невелико, то можно считать, что на Земле тело с массой в 1 кг весит 1 килограмм.

Для взвешивания тел пользуются различного рода весами (техническими, аналитическими и др.). Для взвешивания небольших тел с высокой точностью (до десятых долей миллиграмма) применяются аналитические весы (рис.1). Они обычно используются при химических анализах. Такие весы заключены в ящик, предохраняющий их от пыли и воздушных токов. Весы состоят из равноплечего рычага BB , называемого коромыслом, опорой которого служит ребро стальной закаленной призмы a , вставленной в середину коромысла перпендикулярно к его плоскости. Ребро призмы опирается на агатовую полированную пластинку (подушку), укрепленную наверху колонки A . На концах коромысла, на равных

расстояниях от средней призмы, имеются приспособления для подвешивания чашек CC , обыкновенно – призмы bb . Ребра средних и крайних призм должны быть параллельны между собой. Если на чашках нет грузов, то коромысло должно устанавливаться горизонтально или почти горизонтально. Для определения положения коромысла служит длинная стрелка J , прикрепленная к его середине перпендикулярно к линии, соединяющей две крайние призмы. Конiec стрелки движется перед шкалой S , находящейся у основания колонки. При горизонтальном положении коромысла стрелка должна указать на среднее деление шкалы.

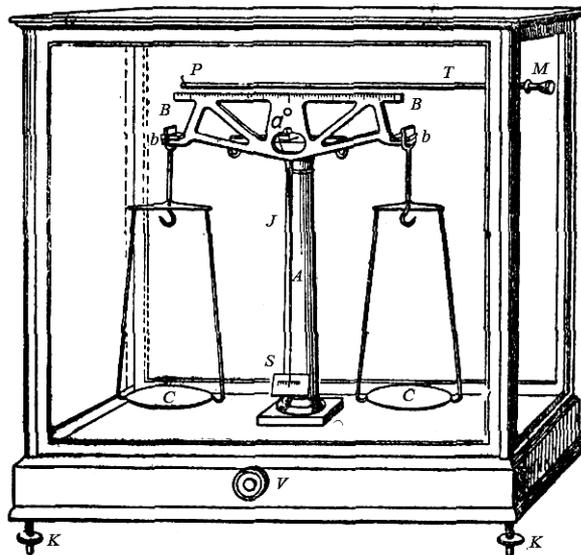


Рис.1.

Основной величиной, характеризующей весы, является их чувствительность. Чувствительностью весов называется отношение тангенса угла отклонения стрелки к весу того добавочного перегрузка p , который вызывает это отклонение, или пропорциональное этой величине отношение числа делений, на которое перемещается стрелка по шкале S , к тому же добавочную перегрузку p (обыкновенно $p=1$ мг); выражается она формулой

$$\omega = \frac{L \cos \alpha}{(2P + p)L \sin \alpha + Kh},$$

где L - длина плеч коромысла, K - его вес, h - расстояние центра тяжести коромысла от нижнего ребра средней призмы, P - нагрузка весов, α - угол прогиба для прямолинейного рычага. Из формулы видно, что чувствительность вообще зависит от нагрузки, но если ребра всех трех призм коромысла лежат в одной плоскости и прогибом плеч можно пренебречь, то чувствительность будет постоянна и выразится формулой

$$\omega = \frac{L}{Kh}$$

В готовых весах мы можем изменить только величину h , т.е. перемещать центр тяжести коромысла кверху или книзу и изменять таким образом чувствительность весов. Это достигается особыми приспособлениями, различными на различных весах, состоящими обычно из грузиков, перемещающихся в вертикальном направлении.

Чтобы не употреблять при взвешивании разновесок меньше 1сГ, представляющих большое неудобство по своей малости, пользуются так называемым *рейтером*, т.е. подвижным грузом, согнутым в виде крючка из тонкой проволоки, вес которого равен 1сГ. Рейтер насаживается верхом на одно из плеч коромысла, разделенное на равные части. Обыкновенно каждое плечо коромысла разделено на десять равных частей. Если рейтер помещен на первое, второе, третье и т.д. деления плеча коромысла, считая от средней призмы, то его действие равносильно действию положенного на чашку груза в 1, 2, 3 и т.д. миллиграммов. Накладывание и снятие рейтера производятся при закрытых дверцах посредством особого приспособления. Оно состоит из латунного стержня T (рис.1), проходящего сквозь боковую стенку ящика весов и перемещающегося параллельно коромыслу. Стержень может вращаться около своей оси; на внешнем конце он снабжен головкой M , а на внутреннем - боковым рычажком P с выступающим штифтом; этот последний вводится в ушко (петлю) рейтера и подхватывает его.

Когда весы не находятся в работе, их необходимо *арретировать*; это производится действием особого приспособления внутри колонки весов, при помощи которого коромысло и чашки несколько приподнимаются кверху, вследствие чего их призмы освобождаются от давления на плоскость опоры и неизбежного при этом напрасного изнашивания. Устройство арретиров у разных весов бывает различно. Обыкновенно арретирование и освобождение коромысла производится посредством головки V , помещающейся в нижней части весов, вращением ее в ту или иную сторону.

Каждые весы рассчитаны на определенную *предельную нагрузку*, которая обыкновенно указывается на самих весах, и переходить которую ни в коем случае не следует во избежание опасных для весов прогибов их коромысла. Соответственно этому при каждом весе прилагается деревянный футляр с полным набором необходимых разновесок до определенной величины.

Установка весов. Колонка весов должна быть установлена вертикально. Это проверяется по отвесу, помещенному позади колонки; нить отвеса должна находиться точно в центре маленького кольца, через которое она проходит. Добиваются этого соответствующим вращением установочных винтов K (рис.1). Если колонка весов установлена вертикально, то конец стрелки J коромысла при ненагруженных и освобожденных весах должен указывать приблизительно на среднее деление

шкалы S . Если это не наблюдается, т.е. если конец стрелки J коромысла отклоняется больше, чем на 2-3 деления от среднего, то весы можно исправить, вращав в ту или другую сторону небольшие латунные грузы на концах коромысла BB ; эта операция требует большой осторожности и навыка.

Правила обращения с весами. При обращении с весами необходимо соблюдать следующие правила:

1. Пока весы не арретированы, нельзя класть на чашки или снимать с них грузы (не следует даже прикасаться к чашкам), нельзя производить перестановку рейтера на коромысле весов.
2. Грузы накладывать на чашки следует так, чтобы общий центр тяжести грузов приходился по возможности на середину чашки.
3. Нельзя брать разновески руками; для этого служит пинцет; мелкие разновески плоской формы (доли грамма) берут пинцетом за загнутые уголки.
4. Снимая разновески с весов, следует их класть непременно в ящик, каждую на предназначенное ей место.
5. Не следует освобождать вполне коромысла, пока чашки еще мало уравновешены; его освобождают лишь настолько, чтобы можно было судить, которая из чашек легче, замечая, куда отклоняется стрелка; после этого тотчас арретируют коромысло и прибавляют или убавляют разновески. (При малой разнице между весами взвешиваемого тела и разновесок коромысло начинает уже маятникообразно качаться)
6. Освобождать и арретировать коромысло следует всегда медленно и плавно; если весы качаются, то арретировать надо весьма осторожно, в то время, когда стрелка проходит через положение равновесия; иначе коромысло получает толчки.
7. Если чашки качаются маятникообразно, то их следует прежде успокоить прикосновением листка бумаги к их краю и уже только после этого вполне освободить коромысло.
8. При наблюдении качания весов дверцы их должны быть непременно закрыты.
9. Если по освобождении коромысла окажется, что амплитуда колебания слишком мала (можно считать достаточной амплитуду в 3-4 деления в ту и другую сторону от середины шкалы), то, приотворив немного дверцу, можно слегка махнуть перед весами рукой; тогда струя воздуха обыкновенно сообщает коромыслу достаточную амплитуду.
10. Не следует оставлять надолго грузы на чашках, в особенности, когда весы не арретированы. Когда взвешивание окончено, весы надо арретировать, нагрузки снять и закрыть дверцы.

Измерения. Для того чтобы произвести точное взвешивание, необходимо: 1) определить нулевую точку весов, 2) определить их

чувствительность, 3) произвести самое взвешивание и 4) ввести поправки на кажущуюся потерю веса тела в воздухе.

Определение нулевой точки весов. Перед началом каждого взвешивания необходимо определить положение равновесия ненагруженных весов, т.е. то деление e_0 шкалы, против которого остановилась бы стрелка при отсутствии трения. Это деление называют *нулевой точкой* или нулем весов. В целях исключения влияния трения нулевая точка определяется по методу качаний.

При качании коромысла указатель весов колеблется подобно маятнику. Положим, что при своем размахе влево конец указателя доходит до черты a_1 шкалы, считая от ее крайней левой черты, а при следующем размахе вправо он доходит до положения a_2 шкалы. Если бы указатель совершал одинаковой величины размахи в ту и в другую сторону от своего положения равновесия, то оно определилось бы как полусумма величин a_1 и a_2 . В действительности размахи указателя с течением времени уменьшаются: первый размах влево более следующего размаха вправо, в свою очередь этот последний более следующего размаха влево и т.д. Поэтому полусумма величин a_1 и a_2 не дала бы истинного положения нуля весов.

Рассмотрим теперь три последовательных размаха указателя a_1 , a_2 и a_3 , из которых два, a_1 и a_3 , в левую сторону, а один, a_2 - в правую. Взяв полусумму величин a_1 и a_3 , мы получим число, которое относительно a_2 будет более удовлетворять условию равенства размахов в ту и другую сторону от положения равновесия, чем одно a_1 или a_3 . Следовательно, нуль весов, вычисленный как

$$\frac{\frac{a_1 + a_3}{2} + a_2}{2},$$

будет уже ближе к действительному его положению.

Так как изменение амплитуды происходит не пропорционально времени, а по экспоненциальному закону, то, взяв, например, пять последовательных размахов - a_1 , a_2 , a_3 , a_4 и a_5 , три, a_1 , a_3 , a_5 , в одну сторону и два, a_2 и a_4 , в другую, и выведя среднее из размахов в каждую сторону, мы, очевидно, найдем числа, еще более удовлетворяющие условию равенства размахов от положения равновесия в ту и другую сторону; нуль e_0 весов, вычисленный как

$$e_0 = \frac{\frac{a_1 + a_3 + a_5}{3} + \frac{a_2 + a_4}{2}}{2},$$

будет еще ближе к положению истинного равновесия.

В случае, если размахи будут отсчитаны не от крайнего левого, а от среднего деления шкалы, то, само собой разумеется, что отсчетам, произведенным в разные стороны, следует приписывать разные знаки; обычно отрицательными считают отсчеты, произведенные в левую сторону.

Обыкновенно при определениях нуля весов ограничиваются наблюдением пяти последовательных качаний. При записывании наблюдаемых размахов левые размахи пишут в левом столбце, правые - в правом. Всегда берется одним качанием более в ту сторону, с которой начали наблюдения первого качания. Если по освобождении арретира размахи колебаний весов очень малы, то их увеличивают, производя над одной из чашек весов слабые взмахи листом бумаги, после чего пропускают несколько колебаний весов без наблюдений и затем уже начинают наблюдать. Части делений шкалы при колебании указателя оцениваются на глаз до десятых долей деления.

Одним определением нуля весов нельзя удовлетвориться, а надо сделать еще по крайней мере два и взять на ноль весов среднее арифметическое из всех определений. Зная точку нуля весов, можно приступить к определению их чувствительности.

Определение чувствительности весов. Если на одну чашку (правую) ненагруженных весов мы положим разновеску 1мГ, что достигается навешиванием рейтера на первое деление коромысла (при арретированных весах), и определим теперь из качаний положение равновесия (или остановку) весов так, как мы только что определяли ноль весов, то получим уже не прежнее число, а несколько иное, например e , которое укажет нам на перемещение положения равновесия весов на $(e - e_0)$ делений шкалы. Абсолютная величина этого перемещения и будет выражать чувствительность *ненагруженных* весов при перегрузке в 1мГ. Определив точку нуля весов и их чувствительность, приступают к взвешиванию.

Взвешивание. Всегда можно путем последовательного накладывания разновесок найти два числа a и $(a+1)$ граммов, между которыми будет заключаться вес взвешиваемого тела, если он целым числом граммов выражен быть не может. После этого кладут разновески, вес которых выражается в дециграммах, потом - в сантиграммах. Если вес тела целым числом сантиграммов выражен быть не может, то переходят к нагрузке весов миллиграммами, пользуясь рейтером. Передвигая его по коромыслу весов и ставя на деления, отмеченные цифрами, мы можем найти такие два последовательных деления, что помещение рейтера на одно из них даст общую нагрузку, все еще меньшую веса тела, а помещение на другое - большую.

Необходимо заметить, что при большой разнице в весе тела и положенных разновесок перевес одной из чашек наблюдается легко: коромысло весов при освобождении арретира тотчас накрывается в какую-нибудь сторону и *не колеблется*. При малой разнице в весе коромысло продолжает колебаться, и если нельзя во время качания заметить ясно, что размах указателя в одну сторону от найденной нулевой точки весов больше, чем в другую, то необходимо определить в таком случае из качаний точку равновесия весов, т.е. то деление шкалы, на которое указывала бы при

отсутствии трения стрелка, когда прекратились бы колебания коромысла. *Определение точки равновесия ведется точно так же, как определение нуля весов.* Прибегать к определению точки равновесия непременно приходится при употреблении рейтера. Смотря по тому, будет ли найденная точка равновесия весов лежать вправо или влево от точки нуля весов, мы можем указать, какая чашка весов перевешивает.

Пусть мы нашли два таких положения рейтера, отличающихся одно от другого на одно целое деление коромысла, т.е. 1мГ нагрузки, для которых соответствующие точки равновесия будут e_1 и e_2 , причем точка e_1 лежит правее найденного нуля весов, точка e_2 - левее (рис.2).

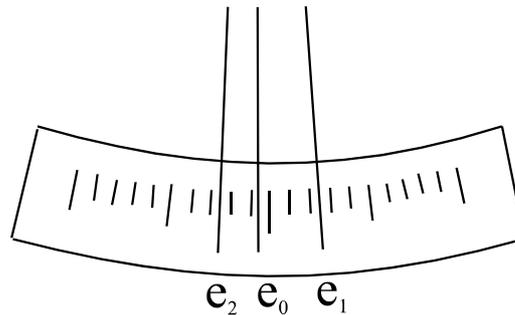


Рис.2.

Если взвешиваемое тело лежит на левой чашке весов, то, очевидно, что нагрузка, соответствующая положению указателя весов e_1 , меньше, чем вес тела, а нагрузка, вызывающая отклонение e_2 , - больше. Если вес разновесок при положении равновесия e_1 будет P мГ, то, очевидно, для приведения весов в нулевую точку e_0 надо на правую чашку весов добавить еще какие-то разновески, какие-то доли p мГ.

Предполагаем, что при малых углах отклонение указателя от нулевой точки пропорционально нагрузке, вызывающей отклонение. Это предположение позволит вычислить величину p . Положение e_1 отвечает разновесу P мГ, положение e_2 - разновесу $P+1$ мГ; следовательно, отклонение e_1-e_2 отвечает разновесу в 1 мГ. Величина e_1-e_2 , очевидно, будет *чувствительностью нагруженных весов*. Нам необходимо вычислить ту добавочную нагрузку p , которая наклонила бы коромысло весов и перевела связанный с ним указатель из положения e_1 в положение e_0 , т.е. сместила его на e_1-e_0 делений. Если 1 мГ вызывает отклонение на e_1-e_2 делений, то p мГ вызовут отклонение на e_1-e_0 делений, откуда

$$\frac{1}{p} = \frac{e_1 - e_2}{e_1 - e_0},$$

$$p = \frac{e_1 - e_0}{e_1 - e_2} \text{ мГ}$$

и *видимый вес тела*

$$Q = P + p.$$

Таким образом производится на точных весах взвешивание до десятых долей миллиграмма.

Если бы чувствительность весов была постоянна при всякой нагрузке, то не нужно было бы добиваться, как мы это только что делали, определения двух положений равновесия по обе стороны нуля весов. Достаточно было бы определить какое-нибудь одно положение равновесия и вычислить нужное для равновесия число миллиграммов. Но так как чувствительность с нагрузкой меняется, то определенная перед началом взвешивания чувствительность ненагруженных весов будет нам только помогать скорее определить, какие приблизительно надо прибавить разновески к уже положенным, чтобы скорее найти оба положения равновесия.

Если весы не имеют рейтера, то взвешивание с точностью до долей миллиграмма можно произвести следующим образом. Пусть на правую чашку положено столько разновеса, что весы находятся почти в равновесии, так что при освобождении коромысла стрелка не слишком удаляется от среднего деления шкалы. Допустим, что правая чашка еще немного легче левой. Определяем положение равновесия совершенно так же, как определяли нулевую точку. Обозначим найденное таким образом положение равновесия по-прежнему через e_1 , а положение нулевой точки – через e_0 . Теперь прибавляем на правую чашку 1 сГ и снова определяем положение равновесия, которое обозначим через e_2 . Следует делать так, чтобы e_1 и e_2 лежали по разные стороны e_0 , т.е. чтобы было: $e_1 > e_0 > e_2$. Очевидно, что $(e_1 - e_2)$ есть чувствительность весов на 1 сГ добавочной нагрузки. Вновь предполагая, что перемещение стрелки пропорционально добавочному грузу, вычисляем совершенно так же, как и в предыдущем случае, величину той нагрузки в миллиграммах, которая привела бы весы из положения e_1 к их нулевой точке e_0 , пользуясь той же формулой. Следует только помнить, что величина $(e_1 - e_2)$ в данном случае обозначает чувствительность 1 сГ, поэтому, переходя к миллиграммам, необходимо ввести множитель 10.

После окончания взвешивания необходимо вновь определить нулевую точку весов и при вычислении p пользоваться ее средним арифметическим.

Взвешивание необходимо произвести на правой и левой чашках весов (см. метод двойного взвешивания [5]).

Поправки на кажущуюся потерю веса тела в воздухе. При взвешивании в воздухе согласно закону Архимеда на тело действует выталкивающая сила, равная весу вытесненного им воздуха, вследствие чего тело как бы теряет в весе. Чтобы получить истинный вес тела, поступают следующим образом.

Пусть V будет объем взвешиваемого тела в кубических сантиметрах, v – объем разновесок, λ – вес 1 см³ воздуха в граммах (при температуре и давлении атмосферы, существующих во время взвешивания). При взвешивании в воздухе тело как бы теряет $V \cdot \lambda$ граммов, а разновески - $v \cdot \lambda$

граммов. Пусть P – истинный вес тела, а p – истинный вес разновесок, отмеченный на них цифрами. Тогда при равновесии в воздухе

$$P - V\lambda = p - v\lambda$$

или

$$P = p + (V - v)\lambda.$$

Пусть D есть истинный вес 1 см^3 взвешиваемого тела (численно равный плотности) а d – такая же величина для разновесок; тогда имеем

$$VD = P \text{ и } vd = p.$$

Подставляя найденные из этих соотношения значения V и v в предыдущее уравнение, получаем

$$P = p + \left(\frac{P}{D} - \frac{p}{d} \right) \lambda,$$

откуда, решая относительно P , находим

$$P = p \frac{1 - (\lambda/d)}{1 - (\lambda/D)}.$$

Производя деление числителя на знаменатель по правилам деления многочленов, получим

$$\frac{1 - (\lambda/d)}{1 - (\lambda/D)} = 1 - \frac{\lambda}{d} + \frac{\lambda}{D} - \frac{\lambda^2}{dD} + \frac{\lambda^2}{D^2} - \dots$$

Так как величины λ/d и λ/D всегда весьма малы, то можно отбросить все члены, начиная с λ^2/dD и дальше, и тогда последнее уравнение примет вид

$$P = p \left(1 - \frac{\lambda}{d} + \frac{\lambda}{D} \right). \quad (1)$$

Величина λ зависит от давления, температуры и влажности воздуха, но обычно ее считают постоянной и равной $0,0012 \text{ г/см}^3$, такая точность в большинстве случаев бывает достаточна. Разновески приготавливаются обычно из латуни, для которой $d = 8,4 \text{ г/см}^3$. Подставляя величины d и λ в уравнение (1), получаем

$$P = p + p \cdot 0,0012 \left(\frac{1}{D} - 0,12 \right),$$

где p обозначает неисправленный вес тела, т.е. полученный непосредственно из взвешивания, и P – его истинный вес, т.е. вес, приведенный к пустоте.

Разница между кажущимся и истинным весом не превышает $0,2\%$, поэтому на практике часто ограничиваются определением только кажущегося веса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Виды весов (динамические, технические, аналитические).
2. Правила обращения с весами (10 правил).
3. Нуль и чувствительность весов и их определение.

4. Взвешивание на весах.
5. Поправки на кажущуюся потерю веса тела в воздухе.
6. Особые методы взвешивания (Метод двойного взвешивания, метод тарирования и метод постоянной нагрузки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.63-75.
6. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М.:Высш.шк.,1970. С.39-45.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ ПИКНОМЕТРОМ

Принадлежности: 1) Весы с разновесами, 2) пикнометр, 3) сосуд с исследуемой жидкостью, 4) сосуд с дистиллированной водой, 5) фильтровальная бумага.

Плотностью называется масса, заключенная в единице объема какого-либо тела, поэтому определение плотности сводится к определению массы тела и его объема.

Удельным весом называется вес единицы объема тела. Легко видеть, что удельный вес d и плотность ρ любого тела связаны между собой соотношением $d=\rho g$, где g – ускорение силы тяжести, т.е. между удельным весом и плотностью имеется та же самая связь, что и между весом и массой тела.

Пикнометр в принципе представляет собой сосуд вполне определенного неизменного объема. Наполняя его последовательно исследуемой жидкостью и водой (с плотностью δ) и взвешивая, можно определить плотность жидкости. Действительно, пусть непоправленное на потерю веса в воздухе значение массы пикнометра с жидкостью будет P , масса его с водою Q и масса самого пикнометра – p . Тогда масса жидкости, заключенной в пикнометре, будет $P-p$, а масса воды $Q-p$. Плотность же (непоправленная) вследствие равенства объемов будет равна

$$\rho_1 = \frac{P-p}{Q-p} \delta. \quad (1)$$

Пикнометры, изготавливающиеся почти исключительно из стекла (вследствие его малой химической активности), имеют весьма разнообразные формы; некоторые из них изображены на рис. 1.

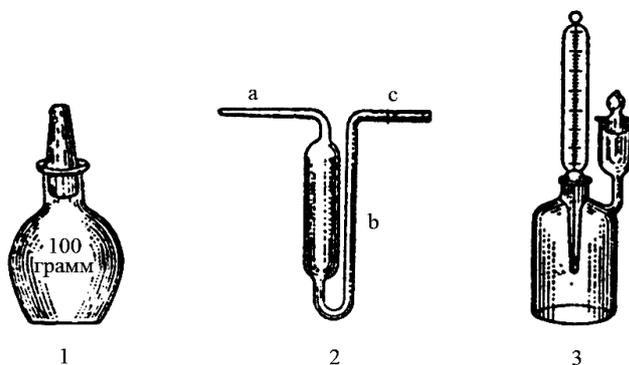


Рис. 1.

Наиболее простым является пикнометр первой формы, наполнение которого до верхнего края горлышка производится с помощью пипетки. Горлышко затем закрывается пришлифованной пробкой, имеющей узкий канал, через который излишняя жидкость сама вытекает. При наполнении нужно следить за тем, чтобы внутри пикнометра не оставалось пузырьков воздуха, для чего лучше всего заставлять жидкость стекать в пикнометр по его стенкам. После этого пикнометр должен быть тщательно высушен снаружи при помощи фильтровальной бумаги; при этом особое внимание следует обратить на то, чтобы удалить всю жидкость из зазора между горлышком и пробкой. Возможность испарения жидкости через открытый конец канала является до некоторой степени недостатком этой формы пикнометра. Для устранения этого иногда на пробке пикнометра, приблизительно посередине, наносят метку, на уровне которой должна устанавливаться жидкость.

Гораздо удобнее пикнометр второй формы. Удобство заключается в особой простоте его наполнения, которое производится путем всасывания жидкости через узкий конец трубки *a* до метки *c* в трубке *b*. Если будет набрано слишком много жидкости, то излишек удаляется прикладыванием к отверстию трубки *a* кусочка фильтровальной бумаги; если слишком мало, то подносят к этому же отверстию *a* на кончике стеклянной палочки каплю жидкости; капиллярные силы сами втягивают ее внутрь.

Однако оба эти типа пикнометров обладают тем общим недостатком, что объем их зависит вследствие расширения стекла от температуры. Ошибка, возникающая при этом, может быть устранена, если пикнометры перед взвешиванием поместить на некоторое время (минут на 10-20 в зависимости от объема) в стакан воды комнатной температуры и после этого пополнить или убавить количество жидкости в зависимости от изменения объема.

Наиболее совершенной является третья форма пикнометров. Наличие пробки, закрывающей узкое горло сосуда, и термометра, позволяющего учитывать изменение его объема, устраняет недостатки, присущие первым двум формам.

Измерения. 1. Определяют не поправленное значение массы p высушенного внутри и снаружи пикнометра (просушивание производится либо продуванием струи горячего воздуха, либо нагреванием всего пикнометра в сушильном шкафу).

2. Определяют массу Q пикнометра, наполненного дистиллированной водой.

3. Определяют массу P пикнометра, наполненного исследуемой жидкостью.

Вычисления. Приведенная выше формула (1), примененная к полученным данным, даст так называемую непоправленную плотность жидкости, так как в ней не учитываются потери веса в воздухе.

Выведем точную формулу, учитывающую это обстоятельство. Обозначим через v внутренний объем пикнометра (его емкость) при температуре опыта, δ – плотность воды при той же температуры (находится из таблиц), ρ – истинную плотность исследуемой жидкости, λ – плотность воздуха, которая принимается равной $0,0012 \text{ г/см}^3$, Δ – плотность разновесок; тогда $v\rho$ будет истинная масса жидкости, заключенной в пикнометре, $v\delta$ – истинная масса воды в том же объеме, $v\lambda$ – масса воздуха, вытесняемого жидкостью и водой, $(P-p)\lambda/\Delta$ (или $(Q-p)\lambda/\Delta$) – масса воздуха, вытесняемого разновесками, уравновешивающими жидкость. На основании факта равновесия имеем

$$v\rho - v\lambda = P - p - \frac{P - p}{\Delta} \lambda$$

или

$$v(\rho - \lambda) = (P - p) \left(1 - \frac{\lambda}{\Delta} \right). \quad (2)$$

Для воды же соответственно

$$v(\delta - \lambda) = (Q - p) \left(1 - \frac{\lambda}{\Delta} \right). \quad (3)$$

Деля почленно равенства (2) и (3), получим

$$\frac{\rho - \lambda}{\delta - \lambda} = \frac{P - p}{Q - p},$$

откуда

$$\rho = \rho_1 \left(1 - \frac{\lambda}{\delta} \right) + \lambda. \quad (4)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Масса и вес. Изменяются ли они в воздухе и воде, на Земле и на Луне?
2. Плотность и удельный вес. Связь между ними. Единицы их измерения.
3. Законы гидростатики (Законы Паскаля и Архимеда).
4. Пикнометры.
5. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.75-82.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ВЗВЕШИВАНИЕМ

Принадлежности: 1) весы, 2) разновес, 3) скамеечка к весам, 4) твердое тело, плотность которого определяется, 5) стеклянный цилиндр, 6) тонкая проволока, 7) сосуд с дистиллированной водой.

Плотностью называется масса, заключенная в единице объема какого-либо тела, поэтому определение плотности сводится к определению массы тела и его объема. Определение *массы* тела может быть произведено путем его взвешивания, т.е. путем сравнения с массой разновесок известной величины. Непосредственное измерение *объема* тела, если оно ограничено сложной поверхностью, затруднительно, поэтому поступают так: тело взвешивают в воде и, пользуясь законом Архимеда, определяют массу воды, вытесненную телом; зная плотность воды, вычислением находят объем. Плотность воды соответствующей температуры берется из табличных данных. Взвешивание погруженного в жидкость тела называется *гидростатическим*.

Удельным весом называется вес единицы объема тела. Легко видеть, что удельный вес d и плотность ρ любого тела связаны между собой соотношением $d=\rho g$, где g – ускорение силы тяжести, т.е. между удельным весом и плотностью имеется та же самая связь, что и между весом и массой тела.

Упражнение 1. Определение плотности тонущего тела

Измерения. Взвешивают исследуемое тело в воздухе с точностью до 1 мг (см. лабораторную работу № 3), а потом, подвесив его на тонкой проволоке надлежащей длины на крючок левой чашки весов, опять уравнивают гири. Обозначим неисправленное значение массы исследуемого тела через m , а через m_1 – его массу вместе с проволокой.

Ставя затем на скамеечку сосуд с достаточным количеством дистиллированной воды, при арретированных весах погружают в него испытуемое тело (рис.1). При этом наблюдают, во-первых, чтобы тело не касалось стенок и дна стакана, во-вторых, через поверхность воды проходила только одна не перекрученная (для уменьшения капиллярного действия) проволока и, наконец, чтобы не было на поверхности тела прилипших пузырьков воздуха. Сняв часть гирек с другой чашки весов, приводят весы в равновесие. Пусть кажущаяся масса тела с проволокой при погружении в воду будет m_2 . Таким образом, масса вытесненной телом воды ($m_1 - m_2$); тогда непоправленная плотность тела будет равна

$$\rho_1 = \frac{m}{m_1 - m_2} \delta.$$

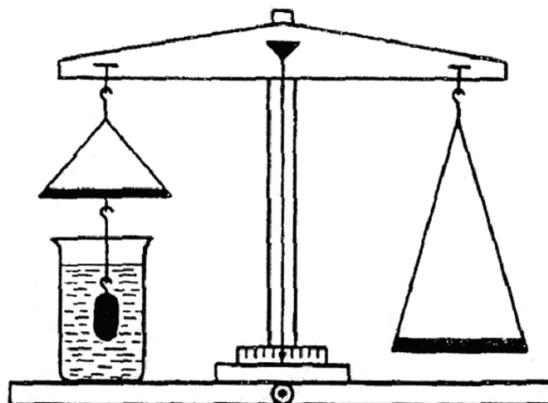


Рис.1.

Вычисления. Полученная плотность должна быть исправлена, так как не принята в расчет кажущаяся потеря веса тела и воды в воздухе. Если при температуре взвешивания плотность воды равна δ , плотность воздуха – λ , то, очевидно, для исправленной величины плотности ρ тела следует написать, что

$$\rho = \frac{m + V\lambda}{m_1 - m_2 + V\lambda} \delta,$$

где V есть объем тела, равный объему вытесненной им воды. Величина этого объема определится из уравнения

$$m_1 - m_2 = V(\delta - \lambda).$$

Таким образом, поправленная плотность ρ тела равна

$$\rho = \frac{m + \frac{(m_1 - m_2)\lambda}{\delta - \lambda}}{m_1 - m_2 + \frac{(m_1 - m_2)\lambda}{\delta - \lambda}} \delta = \frac{m}{m_1 - m_2} (\delta - \lambda) + \lambda.$$

Поправкой на потерю веса проволоки в воде ввиду ее малости можно пренебречь.

Упражнение 2. Определение плотности плавающего тела

Измерения. 1. Подвесив тело на тонкой проволоке, определяют его массу q в воздухе.

2. Его привязывают к тонущему телу, плотность которого определяли в «Упражнении 1», и определяют их общую массу $M_1 = q + m_1$ в воздухе.

3. Погружают оба тела в воду и определяют их общую массу M_2 в воде. Таким образом, масса вытесненной телами воды ($M_1 - M_2$); зная массу воды, вытесненной тонущем телом - $(m_1 - m_2)$ (см. Упражнение 1), можно найти массу воды, вытесненной плавающим телом - $[(M_1 - M_2) - (m_1 - m_2)]$, тогда плотность тела будет равна

$$\rho = \frac{q}{(M_1 - M_2) - (m_1 - m_2)} (\delta - \lambda) + \lambda.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Масса и вес. Изменяются ли они в воздухе и воде, на Земле и на Луне?
2. Плотность и удельный вес. Связь между ними. Единицы их измерения.
3. Законы гидростатики (Законы Паскаля и Архимеда).
4. Гидростатическое взвешивание. Правила взвешивания.
5. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1989. 576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.75-82.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛ

Принадлежности: 1) специальная установка, 2) стальные шарики.

Теория метода и описание установки. При небольших высотах падение стального шарика диаметром 2-3 см можно практически считать свободным, так как в этом случае можно принять ускорение силы тяжести постоянным и сопротивлением воздуха пренебречь.

В таком случае падение шарика будет происходить по законам равноускоренного движения без начальной скорости. Если шарик отпустить с некоторой высоты h , то

$$h = \frac{gt^2}{2},$$

где h – высота падения шарика, g – ускорение силы тяжести, t – время падения шарика. Отсюда

$$g = \frac{2h}{t^2}.$$

Эта формула будет расчетной для определения ускорения силы тяжести.

Установка для проведения опыта (рис.1) состоит из вертикальной штанги со шкалой. К верхней обойме на штанге прикреплен электромагнит M , который служит для удерживания стального шарика, а к нижней – ловушка X с контактной заслонкой. При включении электромагнита загорается лампа L . Время полета шарика отсчитывается по электросекундомеру типа ПВ-53Л с точностью до 0,01 с. Запуск секундомера производится автоматически в момент отрыва шарика от электромагнита M . При ударе шарика на контактную заслонку секундомер автоматически выключается. Устанавливая электромагнит на различную высоту вдоль штанги, можно изменять высоту падения шарика.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Ознакомиться с установкой и порядком включения приборов. Установить электромагнит M в нужной высоте. Проверить попадание стального шарика на ловушку при его падении.

Порядок включения приборов следующий: а) включают в розетку электросекундомер ПВ-53Л; б) ключ K ставят в положение вверх – включается электромагнит; в) подносят стальной шарик к электромагниту, который будет удерживать шарика; г) рукояткой $П$ секундомер устанавливает в нулевое положение; д) ключ K ставят в положение вниз – происходит отключение электромагнита (шарик падает) и включение секундомера.

Первый раз все включения произвести под наблюдением преподавателя или лаборанта. Не следует держать включенным электромагнит более одной минуты.

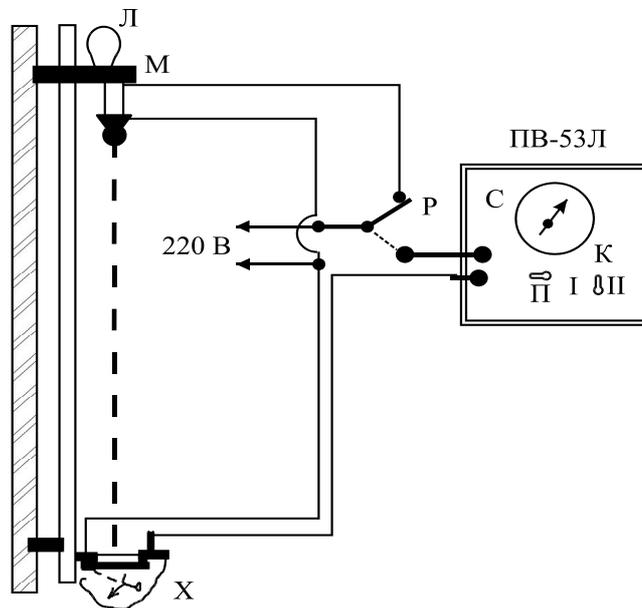


Рис.1.

2. Устанавливая электромагнит на различных высотах, производят наблюдения t для каждой высоты h .

3. По полученным результатам измерений вычисляют ускорение силы тяжести.

4. Строят график, откладывая по оси абсцисс t^2 , а по оси ординат h . Что будет представлять собой этот график?

Все результаты вычислений заносят в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называется свободным падением?
2. Что такое ускорение?
3. Почему ускорение силы тяжести не одинаково в различных точках земной поверхности?
4. Почему два небольших диска одинакового диаметра - картонный и металлический - падают в воздухе с различными скоростями?
5. Как убедиться на опыте, что ускорение свободного падения не зависит от размеров и формы тел?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.

2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М.:Высш.шк.,1970. С.51-53.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВОГО КОЛЕСА И СИЛЫ ТРЕНИЯ В ОПОРЕ

Принадлежности: прибор, состоящий из махового колеса, укрепленного на стене, масштабная линейка, штангенциркуль, секундомер, шнурок с грузом.

Теория метода и описание установки. Момент инерции махового колеса и силу трения вала в опоре можно определить при помощи прибора, изображенного на рис. 1. Прибор состоит из махового колеса, насаженного на вал. Вал установлен на шарикоподшипниках $П_1$ и $П_2$.

Маховое колесо приводится во вращательное движение грузом. Груз на какой-то высоте h_1 обладает потенциальной энергией mgh_1 , где m - масса груза.

Если предоставить возможность грузу падать, то потенциальная энергия mgh_1 перейдет в кинетическую энергию поступательного движения груза $mv^2/2$, кинетическую энергию вращательного движения прибора $J\omega^2/2$ и на работу $A=fh_1$ по преодолению силы трения f в опоре.

По закону сохранения энергии

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + fh_1, \quad (1)$$

где f - сила трения.

Движение груза равноускоренное без начальной скорости, поэтому ускорение a и скорость v соответственно равны:

$$a = \frac{2h_1}{t^2}, \quad v = \frac{2h_1}{t}, \quad (2)$$

где t - время опускания груза с высоты h_1 .

Найдем угловую скорость махового колеса по формуле

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h_1}{tr}, \quad (3)$$

где r - радиус вала.

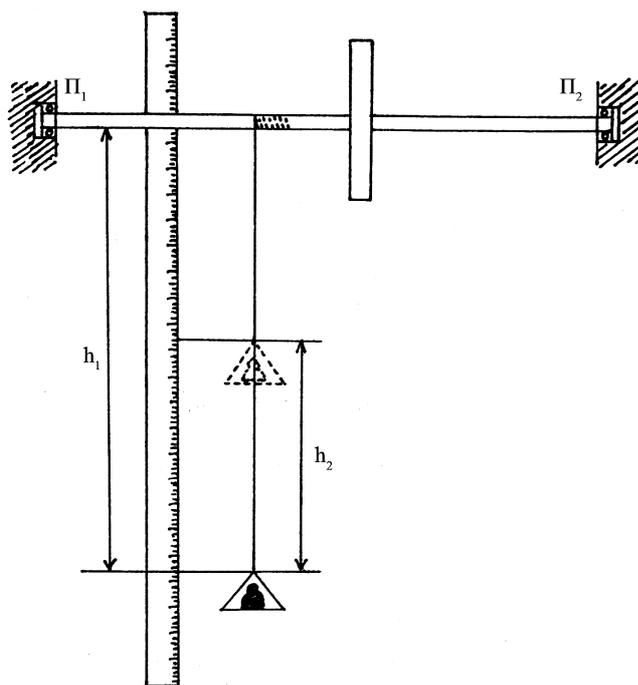


Рис.1.

Сила трения f вычисляется следующим образом. Колесо, вращаясь по инерции, поднимает груз на высоту $h_2 < h_1$ и потенциальная энергия груза на высоте h_2 будет mgh_2 .

Уменьшение потенциальной энергии при подъеме груза равно работе по преодолению силы трения в опорах Π_1 и Π_2 , т.е.

$$mgh_1 - mgh_2 = f(h_1 + h_2).$$

Откуда

$$f = mg \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \quad (4)$$

Подставляя в формулу (1) значения v , ω и f из (2), (3) и (4) получим окончательное выражение для вычисления момента инерции махового колеса:

$$J = mr^2 \left(gt^2 \frac{h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right). \quad (5)$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Наматывают на вал шнур и поднимают груз до высоты h_1 .

2. Опускают груз и измеряют время падения груза с высоты h_1 с помощью секундомера.

3. Определяют высоту h_2 , на которую поднимается груз после опускания.

4. Путем взвешивания определяют массу груза m , штангенциркулем измеряют радиус вала r и по формулам (5) и (4) вычисляют момент инерции махового колеса и силу трения в опоре.

Полученные результаты сводятся в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вращательное движение твердого тела. Угловая скорость, угловое ускорение и их направления.
2. Момент силы и его направление. Момент инерции. Теорема Штейнера.
3. Основной закон динамики вращательного движения. Закон сохранения момента импульса.
4. Работа и кинетическая энергия вращательного движения.
5. Вывод рабочей формулы.
6. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1989. 576 с.
5. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М.: Высш.шк., 1970. С.45-60.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ШТЕЙНЕРА МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ (МЕТОД ТРИФИЛЯРНОГО ПОДВЕСА)

Принадлежности: 1) трифилярный подвес, 2) секундомер, 3) штангенциркуль, 4) образцы для измерения.

Теория метода. Трифилярный подвес (рис.1) осуществлен так: круглая платформа подвешена на трех симметрично расположенных нитях, укрепленных у краев этой платформы. Наверху этой нити также симметрично прикреплены к диску несколько меньшего диаметра, чем диаметр платформы. Платформа может совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси, перпендикулярной к ее плоскости и проходящей через ее середину; центр тяжести платформы при этом перемещается по оси

вращения. Период колебаний определяется величиной момента инерции платформы; он будет другим, если платформу нагрузить каким-либо телом; этим и пользуются в настоящей работе.

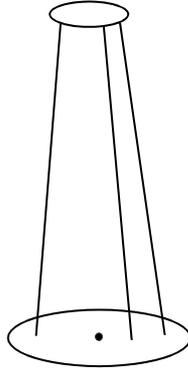


Рис.1.

Если платформа массы m , вращаясь в одном направлении, поднялась на высоту h , то приращение потенциальной энергии будет равно

$$E_1 = mgh,$$

где g - ускорение силы тяжести. Вращаясь в другом направлении, платформа придет в положение равновесия с кинетической энергией, равной

$$E_2 = \frac{1}{2} J \omega_0^2,$$

где J - момент инерции платформы, ω_0 - угловая скорость платформы в момент достижения ею положения равновесия. Пренебрегая работой сил трения, на основании закона сохранения механической энергии имеем

$$\frac{1}{2} J \omega_0^2 = mgh. \quad (1)$$

Считая, что платформа совершает гармонические колебания, можем написать зависимость углового смещения платформы от времени в виде

$$\beta = \alpha \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где β - угловое смещение платформы, α - амплитуда смещения, T - период колебания, t - текущее время. Угловая скорость ω , являющаяся первой производной β по времени, выражается так:

$$\omega = \frac{d\beta}{dt} = \frac{2\pi\alpha}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

В момент прохождения через положение равновесия ($t=0, T/2, T, 3T/2$ и т.д.) абсолютное значение этой величины будет

$$\omega_0 = \frac{2\pi\alpha}{T}. \quad (2)$$

На основании выражений (1) и (2) имеем

$$mgh = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2. \quad (3)$$

Если l - длина нитей подвеса, R - расстояние от центра платформы до точек крепления нитей на ней, r - радиус верхнего диска, то легко видеть (рис.2), что

$$h = OO_1 = BC - BC_1 = \frac{(BC)^2 - (BC_1)^2}{BC + BC_1}.$$

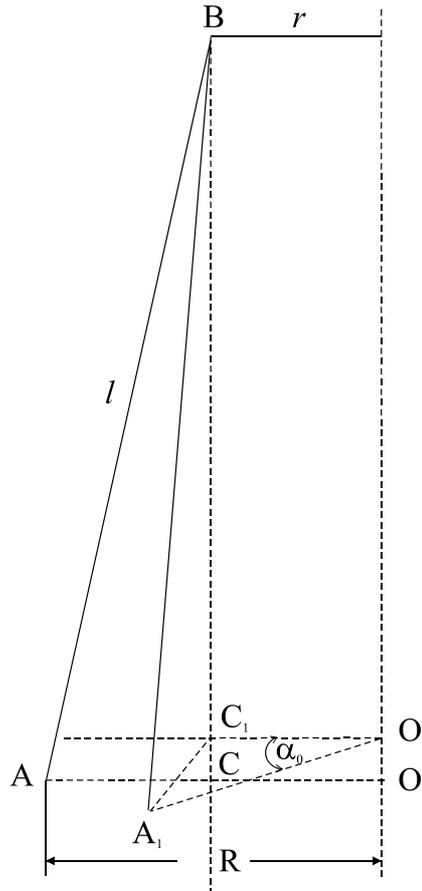


Рис.2.

Так как

$$\begin{aligned} (BC)^2 &= (AB)^2 - (AC)^2 = l^2 - (R-r)^2, \\ (BC_1)^2 &= (BA_1)^2 - (A_1C_1)^2 = l^2 - (R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha), \end{aligned}$$

то

$$h = \frac{2Rr(1 - \cos \alpha)}{BC + BC_1} = \frac{4Rr \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{BC + BC_1}.$$

При малых углах отклонения α значение синуса этого угла можно заменить просто значением α , а величину знаменателя положить равной $2l$. Учитывая это, получаем

$$h = \frac{Rr\alpha^2}{2l}.$$

Тогда на основании (3)

$$mg \frac{Rr\alpha^2}{2l} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2,$$

откуда

$$J = \frac{mgRr}{4\pi^2 l} T^2. \quad (4)$$

По формуле (4) может быть определен момент инерции и самой платформы, и тела, положенного на нее, так как все величины в правой части формулы могут быть непосредственно измерены.

Вращательный импульс, необходимый для начала крутильных колебаний, сообщается платформе путем поворота верхнего диска вокруг его оси при помощи натяжения шнура, приводящего в движение рычажок, связанный с диском. Этим достигается почти полное отсутствие других некрутильных колебаний, наличие которых затрудняет измерения.

Для удобства отсчета колебаний на нижней платформе имеется метка, против которой при покоящейся платформе устанавливается указатель – стержень на подставке.

Измерения. Сначала определяют по формуле (4) момент инерции пустой платформы J_0 . Так как величины l , R , r и масса платформы m_0 даются как постоянные прибора, то определяют только время периода колебаний пустой платформы T_0 . Для этого сообщают платформе вращательный импульс и при помощи секундомера измеряют время некоторого числа (50-100) полных колебаний, что дает возможность достаточно точно определить величину периода T_0 .

После этого платформу нагружают исследуемым телом, масса которого должна быть предварительно определена путем взвешивания, и вновь определяют период колебания T всей системы. Затем, пользуясь формулой (4), вычисляют момент инерции J_1 всей системы, принимая ее массу m равной сумме масс тела и платформы. Величина момента инерции тела J определяется как разность $J=J_1 - J_0$.

При помощи трифилярного подвеса может быть проверена и *теорема Штейнера*, для чего необходимо иметь два совершенно одинаковых тела. Сначала определяют момент инерции этих тел, положив их одно на другое в середине платформы.

Затем оба тела располагают симметрично на платформе и определяют их момент инерции при таком расположении. Половина этой величины и

будет давать момент инерции одного тела, находящегося на фиксированном расстоянии от оси вращения. Зная это расстояние, массу тела и момент инерции тела, положенного в центре платформы, можно проверить указанную теорему.

Тела на платформу необходимо класть строго симметрично так, чтобы не было перекоса платформы, для чего на платформе нанесены концентрические окружности на определенном расстоянии друг от друга. При измерениях недопустимо пользоваться амплитудами колебаний, большими $5-6^\circ$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вращательное движение твердого тела. Угловая скорость, угловое ускорение и их направления.
2. Момент силы и его направление. Момент инерции. Теорема Штейнера.
3. Основной закон динамики вращательного движения. Закон сохранения момента импульса.
4. Работа и кинетическая энергия вращательного движения.
5. Вывод рабочей формулы.
6. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.95-98.

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА МЕТОДОМ ЛЕРМОНТОВА

Принадлежности: 1) прибор Лермонтова, 2) зрительная труба, 3) шкала, 4) микрометр, 5) линейка.

Теория метода и описание прибора. Под влиянием груза $P=mg$, где m – масса груза, проволока или стержень длиной l_0 и поперечного сечения $S=\pi d^2/4$, где d – диаметр проволоки, растягивается (или укорачивается) на величину Δl . По закону Гука

$$\Delta l = k \frac{Pl_0}{S} = k \frac{4mgl_0}{\pi d^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент упругости при растяжении (сжатии), или коэффициент продольного удлинения (сжатия). Модуль упругости при растяжении, или модуль Юнга, равен

$$E = \frac{1}{k} = \frac{4mgl_0}{\pi d^2 \Delta l}. \quad (2)$$

В данной работе модуль Юнга измеряется при помощи прибора Лермонтова. Прибор Лермонтова состоит из двух кронштейнов A и B (рис.1), расположенных один над другим и служащих для укрепления проволоки из исследуемого материала. При нагрузке, осуществляемой грузами PP , проволока удлиняется и стержень r , несущий зеркальце M и опирающийся на цилиндр d , вращается вокруг оси O .

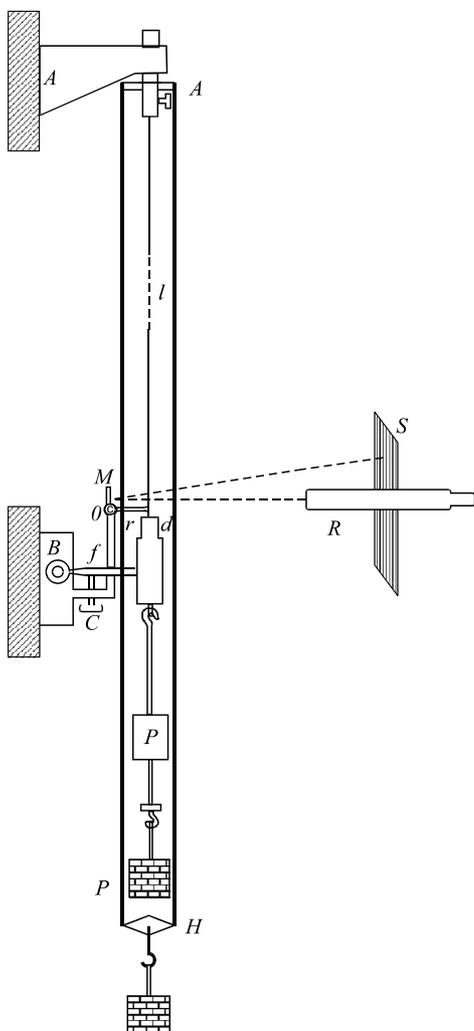


Рис.1.

При удлинении проволоки на Δl зеркальце повернется на угол α и будет иметь место соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta l}{r},$$

где r – длина стержня. Изменение положения зеркальца может фиксироваться по шкале S , изображение которой рассматривают в зеркальце через зрительную трубу R , имеющую в окуляре крест нитей или одну горизонтальную нить. Если Δn – разность делений шкалы при повороте зеркальца на угол α , а R – расстояние от зеркала до шкалы, то можно написать

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\Delta n}{R}.$$

Так как величина Δl очень мала, то очень мал и угол α ; и $\operatorname{tg} 2\alpha = 2\operatorname{tg} \alpha$. Сопоставлением полученных формул получаем

$$\Delta l = \frac{\Delta n \cdot r}{2R}. \quad (3)$$

Нижний кронштейн B имеет арретир f , пользуясь которым, ввертывая винт c , можно освобождать проволоку от нагрузки. Грузы, необходимые для нагрузки проволоки, берут с особого подвеса, укрепленного на верхнем кронштейне; при снятии нагрузки грузы укладывают на подвес. Этим достигается постоянство нагрузки на верхний кронштейн и тем самым – постоянство прогиба последнего. Нагрузку проволоки и снятие нагрузки нужно всегда производить при поднятом арретире.

Измерения. Длина проволоки l_0 измеряется линейкой при опущенном арретире, а ее диаметр d – микрометром. Измерение диаметра проволоки следует сделать несколько раз в разных местах и из полученных значений взять среднее арифметическое.

Сначала проволоку нагружают половиной имеющихся грузов, находят в зрительной трубе изображение шкалы, фокусируют трубу, а шкалу устанавливают так, чтобы была видна ее середина. Затем измеряют линейкой расстояние R между зеркалом и шкалой (и уже больше не сдвигают ни шкалу, ни трубу). После этого, подняв арретир, снимают все грузы, и, опустив арретир, отмечают нулевую точку n_0 на шкале.

Последовательно нагружая проволоку грузами один за другим (на каждом из них указан его масса), производят отсчеты делений шкалы, наблюдаемых в трубу, и заключают, на сколько делений перемещается изображение шкалы. Так делают для всех грузов, снимая их с подвеса, а после этого так же последовательно идут в обратном порядке, снимая грузы и перекладывая их на подвес.

Если нулевая точка не совпадает с прежней, берут среднее значение из двух показаний; так же поступают с каждыми двумя отсчетами, получаемыми при одинаковых нагрузках.

Необходимо построить график изменения удлинения проволоки с изменением величины нагрузки и убедиться, что имеет место линейная зависимость (закон Гука).

Произведенные измерения дают возможность определить удлинение проволоки Δl по формуле (3) (величина r дается как постоянная прибора) и затем величину модуля упругости (модуля Юнга) по формуле (2) для каждой нагрузки. Истинное значение E получается как среднее арифметическое из отдельных значений E .

Результаты измерений и вычислений:

$l_0 =$ _____ м; $d =$ _____ м; $r =$ _____ м; $R =$ _____ м; $n_0 =$ _____ м;
 $\pi = 3,14$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

№	m (кг)	n (м)	$\Delta n = n - n_0$ (м)	Δl (м)	E (Па)	ΔE (Па)	N (%)
1							
2							
3							
Среднее значение							

Окончательный результат записывают в виде $E = E_{\text{ср}} \pm \Delta E_{\text{ср}}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Порядок выполнения работы.
2. Деформации твердого тела. Виды деформаций.
3. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
4. Каков физический смысл модуля Юнга?
5. Дайте объяснение качественной диаграммы напряжений. Что такое пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. СПб.: Лань, 2005. 560 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Физматлит, 2005. 560 с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. 352 с.

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ КРУЧЕНИЯ И СДВИГА СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Принадлежности: 1) Экспериментальная установка, 2) зрительная труба, 3) масштабная шкала, 4) грузы, 5) линейка или рулетка, 6) микрометр или штангенциркуль.

Если проволоку или стержень, закрепленные с одного конца, закручивать, прилагая к другому концу пару сил PP с моментом, равным M , то угол кручения по закону Гука оказывается равным $\varphi=cM$, где c – коэффициент, зависящий от вещества проволоки. Модуль кручения f , равный

$$f = \frac{1}{c} = \frac{M}{\varphi}, \quad (1)$$

показывает, какой момент нужно приложить, чтобы закрутить проволоку на угол в один радиан.

Модуль сдвига G равен

$$G = \frac{P}{S\alpha}, \quad (2)$$

где P/S определяет величину касательного усилия на единицу поверхности, а α – угол сдвига.

Между модулем кручения f и модулем сдвига G материала проволоки существует простое соотношение

$$f = \frac{G\pi r^4}{2L}, \quad (3)$$

где r – радиус цилиндрической проволоки, а L – длина ее.

Измерение модуля кручения может быть выполнено статическим или динамическим методом. В первом случае измеряется угол закручивания проволоки под действием определенного закручивающего момента. Во втором случае измеряется период крутильных колебаний маятника, подвешенного на исследуемой проволоке. Рассмотрим первый метод.

Экспериментальная установка изображена на рис.1. Верхний конец вертикального стержня C жестко закреплен на стойке, а нижний соединен с диском D . Момент M , закручивающий стержень, создают навитые на диск и перекинутые через блоки нити, к концам которых подвешиваются одинаковые грузы P . Диск снабжен зеркалом K . Для определения угла закручивания стержня нужно зрительную трубу Z направить на зеркальце и добиться того, чтобы в ней четко было видно отражение шкалы N , укрепленной на том же штативе, что и труба. Наблюдая в трубу за смещением видимого участка шкалы при закручивании стержня, можно определить угол закручивания φ .

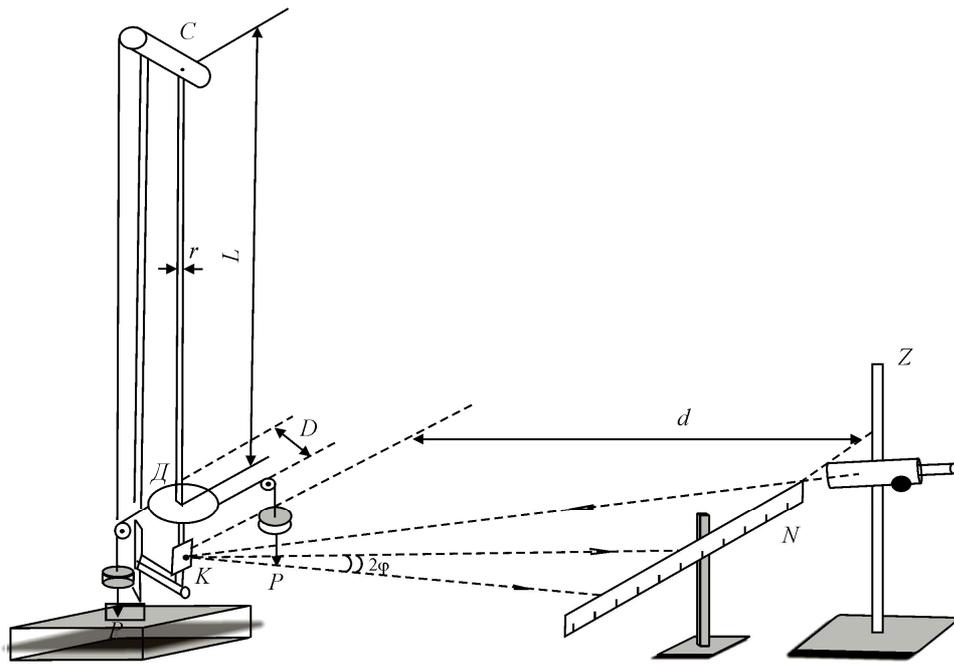


Рис.1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Пользуясь отвесом, установить штангу прибора вертикально.
2. Установить зрительную трубу Z таким образом, чтобы в нее было четко видно отражение шкалы N в зеркальце K .
3. Записывают нулевой отсчет n_0 , т.е. деление шкалы, на которое приходится нить зрительной трубы до подвешивания грузов. Нагружая нити грузами, записывают отсчет по шкале n , соответствующей новому положению равновесия (веса грузов на обе нити должны быть между собой равны), и затем, сняв грузы, вновь производят нулевой отсчет n_0 . Подобные измерения повторяют для двух, трех и т.д. грузов, каждый раз, предварительно определяя нулевой отсчет. Прделав измерения с максимальным грузом, повторяют измерения в обратном порядке, постепенно уменьшая величину грузов. За угол закручивания, соответствующий тому или иному грузу, берут среднее значение из измерений в одном и в другом направлениях.
4. Момент пары сил M рассчитывается как произведение нагрузки одной из нитей P на диаметр D диска D :

$$M = P \cdot D. \quad (4)$$

5. Угол поворота зеркальца K находят, принимая во внимание закон отражения света, из соотношения:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\Delta n}{d}, \quad (5)$$

где φ - угол между прежним и новым направлением отраженного луча, $\Delta n = (n - n_0)$ - число делений, на которое переместился зайчик по шкале, d - расстояние от шкалы до зеркала. Так как угол отклонения φ мал (не более 5°), $\operatorname{tg} 2\varphi$ в формуле (4) можно заменить дугой, т.е. положить

$$\varphi = \frac{\Delta n}{2d}. \quad (6)$$

6. Результаты измерений изобразить графически в координатах (φ, M) . При помощи этих графиков и по формуле (1) определить величину f и оценить допущенную при этом погрешность. Вычисляют модуль кручения для каждой нагрузки. Сравнивая значения модуля кручения, полученные при различных моментах сил, убеждаются, что все они имеют приблизительно одинаковое значение, т.е. в пределах применявшихся нагрузок закон Гука выполняется.
7. Промерив все входящие в формулу (3) величины, вычисляют модуль сдвига G . Измерение диаметра стержня следует произвести в нескольких местах микрометром или штангенциркулем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Деформации твердого тела.
2. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
3. Виды деформаций: растяжение, сдвиг, кручение, изгиб.
4. Вывод рабочей формулы.
5. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1989. 576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.87-92.

Лабораторная работа № 11

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Принадлежности: 1) небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити, 2) линейка (прямоугольный треугольник), 3) секундомер, 4) штангенциркуль.

Математический маятник – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити (рис.1).

Период малых колебаний математического маятника выражается формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где T - период колебаний, l - длина маятника, g - ускорение силы тяжести. Таким малым отклонением, при котором допущенная ошибка ничтожно мала, можно считать угол отклонения в несколько градусов (5-6°).

Упражнение 1. Изучение зависимости периода колебаний маятника от амплитуды

Возьмем маятник длиной в 80-100 см и поместим рядом с ним горизонтально масштабированную линейку. Отклонив маятник приблизительно на 5 см, измерим секундомером t время $N=20-50$ колебаний. По формуле $T=t/N$ вычисляем период колебаний. Изменяя амплитуду, т.е. отклоняя маятник приблизительно на 10 см и затем на 15 см, каждый раз определяем период колебаний. Результаты заносятся в таблицу.

Результаты будут показывать, что при небольших отклонениях период колебаний не зависит от амплитуды.

Эти наблюдения можно дополнить колебаниями с большой амплитудой. В этом случае период определяется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right).$$

Упражнение 2. Изучение зависимости периода колебаний маятника от его длины

Берется маятник длиной в 100-110 см. Его длина измеряется следующим образом: угольник прикладывается одним катетом к стойке, на

которой укреплен масштаб, и прикладывается к маятнику так, чтобы другой катет касался маятника (рис.1). Таким образом, мы найдем деление масштаба, соответствующее нижней точке шарика. Из этой длины следует вычесть радиус шарика. Для нахождения радиуса шарика его диаметр измеряется штангенциркулем. Определив время 50-100 колебаний, вычислим период колебаний маятника. Уменьшим длину маятника сначала вдвое, а потом вчетверо и каждый раз определим период. Результаты заносятся в таблицу.

Результаты покажут, что период колебаний маятника пропорционален корню квадратному из его длины.

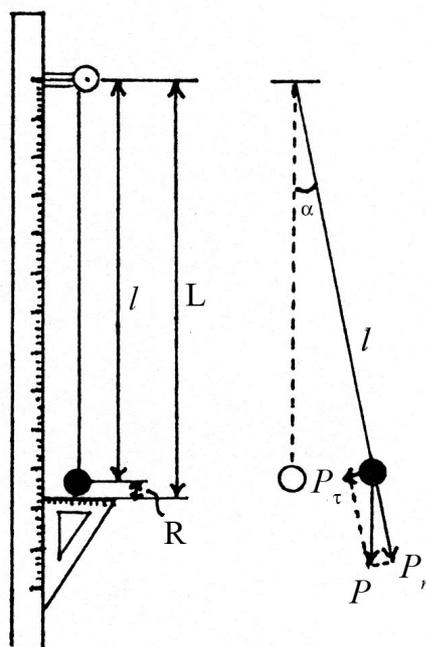


Рис.1

Упражнение 3. Определение ускорения силы тяжести математическим маятником

Из формулы (1) для величины g получаем выражение

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

Непосредственное измерение длины маятника представляет собой довольно сложную задачу, так как приходится определять положение центра тяжести шарика и точку подвеса. Поэтому поступают так: берут маятник произвольной длины и определяют период колебаний:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}.$$

Затем укорачивают его и, измерив длины маятника, вновь определяют период колебания:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}.$$

Вычтя из первого выражения второе и решив уравнение относительно g , получаем:

$$g = 4\pi^2 \frac{l_1 - l_2}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (2)$$

Таким образом, нет необходимости измерять длину маятника, достаточно определить разность длины.

При выполнении работы, прежде всего, определяют положение какой-либо точки шарика маятника, приложив один катет прямоугольного треугольника к шкале так, чтобы другой его катет касался шарика (рис.1). Затем отклонив маятник на малый угол, определяют время 80-100 колебаний и вычисляют период колебаний маятника T_1 . Опыт следует повторить несколько раз и взять среднюю арифметическую величину.

Затем укорачивают маятник на 20-30 см, вновь определяют положение той же точки шарика и вычисляют разность между первым и вторым положениями. Как и раньше, определяют период колебания T_2 укороченного маятника. По формуле (2) вычисляют ускорение силы тяжести. Результаты заносятся в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Математический маятник. Вывод формулы периода колебания математического маятника.
2. Зависимость периода больших колебаний от амплитуды.
3. Чему равна длина маятника?
4. От каких факторов зависит ускорение силы тяжести?
5. Какими методами можно определить ускорение силы тяжести?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.54-62.

Лабораторная работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Принадлежности: набор пружин и грузов, секундомер.

В данной работе рассматривают простейший случай собственных незатухающих колебаний пружинного маятника, а именно колебания груза на пружине. В воздухе эти колебания можно считать незатухающими. Уравнение таких колебаний имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0$$

или

$$F = -kx,$$

где k – коэффициент упругости или жесткость пружины.

Коэффициент k можно определить опытным путем, если измерить величину x , на которую растянется пружина при подвешивании к ней груза $P=F$:

$$|k| = \frac{F}{x} = \frac{P}{x} = \frac{mg}{x}. \quad (1)$$

Установка (рис.1) состоит из штатива, на котором поочередно развешиваются на различных пружинах грузы разного веса. Штатив снабжен шкалой.

Упражнение 1. Определение коэффициента упругости пружины статическим методом

Находят коэффициент упругости для каждой пружины по формуле (1). Измерения проводят для каждой пружины при трех различных грузах P .

Упражнение 2. Нахождение зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от массы груза

Для этого измеряют секундомером период T_i собственных колебаний для одной из пружин с коэффициентом упругости k_1 при разных грузах P и строят график зависимости T_i^2 от m (по оси x откладывают массу m).

Период T_i измеряют из 10-15 полных колебаний:

$$T_i = \frac{t_i}{n_i},$$

где t_i – время n_i полных колебаний.

Упражнение 3. Нахождение зависимости собственных колебаний пружинного маятника от коэффициента упругости пружины

Для этого измеряют периоды T_0 собственных колебаний пружин при одном и том же грузе P_0 и строят график зависимости T_0^2 от k (по оси абсцисс откладывают значения k).

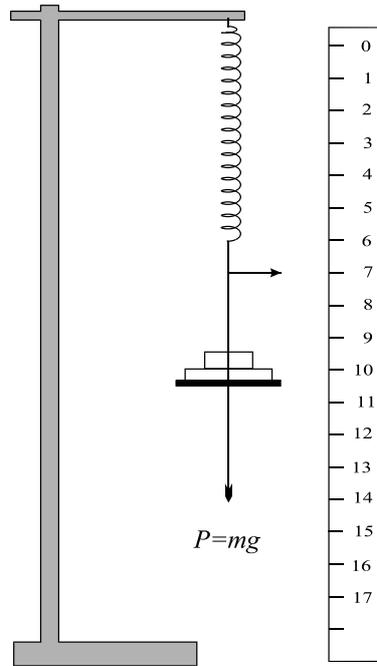


Рис.1.

Упражнение 4. Определение коэффициента упругости пружин динамическим методом

Период собственных упругих колебаний пружинного маятника T_0 определяется по формуле:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

По этой формуле вычисляют теоретически коэффициенты упругости пружин:

$$k_0 = \frac{4\pi^2 m}{T_0^2},$$

используя значения T_0 , полученные опытным путем. Вычисленные значения k_0 сравнивают с опытными результатами, полученными по формуле (1) (статическим методом) для одних и тех же грузов P .

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицы для разных пружин.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Гармонические колебания, их скорость и ускорение.
2. Пружинный маятник. Вывод формулы периода колебания пружинного маятника.
3. Свободные и затухающие колебания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М.:Высш.шк.,1970. С.93-96.

Лабораторная работа № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОБОРОТНЫМ МАЯТНИКОМ (МЕТОД БЕССЕЛЯ)

Принадлежности: 1) оборотный маятник, 2) секундомер.

Теория. Применение оборотного маятника основано на свойстве сопряженности центра качания и точки подвеса. Это свойство заключается в том, что во всяком физическом маятнике можно найти такие две точки, что при последовательном подвешивании маятника за ту или другую из них период колебаний его остается одним и тем же. Расстояние между этими точками определяет собой приведенную длину данного маятника.

Если амплитуда колебаний маятника мала, то время одного простого колебания его, т. е. период колебания, определяется формулой

$$T = \pi \sqrt{\frac{J}{mga}}. \quad (1)$$

По теореме о моментах инерции

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

где J – момент инерции физического маятника относительно оси подвеса, J_0 – момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельной оси качаний, m – масса маятника, a – расстояние между осью вращения и центром тяжести маятника.

Из уравнений

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{J_0 + ma_1^2}{mga_1}}, \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{J_0 + ma_2^2}{mga_2}}$$

имеем

$$T_1^2 ga_1 - T_2^2 ga_2 = \pi^2 (a_1^2 - a_2^2).$$

Для величины ускорения из последней формулы после преобразований получаем уравнение, данное Бесселем,

$$g = \frac{2\pi^2 l}{T_1^2 + T_2^2} \frac{1}{1 + \frac{(T_1^2 - T_2^2)l}{(T_1^2 + T_2^2)(a_1 - a_2)}}, \quad (3)$$

где $l = a_1 + a_2$ – приведенная длина.

Если периоды равны между собой ($T_1 = T_2 = T$), уравнение примет вид

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

Добиться полного равенства периодов нелегко. Формула Бесселя позволяет достаточно просто и с не меньшей степенью точности определить величину ускорения при приближенном равенстве периодов колебаний.

Пусть T_1 и T_2 близки друг к другу, а величины a_1 и a_2 сильно отличаются одна от другой (одна чечевица (груз) маятника полая, другая сплошная). В этом случае, как видно из формулы, нет необходимости определять величины a_1 и a_2 с большой степенью точности (не точнее, чем до 1 мм).

Описание прибора. Обратные маятники в зависимости от предъявляемых к ним требований имеют самую различную форму. Они обычно состоят из металлического стержня длиной свыше 1 м, на поверхности которого нанесены миллиметровые деления. По стержню могут передвигаться и закрепляться в том или ином положении тяжелые и легкие чечевицы (грузы) и опорные призмы. Различные комбинации чечевиц и их положений на стержне с опорными призмами дают различные типы обратных маятников.

В настоящей работе применяется обратный маятник, изображенный на рис. 1.

На металлическом стержне A опорные призмы B жестко закреплены и не перемещаются. Жестко закреплена и чечевица C , находящаяся между ними. Вторая чечевица D находится на конце стержня (не между призмами) и может перемещаться по шкале с нониусом и закрепляться в нужном положении.

Расстояние между призмами постоянно, его значение выбито на стержне.

Измерения. Пользуясь секундомером, определяют периоды колебаний маятника для различных положений чечевицы D на шкале. Это следует

проделать, перемещая чечевицу в пределах от 7 до 12 делений (сантиметров) основной шкалы. В этом интервале необходимо промерить периоды каждые 5 миллиметров, т. е. получить одиннадцать значений периодов. Каждый период определяется дважды из 100 колебаний, каждый раз пользуются средним арифметическим значением.

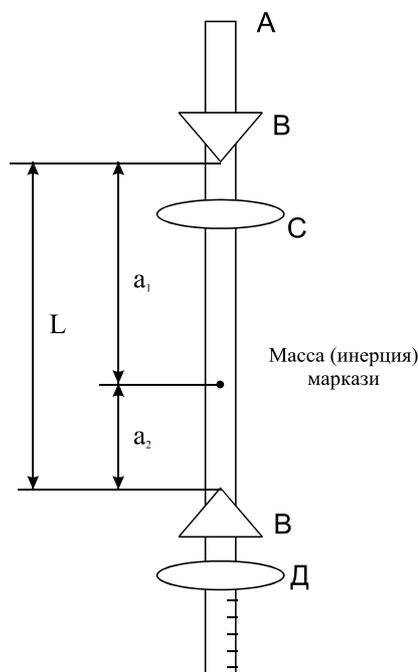


Рис. 1.

Необходимо построить график зависимости периода колебаний от положения чечевицы на стержне маятника, откладывая по оси абсцисс деление шкалы, указывающее положение чечевицы, а по оси ординат величину периода колебаний.

После этого ось вращения маятника изменяют, т. е. заставляют маятник колебаться на другой опорной призме. Вновь, в тех же пределах, с тем же числом измерений, совершенно так же измеряют периоды колебаний. На той же миллиметровой бумаге полученные данные также представляют в виде графика. Точка пересечения кривых определяет местонахождение подвижной чечевицы, которое дает наиболее близкое друг к другу значения периодов.

Для этого положения определяют периоды колебаний T_1 и T_2 (в прямом и перевернутом положении маятника) с наибольшей тщательностью. Определяют время 200 колебаний маятника не менее трех раз, откуда вычисляют период колебаний. Совершенно так же поступают и при определении второго периода (перевернутый маятник). Для определения величин a_1 и a_2 маятник снимают с консоли и осторожно кладут его стержнем на специальную подставку. На подставке, которая имеет острую грань, маятник необходимо уравновесить. Расстояния от точки центра тяжести маятника, находящейся над гранью, до опорных призм дают величины a_1 и a_2 . Измерения их производятся масштабной линейкой с

точностью до миллиметра. (Можно взять значение l расстояния между опорными призмами.)

По полученным данным, пользуясь формулой Бесселя (4), определяют величину ускорения силы тяжести.

Выполнение работы требует внимания и тщательности. Недопустимо колебания маятника с углом отклонения больше, чем 4° .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Физический и математический маятники. Вывод формулы периодов их колебаний.
2. Сформулируйте теорему Штейнера.
3. Какое преимущество дает измерение ускорения силы тяжести обратным маятником по сравнению с другими маятниками?
4. Почему угловая амплитуда колебаний маятника не должна превышать 4° ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.
5. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под.ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1967. С.58-60.

Лабораторная работа № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ВОГНУТОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕГО ШАРИКА

Принадлежности: 1) вогнутые сферические поверхности, 2) металлические шарики, 3) секундомер, 4) штангенциркуль.

Пусть маленький шарик находится в положении устойчивого равновесия в нижней точке B вогнутой сферической поверхности (рис.1). Если вывести шарик из этого положения и предоставить самому себе, то шарик будет колебаться около этого положения.

Потенциальная энергия шарика в точке A или C будет равна:

$$E_{\text{ном}} = mgh, \quad (1)$$

где m – масса шарика, h – высота подъема шарика.

Из рис.1 по теореме Пифагора можно найти:

$$a^2 + (R_0 - h)^2 = R_0^2$$

или

$$a^2 = 2R_0h - h^2,$$

где R_0 – расстояние от центра кривизны сферической поверхности до центра шарика. Если $h^2 \ll R_0$, то можно предположить, что $h^2=0$, и $a^2=2R_0h$, откуда

$$h = \frac{a^2}{2R_0}. \quad (2)$$

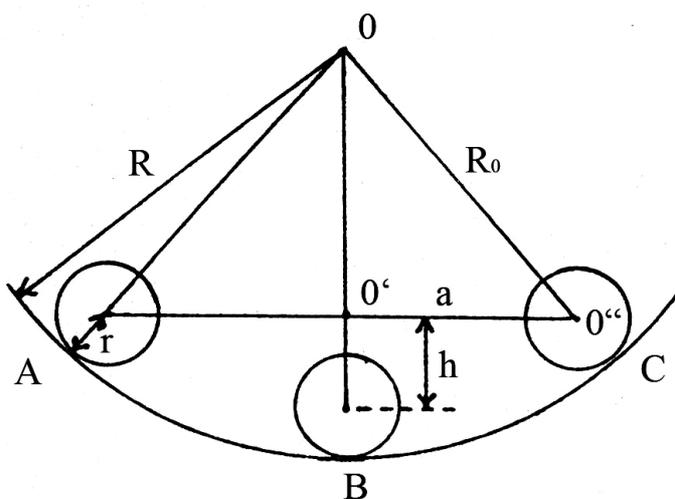


Рис.1.

Из выражений (1) и (2):

$$E_{nom} = \frac{a^2}{2R_0} mg. \quad (3)$$

Скорость шарика в точке B равна:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d(a \sin \omega t)}{dt} = a \omega \cos \omega t.$$

Здесь $a \cdot \omega = v_0$ - максимальная скорость шарика в точке B. Циклическая частота шарика равна:

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

где T – период колебания шарика. Из последних двух выражений:

$$v_0 = \frac{2\pi}{T} a. \quad (4)$$

С учетом формулы (4) кинетическая энергия поступательного движения шарика будет равна:

$$E_{кин}^{пост} = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2. \quad (5)$$

Так как

$$v = \omega \cdot r,$$

(здесь r – радиус шарика) угловая скорость вращения шарика вокруг своей оси будет равна:

$$\omega = \frac{v_0}{r},$$

а согласно формуле (4)

$$\omega = \frac{2\pi a}{Tr}. \quad (6)$$

Момент инерции шарика относительно оси вращения:

$$I = \frac{2}{5} \cdot mr^2. \quad (7)$$

Кинетическая энергия вращения шарика вокруг своей оси будет равна:

$$E_{кин}^{вр} = \frac{1}{2} I \omega^2. \quad (8)$$

Если учесть (6) и (7):

$$E_{кин}^{вр} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} mr \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2 \frac{1}{r^2}. \quad (9)$$

Полная кинетическая энергия шарика в точке B равна $E_{кин} = E_{кин}^{пост} + E_{кин}^{вр}$, согласно (5) и (9):

$$E_{кин} = \frac{1}{2} m \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} mr^2 \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2 \frac{1}{r^2}$$

или

$$E_{кин} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7}{5} m \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2. \quad (10)$$

Согласно закону сохранения энергии

$$E_{пот} = E_{кин}.$$

Согласно (3) и (10)

$$\frac{1}{2} mg \frac{a^2}{R_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7}{5} m \left(\frac{2\pi a}{T} \right)^2$$

или

$$R_0 = \frac{5}{7} \cdot \frac{g}{4\pi^2} \cdot T^2. \quad (11)$$

Радиус кривизны R вогнутой сферической поверхности будет равна (рис.1):

$$R = R_o + r \quad (12)$$

или согласно (11)

$$R = \frac{5}{7} \frac{g}{4\pi^2} T^2 + r. \quad (13)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Найти период колебания T шарика на выпуклой поверхности по формуле $T=t/N$ (t – время $N=5-10$ колебаний).
2. Найти радиус r шарика с помощью штангенциркуля.
3. По формуле (13) найти радиус кривизны R вогнутой сферической поверхности.
4. Опыт следует повторить несколько раз для шариков разных радиусов и взять среднюю арифметическую величину. Оценить погрешности.
5. Результаты занести в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сферическая поверхность. Центр и радиус кривизны.
2. Виды равновесия. Условия равновесия. Почему шарик, выведенная из устойчивого положения на вогнутой поверхности, будет колебаться около этого положения?
3. Вывод рабочей формулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.

Лабораторная работа № 15

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Принадлежности: маятник с диском, шкала, набор грузов, секундомер.

Если на колеблющееся тело действует сила трения, то энергия системы, а вместе с тем и амплитуды смещения и скорости, не остаются постоянными, а убывают; энергия расходуется на преодоление сил трения и превращается в тепло; происходит постепенное затухание колебаний.

При малом трении практически можно считать, что период затухающих колебаний T равен периоду колебаний T_0 в отсутствии трения. В ряде случаев с достаточной степенью точности можно считать, что сила трения f пропорциональна скорости движения:

$$f = -r\dot{x},$$

где r - коэффициент сопротивления среды, x - смещение. В этом случае уравнение движения маятника имеет вид:

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

где m - масса колеблющегося тела, $-kx$ - упругая (возвращающая) сила. Решение этого уравнения дает зависимость смещения x от времени t :

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где
$$\beta = r/2m \quad (2)$$

- коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ - собственная циклическая частота затухающих колебаний системы, ω_0 - собственная циклическая частота свободных колебаний системы (в отсутствии трения), а постоянные величины, A_0 - начальная амплитуда и φ_0 - начальная фаза, зависят от начальных условий, т.е. от значений x и \dot{x} в начальный момент времени ($t=0$).

Отношение двух последующих амплитуд одного и того же знака A_t и A_{t+T} , отстоящих друг от друга на период T , равно:

$$\delta = \frac{A_t}{A_{t+T}} = e^{\beta T} = \text{const} \quad (3)$$

и называется *декрементом затухания*.

Натуральный логарифм от этого отношения

$$\lambda = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \beta T \quad (4)$$

называется *логарифмическим декрементом затухания*.

Коэффициент затухания β характеризует затухание колебаний за единицу времени, а логарифмический декремент затухания - за период.

Логарифмический декремент затухания – постоянная для данной колебательной системы величина.

Для характеристики колебательной системы пользуются понятием *добротности* Q , которая при малых значениях логарифмического декремента равна

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{\beta T_0} = \frac{\omega_0}{2\beta} \quad (5)$$

(так как затухание невелико ($\beta^2 \ll \omega_0^2$), то T принято равным T_0).

Измерения. В работе используется маятник с большим декрементом затухания, совершающий колебания относительно шкалы, разделенной на 100 частей. Общий вид установки приведен на рис. 1.

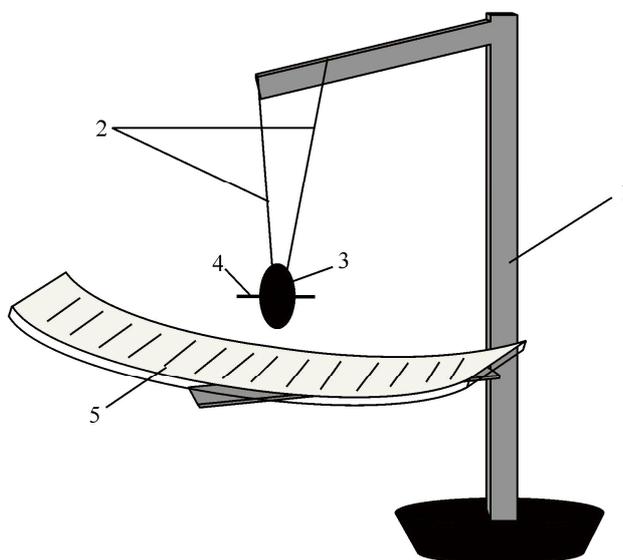


Рис.1. Маятник: 1 - основание, 2 - бифилярный подвес, 3 - диск маятника, 4 - стержень для закрепления добавочных грузов, 5 - шкала.

УПРАЖНЕНИЕ 1. Определение декремента затухания и логарифмического декремента затухания

Отклонив маятник от положения равновесия вправо или влево до деления 15-20, приводят его в колебательное движение. Отмечают значения амплитуд колебаний для моментов времени, отличавшихся на величину периода. Определив величину периода колебаний, строят график зависимости амплитуды от времени. По измеренным значениям амплитуд по формулам (3) и (4) вычисляют декремент затухания и логарифмический декремент затухания. Результаты заносят в таблицу.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Определение коэффициента затухания и добротности колеблющейся системы

По средним значениям периода колебаний (по формуле $T=t/N$ (t – время $N=5-10$ колебаний)) и логарифмического декремента затухания (см. упражнение 1) с помощью формул (4) и (5) определяют коэффициент затухания и добротность. Результаты заносят в таблицу.

УПРАЖНЕНИЕ 3. Определение коэффициента сопротивления среды

Для разных грузов по формулам (3), (4), (5) и (2) определяют δ , λ , β , Q и r . Результаты заносят в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний его решение.
2. По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний? Являются ли затухающие колебания периодическими?
3. Почему частота затухающих колебаний должна быть меньше частоты собственных колебаний системы?
4. Что такое коэффициент затухания? декремент затухания? логарифмический декремент затухания? В чем заключается физический смысл этих величин?
5. Если перенести маятник из воздуха в воду, как изменяются его характеристики?

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.

Лабораторная работа № 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Принадлежности: 1) установка Лебедева, 2) пластинки из различных материалов.

Введение. При качении по плоской поверхности тел, имеющих форму круглых цилиндров или шаров, возникают не только упругие, но и пластические деформации. Поэтому линия действия реакции \vec{N}_0 плоскости не совпадает с линией действия силы \vec{P} нормального давления (рис.1). Нормальная к плоскости составляющая \vec{N} силы \vec{N}_0 численно равна P (весу тела), а горизонтальная составляющая \vec{F} представляет собой силу трения качения. Пара сил \vec{N} и \vec{P} , приложенных к катящемуся телу, создает момент реакции опоры (плоскости) M относительно оси вращения тела, препятствующего его вращению. Этот момент носит название момента сил трения качения и может быть записан в виде

$$M = FR = kN, \quad (1)$$

где R – радиус катящегося тела, k – коэффициент трения качения, имеющей размерность длины и зависящий от материала тел, состояния их поверхностей и целого ряда других факторов; он, по существу, характеризует плечо силы давления опоры относительно оси вращения тела.

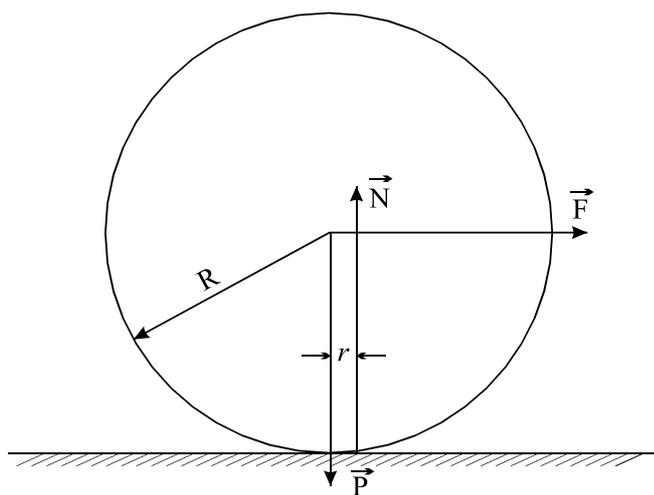


Рис.1.

В технике пользуются обычно величиной силы трения качения F :

$$F = k \frac{P}{R}. \quad (2)$$

В ряде случаев наличие силы сопротивления перекачиванию объясняют неполной упругостью материала тел, упругим гистерезисом. Теоретическое рассмотрение процесса перекачивания с учетом величин, характеризующих материал тел, скорости их движения, давления на них, приводит к сложным выражениям для величины этой силы. Зависимость от радиуса катящегося тела и нагрузки на него в этом случае получается более сложной. Объяснения находят также в относительном скольжении деформированных поверхностей тел, к чему и сводят, в основном, силу сопротивления перекачиванию. В отдельных случаях наличие этой силы объясняется молекулярным сцеплением.

Уравнения (1) и (2) следует рассматривать как первые приближения, очень удобные, по причине их простоты, для определения искомой величины в каждом конкретном случае. Полной теории, учитывающей все процессы, сопровождающие перекачивание тел, в настоящий момент не существует.

Описание установки и теория метода. В данной работе коэффициент трения качения определяется на установке Лебедева. Установка Лебедева состоит из деревянного (или изготовленного из другого материала, например из стали) цилиндра A , находящийся на плоской металлической плите B (рис 2.).

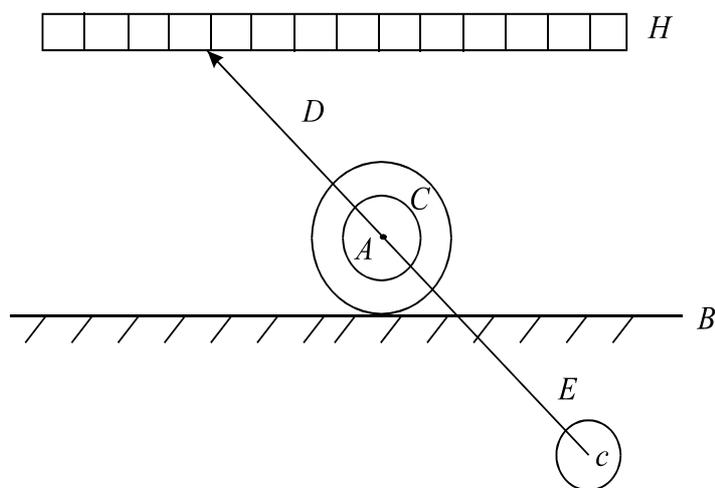


Рис.2.

Цилиндр закреплен в обойме C , которая имеет стержни D и E . Первый является стрелкой к шкале H . На втором, проходящем через отверстие в плите, закреплен груз G . Подвижная часть установки может быть названа «маятником». При отклонении ее от положения равновесия она совершает нелинейные затухающие колебания. При этом ось цилиндра движется поступательно, а сам цилиндр вращается вокруг этой оси. Следовательно, отклонение стрелки по шкале будет суммой двух отклонений (рис.3). Из рис.3:

$$a_1 = R \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

$$a = Ltg\alpha, \quad (4)$$

где α - угол поворота цилиндра, R – радиус цилиндра, L - расстояние от оси вращения цилиндра до шкалы, a_1 – отклонение оси цилиндра от положения равновесия, a - отклонение, вызванное вращением цилиндра вокруг своей оси. Поэтому для суммарного отклонения получим:

$$a_1 + a = (R + L)tg\alpha. \quad (5)$$

При $R \ll L$ можно пренебречь величиной R/L и считать за отклонение по шкале величину

$$S = a = Ltg\alpha. \quad (6)$$

Если $\alpha \ll 5^\circ$, то для начального отклонения α_0 и отклонения после n полных периодов колебаний α_n , соответственно получим

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{L}; \quad \alpha_n = \frac{a_n}{L}. \quad (7)$$

Уменьшение угла отклонения за известное число периодов колебаний маятника дает возможность вычислить величину коэффициента трения качения (см. ниже). Под цилиндр могут подкладываться плоские пластинки из различных материалов. Это позволяет определить коэффициенты трения качения для различных пар материалов и сравнить их между собой.

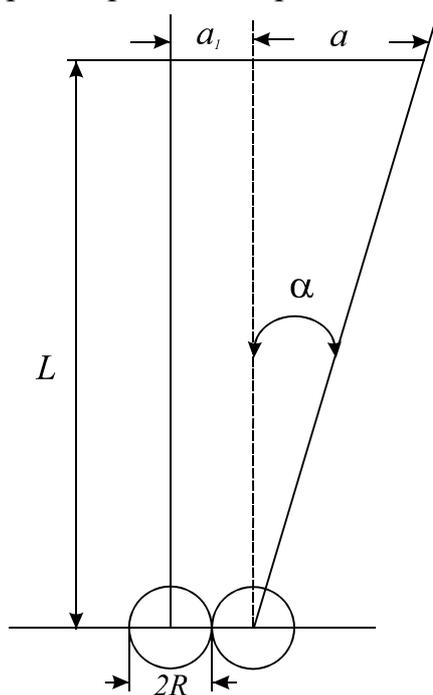


Рис.3.

Выведем формулу для расчета коэффициента трения качения на описанной установке. Для этого считаем коэффициент трения качения независимым от скорости движения маятника и воспользуемся законом сохранения энергии. При начальном отклонении маятника на угол α_0 потенциальная энергия маятника может быть представлена в виде (рис.4):

$$E_{ном0} = Ph = Pl(1 - \cos\alpha_0), \quad (8)$$

где h - перемещение по вертикали центра тяжести маятника, P - вес маятника, l - расстояние между центром тяжести и осью вращения маятника. Через один полный период колебания потенциальная энергия маятника будет равна:

$$E_{nom1} = Pl(1 - \cos \alpha_1), \quad (9)$$

где α_1 - угол отклонения маятника через один полный период колебаний. При этом уменьшение потенциальной энергии будет:

$$\Delta E_{nom} = 2Pl \left(\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} \right). \quad (10)$$

При $\alpha < 5^\circ$ получим:

$$\Delta E_{nom} = 0,5 \cdot Pl(\alpha_0^2 - \alpha_1^2). \quad (11)$$

Это уменьшение энергии, если пренебречь силами трения о воздух, вызвано работой против сил трения качения. За один период колебаний маятника эта работа может быть записана так (рис.5):

$$\Delta A = Pk(\alpha_0 + \alpha'_0 + \alpha'_0 + \alpha_1), \quad (12)$$

где k - коэффициент трения качения; α'_0 - угол отклонения после одного полупериода.

Исключим из уравнения (12) угол α'_0 . Пусть $\Delta\alpha$ - уменьшение угла отклонения за один полупериод. Пользуясь этим, можно записать:

$$\alpha'_0 = \alpha_0 - \Delta\alpha; \quad \alpha_1 = \alpha'_0 - \Delta\alpha. \quad (13)$$

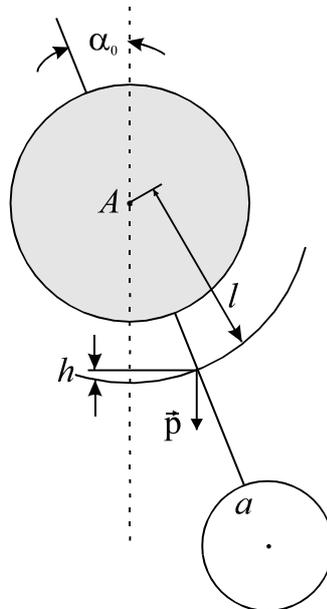


Рис.4.

Из уравнений (12) и (13) получим:

$$\Delta A = 2Pk(\alpha_0 + \alpha_1). \quad (14)$$

Приравнивая уравнения (11) и (14) одно к другому, получим:

$$k = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_1). \quad (15)$$

Для n полных периодов имеем:

$$k = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_n) \frac{1}{n}. \quad (16)$$

Пользуясь уравнением (7), окончательно получим:

$$k = \frac{l(a_0 - a_n)}{4nL}. \quad (17)$$

Этой формулой и пользуются для определения коэффициента трения качения на установке Лебедева.

Измерения. Для вычисления коэффициента трения качения по формуле (17) необходимо измерить: 1) начальное отклонение маятника a_0 , 2) отклонение маятника после n полных его колебаний - a_n , 3) Число полных колебаний n . Величины l и L даются как постоянные установки.

Удобно заранее установить разность $(a_0 - a_n)$, задав начальное и конечное (после n полных периодов колебаний) отклонения по шкале. В этом случае все измерения сводятся только к отсчету числа n полных периодов колебаний маятника. В применяемой установке можно взять начальное отклонение в 2,5 см, конечное - 1,0 см. В этом интервале отклонений маятника (1,5 см) и отсчитывается число n его полных колебаний.

Опыт проводится не менее пяти раз. Пользуясь средним арифметическим значением этой величины, по формуле (17) вычисляют коэффициент трения качения. Результаты заносят в таблицу.

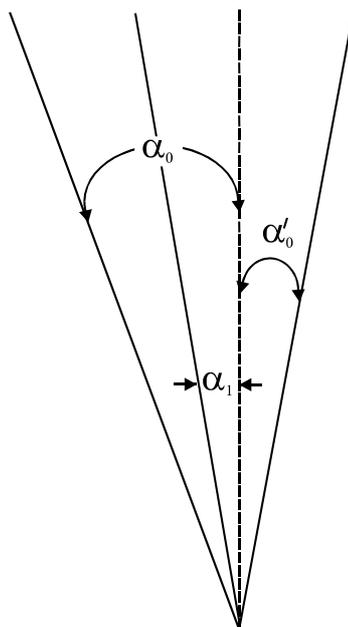


Рис.5.

Цилиндр на плите должен занимать положение, не препятствующее его перекатыванию. Шкала может несколько перемещаться в горизонтальном направлении. Это позволяет совместить нуль шкалы с концом стрелки покоящегося маятника.

Отклонение маятника производится вручную до упора, который может передвигаться в требуемое положение. Это позволяет каждый раз отклонять установленный маятник на нужное деление шкалы. Отклонение маятника необходимо производить очень осторожно. Перекатывание цилиндра при отклонении маятника не должно сопровождаться его проскальзыванием по плите.

После определения коэффициента трения качения для пары дерево - материал пластины их определяют и для других пар материалов. Для этого под цилиндр подкладывают пластинки различных, указанных на установке, материалов. Поверхность пластинок обрабатывалась на обычном станке и не шлифовалась. Поэтому профиль шероховатости не одинаков в разных направлениях. Естественно, что при перекатывании цилиндра вдоль длине пластинок и поперек ее будут получаться несколько различные значения величины коэффициента трения качения. Поэтому не следует изменять положение пластинок при повторных измерениях. Полученные значения коэффициентов трения качения для различных пар материалов сравниваются между собой и табличными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова физическая сущность трения? В чем отличие сухого трения от жидкого? Какие виды внешнего (сухого) трения Вы знаете?
2. Какова причина возникновения силы трения качения?
3. Вред и польза трения.
4. Описание установки Лебедева.
5. Вывод рабочей формулы.
6. Порядок выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высш.шк., 2003. 432 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. М.:Наука, 1989.576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Плотность некоторых газов при давлении 760 мм рт.ст. и температуре 0⁰С

Газ	ρ , кг/м ³	Газ	ρ , кг/м ³
Азот	1,2507	Гелий	0,1786
Водород	0,0899	Кислород	1,4290
Воздух*	1,2928	СО ₂	1,9768

*Плотность сухого воздуха при температуре $t^{\circ}\text{C}$ и давлении H мм рт.ст. определяется по формуле

$$\rho = \frac{0,0012932}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{H}{760}$$

2. Плотность некоторых жидкостей при давлении 760 мм рт.ст. и температуре 20⁰С

Жидкость	Плотность, 10 ³ кг/м ³	Жидкость	Плотность, 10 ³ кг/м ³
Ацетон	0,792	Касторовое масло	0,95
Бензин	0,68-0,72	Керосин	0,82
Бензол	0,879	Машинное масло	0,90-0,92
Вазелиновое масло	0,80	Парафиновое масло	0,87-0,88
Вода	0,99823	Ртуть	13,55
Глицерин	1,260	Этиловый спирт	0,79

3. Плотность воды при различных температурах (при нормальном давлении)

t , ⁰ С	ρ , кг/м ³	t , ⁰ С	ρ , кг/м ³	t , ⁰ С	ρ , кг/м ³
0	999,87	12	999,52	24	997,32
1	999,93	13	999,40	25	997,07
2	999,97	14	999,27	26	996,81
3	999,99	15	999,13	27	996,54
4	1000,00	16	998,97	28	996,26
5	999,99	17	998,80	29	995,97
6	999,97	18	998,62	30	995,67
7	999,93	19	998,43	31	995,37
8	999,88	20	998,23	32	995,05
9	999,81	21	998,02	33	994,72

10	999,73	22	997,80	34	994,40
11	999,63	23	997,57	35	994,06

4. Плотность некоторых твердых веществ при нормальном давлении и температуре 20⁰С

Вещество	Плотность, 10 ³ кг/м ³	Вещество	Плотность, 10 ³ кг/м ³
Алюминий	2,70	Платина	21,37
Бронза	8,7-8,9	Пробка	0,22-0,26
Железо	7,87	Свинец	11,34
Золото	19,3	Серебро	10,42-10,59
Латунь	8,3-8,7	Сталь	7,7-8,0
Лед (при 0 ⁰ С)	0,917	Стекло (обыкн.)	2,4-2,8
Медь	8,93	Стекло (флинтглас)	3,0-5,9
Парафин	0,82-0,91	Чугун	6,6-7,3

5. Ускорение силы тяжести (в м/с²) для различных широт (на уровне моря)

Широта	0 ⁰	1 ⁰	2 ⁰	3 ⁰	4 ⁰	5 ⁰	6 ⁰	7 ⁰
0 ⁰	9,7803	9,7803	9,7804	9,7804	9,7806	9,7807	9,7809	9,7811
15 ⁰	9,7838	9,7843	9,7847	9,7852	9,7858	9,7863	9,7869	9,7875
30 ⁰	9,7932	9,7940	9,7948	9,7956	9,7965	9,7973	9,7982	9,7990
45 ⁰	9,8062	9,8071	9,8080	9,8089	9,8098	9,8107	9,8116	9,8124
60 ⁰	9,8191	9,8199	9,8207	9,8214	9,8222	9,8229	9,8236	9,8242
75 ⁰	9,8287	9,8291	9,8295	9,8299	9,8302	9,8306	9,8309	9,8311

Широта	8 ⁰	9 ⁰	10 ⁰	11 ⁰	12 ⁰	13 ⁰	14 ⁰
0 ⁰	9,7813	9,7816	9,7819	9,7822	9,7825	9,7829	9,7833
15 ⁰	9,7882	9,7888	9,7895	9,7902	9,7909	9,7917	9,7924
30 ⁰	9,7999	9,8008	9,8017	9,8026	9,8035	9,8044	9,8053
45 ⁰	9,8133	9,8142	9,8150	9,8159	9,8167	9,8175	9,8184
60 ⁰	9,8248	9,8255	9,8261	9,8266	9,8272	9,8277	9,8282
75 ⁰	9,8314	9,8316	9,8318	9,8319	9,8320	9,8321	9,8321

**6. Модуль Юнга (E), модуль сдвига (G) и коэффициент Пуассона (ν)
некоторых материалов при нормальном давлении
и температуре 20⁰С**

	E, 10 ⁹ Па	G, 10 ⁹ Па	ν
Алюминий	63-70	25-26	0,329-369
Латунь	98	36	0,36
Медь (катаная)	108	39	0,31-0,34
Резина мягкая	0,0015-0,005	0,0005-0,0015	0,46-0,49
Свинец (литой)	16,2	5,6	0,45
Серебро	80,5	26	0,38-0,41
Сталь легированная	206	80	0,25-0,30
Сталь углеродистая	195-205	78	0,24-0,26
Стекло	49-78	17,5-20	0,2-0,3
Чугун (белый)	113-116	44	0,23-0,27

7. Коэффициенты трения скольжения (f_c)

Трущиеся поверхности	f_c
Бронза - бронза	0,2
Бронза - сталь (без смазки)	0,18
Бронза - сталь (при смазке)	0,02-0,08
Дерево - дерево	0,25-0,5
Латунь - железо	0,2
Лед - лед	0,028
Мед - чугун	0,27
Сталь - железо	0,19
Сталь - лед (коньки)	0,02-0,03
Сталь - сталь	0,18
Резина - чугун	0,83
Резина (шина) - твердый грунт	0,4-0,6
Железо - железо	0,34
Чугун - чугун	0,16

8. Коэффициенты трения качения (f_k)

Трущиеся поверхности	f_k , см
Сталь - сталь	0,001-0,002
Стальной рельс - колесо со стальным ободком	0,05
Стальной рельс - чугунное колесо	0,12
Дерево – деревянное колесо	0,16
Колесо автомобиля (скорость 80 км/час) - асфальт	0,02

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Изучение нониусов.....	3
Лабораторная работа № 2. Определение толщины пластинки и радиуса кривизны линзы сферометром.....	9
Лабораторная работа № 3. Точное взвешивание.....	13
Лабораторная работа № 4. Определение плотности жидкостей пикнометром.....	22
Лабораторная работа № 5. Определение плотности твердых тел гидростатическим взвешиванием.....	25
Лабораторная работа № 6. Изучение законов свободного падения тел.....	28
Лабораторная работа № 7. Определение момента инерции махового колеса и силы трения в опоре.....	30
Лабораторная работа № 8. Определение момента инерции и проверка теоремы Штейнера методом крутильных колебаний (метод трифилярного подвеса).....	32
Лабораторная работа № 9. Определение модуля Юнга методом Лермонтова.....	36
Лабораторная работа № 10. Определение модулей кручения и сдвига статическим методом.....	40
Лабораторная работа № 11. Изучение колебаний математического маятника.....	43
Лабораторная работа № 12. Изучение собственных колебаний пружинного маятника.....	46
Лабораторная работа № 13. Определение ускорения силы тяжести обратным маятником (метод Бесселя).....	48
Лабораторная работа № 14. Определение радиуса кривизны вогнутой сферической поверхности методом качающегося шарика.....	51
Лабораторная работа № 15. Изучение затухающих колебаний.....	55
Лабораторная работа № 16. Определение коэффициента силы трения качения методом затухающих колебаний.....	58
Приложение. Значения некоторых физических величин.....	64