

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Куйбышевский авиационный институт
им. С.П.Королева

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ

М Е Х А Н И К А

Учебное пособие для студентов I-го курса

Рассмотрено и утверждено
на Ученом Совете института
23. ноября 1966 года.

Куйбышев
- 1 9 6 7 -

Составители: М.А.Белоусова (12), Н.Г.Горчакова (1,2,3,5,6, 7,8), М.П.Меньших (9,10,11,13,14), Н.И.Пугачев (4,16,17;18), Л.С.Сафронова (15).

Под общей редакцией и.о.доцента М.П.МЕНЬШИХ.

РАБОТА № 1

ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ

Принадлежности: штангенциркуль, набор тел, технические весы и разновесы.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Плотностью тела ρ называют массу, содержащуюся в единице объема тела. Если тело однородное, то

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где m - масса тела; V - его объем.

Для определения объема тела правильной геометрической формы (куб, шар, цилиндр и т.д.) достаточно знать линейные размеры его и, пользуясь известными формулами, вычислить объем.

Для измерения линейных размеров в зависимости от необходимой точности измерения используют различные приборы: масштабную линейку, штангенциркуль, микрометр, микроскоп и т.д.

Простейшим из них является масштабная линейка. Цена наименьшего деления линейки (расстояние между соседними штрихами) обычно 1 мм. Десятые доли миллиметра оценить на глаз трудно. Для повышения точности измерения используют нониус, дающий возможность производить измерения с точностью до десятых и сотых долей миллиметра.

Линейный нониус - это линейка с соответствующими делениями, которая может скользить вдоль основной масштабной линейки. Нониус изготавливают так, что длина n наименьших делений нониуса равна длине $(Kn - 1)$ наименьших делений масштабной линейки, где K - целое число (обычно 1 или 2).

Если y - цена деления масштабной линейки, а x - цена деления нониуса, то справедливо равенство:

$$(kn - 1)y = nx \quad (2)$$

(рис.1 $K = 1$).

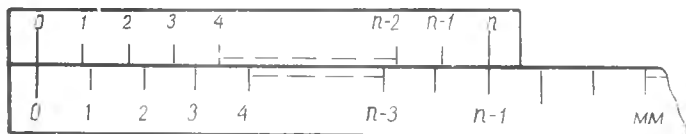


Рис. 1

Если $K=1$, то разность между ценой деления масштабной линейки и ценой деления нониуса называют точностью нониуса.

Используя равенство (2) и определение точности нониуса, имеем: $y - x = y - \frac{n-1}{n}y = \frac{y}{n}$

Если $K \neq 1$, (рис.3), то точность нониуса определяет как разность

$$ky - x = ky - \frac{kn-1}{n}y = \frac{y}{n},$$

т.е. всегда, чтобы определить точность нониуса достаточно цену деления масштабной линейки y разделить на число n делений нониуса.

В любом положении нониуса относительно масштабной линейки одно из его делений приблизительно совпадает с каким-либо делением линейки. Отсчет по нониусу основан на способности глаза фиксировать это совпадение делений нониуса и масштаба.

Рассмотрим процесс измерения при помощи линейного нониуса. Для измерения длины отрезка, например, какого-либо линейного размера тела, один конец его совмещают с нулевым делением масштабной линейки (рис.2).

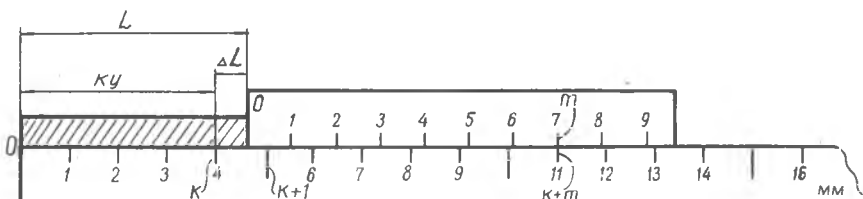


Рис.2.

Пусть при этом второй конец тела оказался между (k) и $(k+1)$ -ым делением основной линейки. Тогда, как видно из рисунка 2, длина L измеряемого тела равна:

$$L = ky + \Delta L.$$

Ноль нониуса при этом совпал с концом измеряемого тела. Так как деления нониуса не равны делениям масштабной линейки, то обязательно найдется какое-то m -ое деление нониуса, которое будет ближе всего подходить к $(k+m)$ -му делению масштаба. Как видно из рисунка 2,

$$\Delta L = my - mx = m(y - x) = m \frac{y}{n}.$$

Тогда, измеряемая длина L определится равенством:

$$L = ky + m \frac{y}{n}. \quad (3)$$

Таким образом, длина измеряемого тела равна целому числу наименьших делений масштабной линейки, отсчитанному до нуля нониуса, плюс точность нониуса, умноженная на порядковый номер наименьшего деления нониуса, совпадающего с некоторым делением масштабной линейки.

На рис.2 приведен пример отсчета длины:

$$L = (4 + 7\frac{1}{10}) \text{ мм} = 4,7 \text{ мм}.$$

Погрешность, которая может быть допущена при таком методе измерения определяется неточным совпадением m -го деления нониуса с $(k+m)$ -ым делением масштабной линейки. Величина ее не будет превышать половины точности нониуса, так как при большем несовпадении этих делений одно из соседних делений (справа или слева от m -го) имело бы несовпадение меньшее, чем $0,5\frac{p}{n}$, и мы произвели бы отсчет по нему.

Таким образом, погрешность нониуса равна половине его точности.

Линейный нониус используется в штангенциркуле. Штангенциркуль (рис.3) состоит из линейки 1 с неподвижным выступом 2 в начале ее, перпендикулярным линейке. На линейку 1 насажена подвижная рама с выступом 3, также перпендикулярным линейке.

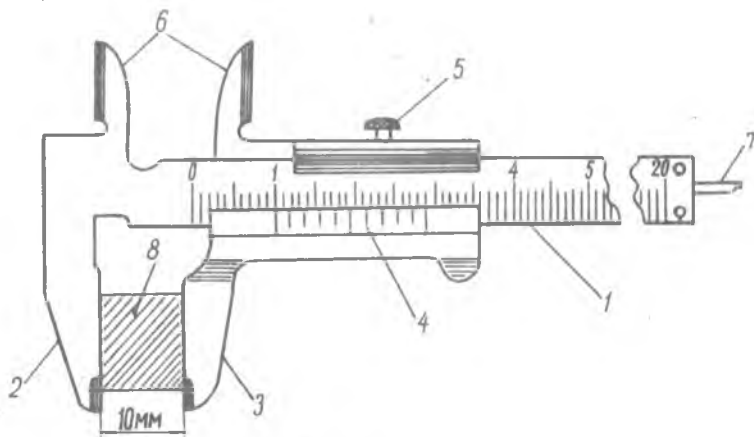


Рис.3.

На скошенном краю рамы, прилегающим к масштабу, нанесен нониус 4. Винт 5 служит для закрепления положения рамы на линейке 1.

Выступы 6 служат для определения внутренних размеров различных отверстий. Часто штангенциркуль снабжают линейкой 7, служащей для измерения глубин. Когда выступы 2 и 3 сдвинуты вплотную, нуль нониуса совпадает с нулем масштабной линейки. При раздвигании выступов штангенциркуля нулевое деление нониуса позволяет отсчитать расстояние между выступами.

Измерения с помощью штангенциркуля производят так. Отодвинув достаточно выступ 3 от выступа 2, помещают между ними измеряемое тело. Подводят выступ 3 рамы так, чтобы тело было слегка зажато между выступами, и производят отсчет. Так как выступ 3, а следовательно, и нуль нониуса переместились на длину L измеряемого тела, то отсчитывают по масштабной линейке целое число наименьших делений до нуля нониуса (K) и смотрят, какое деление нониуса (m) совпадает с некоторым делением линейки. По формуле (3) определяют измеряемую длину.

Целью настоящей работы является изучение линейного нониуса, определение плотности вещества и оценка ошибок измерения плотности.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.

1. Определить точность нониуса штангенциркуля.
2. Измерить штангенциркулем величины (высоту, ширину, диаметр и т.д.), необходимые для вычисления объема тела, причем каждую величину измерить не менее 5 раз в разных местах. Результаты измерений занести в составленную Вами таблицу.
3. Определить массу тела. Взвешивание произвести один раз.
4. Вычислить средние арифметические значения каждого размера тела, округляя их до ближайшего возможного отсчета по штангенциркулю.
5. Вычислить среднюю плотность тела.
6. Оценить абсолютную и относительную ошибки измерения плотности.
7. То же самое проделать для $\Pi^{Г^0}$ и $\Pi^{Г^0}_{Тел}$ из данного набора.

Таблица результатов измерений при определении плотности цилиндра (для тел другой формы таблицы составить самостоятельно).

№ изм. п/п	Высота цилиндра	Абс.ошибки изм.высоты	Диаметр цилиндра	Абс.ошибки изм.диам.	Масса тела.
1					
2					
3					
4					
5					
Средние значения					
Объем тела					
Плотность					
Отн. ошибка изм. плотности					
Абс. ошибка изм. плотности					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что называют плотностью и удельным весом вещества? Единицы измерения этих величин в СГС и СИ системах.
2. Как определить цену деления нониуса? Чему равна его погрешность?
3. Что называют точностью нониуса? Как вычислить точность нониуса?
4. Установить на штангенциркуле расстояние между выступами 106,6мм.

Л И Т Е Р А Т У Р А .

1. А.В.К о р т н е в, Ю.В.Р у б л е в, А.Н.К у ц е н к о
Практикум по физике, введение, работа 1, упр.1, 1963.
2. Под редакцией проф. В.И.И в е р о н о в о й. Физический практикум. Часть 1, задача 1.1962.

РАБОТА № 2

МИКРОМЕТР И СТЕРОМЕТР.

М и к р о м е т р - прибор, позволяющий производить измерения линейных размеров тел с точностью до сотых долей мм.

Микрометр состоит из скобы 1 и микрометрического винта 2 (Рис.1).

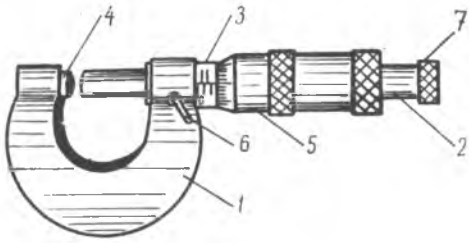


Рис.1.

Микрометрический винт винчен в полость стержня 3, жестко связанного со скобой, и проходит через отверстие в скобе. Против винта на скобе имеется неподвижный упор 4.

На микрометрическом винте закреплен полый цилиндр (барaban) 5 с делениями по окружности. Барабан, вращаясь вместе с винтом, перемещается относительно стержня 3. Рукоятка 6 позволяет фиксировать положение винта.

Вдоль продольной черты стержня нанесена двойная шкала, риски которой сдвинуты относительно друг друга на половину деления (рис.2). Расстояние между соседними делениями верхней и нижней шкал составляет 0,5мм. Это позволяет измерять смещение

барабана вдоль стержня с точностью до 0,5мм. Шкала, нанесенная на барабане, содержит $n = 50$ делений. Когда винт и связанный с ним барабан сделает 1 полный оборот, винт и барабан сместятся вдоль оси на 0,5мм, т.е. шаг винта $h = 0,5$ мм. Точность микрометра показывает, на сколько сместится винт вдоль оси, если барабан повернется на 1 деление своей шкалы. Для описываемого микрометра точность равна $\frac{h}{n} = \frac{0,5 \text{ мм}}{50} = 0,01 \text{ мм}$

Когда винт 2 касается упора 4, нуль продольной шкалы стержня 3 совпадает с нулем барабана.

Измеряемый предмет помещают между упором 4 и микрометрическим винтом 2. Винт 2 приводят в соприкосновение с поверхностью измеряемого предмета. При измерениях степень нажатия винта на предмет должна оставаться постоянной. Для этого микрометр снабжают специальным приспособлением — трещоткой 7, не допускающей слишком сильного нажатия. Винт следует вращать только за трещотку, т.к. в противном случае можно сбить совпадение нулей шкал стержня и барабана.

Когда измеряемый предмет окажется зажат между упором и винтом, винт (и барабан) сместится вдоль оси относительно нулевого положения на длину измеряемого предмета.

Очевидно, искомый размер L предмета можно определить по формуле:

$$L = kh + m \frac{h}{n}, \quad (1)$$

где k — число наименьших делений двойной шкалы, пройденных барабаном от 0, h — шаг винта, n — число всех делений шкалы барабана, m — номер того деления барабана, которое в момент отсчета совпадает с продольной осью двойной шкалы, т.е. отсчет производят так: целые миллиметры и половину мм. отсчитывают по последним делениям двойной шкалы, пройденным барабаном, сотые доли дает порядковый номер того деления шкалы барабана, которое совпадает с продольной осью двойной шкалы. На рис.2 отсчет по микрометру показывает:

$$L = \left(7 \cdot 0,5 + 12 \frac{0,5}{50} \right) \text{ мм} = (3,5 + 0,12) \text{ мм} = 3,62 \text{ мм}.$$

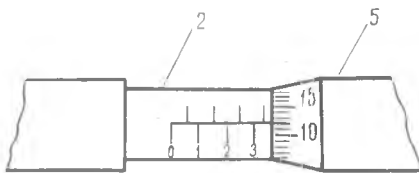


Рис. 2.

Сферометр — прибор, позволяющий производить измерение толщины пластинки, а также радиуса кривизны сферических поверхностей. Он состоит (рис. 2) из треножника 1 с вертикальной шкалой 2 (цена деления ее обычно 1мм или 0,5мм) и полого микрометрического винта 3 с закрепленным на нем диском (лимбом) 4.

Расстояние между ножками 5 сферометра одинаково. Основания их находятся в вершинах равностороннего треугольника.

Лимб обычно разделен по окружности на 250, 500 или 1000 делений. Если лимб сделает один полный оборот, то винт сместится вдоль оси на расстояние h , где h шаг винта.

Например, край лимба за 2 полных оборота сместился вдоль шкалы 2 на 1 мм, тогда $h = \frac{1 \text{ мм}}{2} = 0,5 \text{ мм}$.

При повороте лимба на одно деление его шкалы винт сместится вдоль оси на расстояние $\frac{h}{n}$, где n — число делений лимба, h — шаг винта.

Пример, если шаг винта $h = 0,5$ мм и окружность лимба разделена на 500 делений, то $\frac{h}{n} = \frac{0,5 \text{ мм}}{500} = 0,001 \text{ мм}$. Величина $\frac{h}{n}$ определяет точность сферометра.

При измерениях с помощью сферометра обычно вначале определяют нулевое положение его. Для этого помешают сферо-

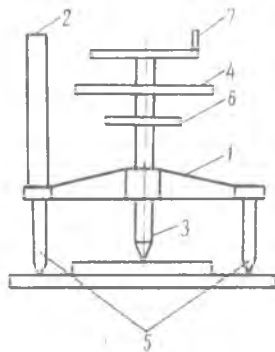


Рис. 3.

метр на зеркальное стекло так, чтобы на его поверхности находились три ножки сферометра. Вращают винт за головку δ до тех пор, пока нижний конец его не коснется стекла. Чтобы точнее уловить момент этого соприкосновения пользуются явлением интерференции или снабжают сферометр специальным приспособлением, устройство которого показано на рис. 4

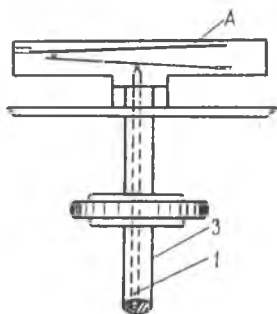


Рис. 4.

(Стальной стержень 1, который может перемещаться в полости микрометрического винта, в момент соприкосновения нижнего конца его с поверхностью стекла или исследуемого предмета заставляет подниматься свободный конец рычага А).

Как только винт коснется зеркальной поверхности делают отсчет нулевого положения сферометра по вертикальной шкале с точностью до 0,5мм и шкале

диска с точностью до 0,001мм.

Пример, шаг винта сферометра 0,5мм, число делений лимба - 500, цена деления вертикальной линейки 1мм. При соприкосновении винта с зеркальной поверхностью оказалось, что нижняя плоскость лимба находится от расположенного под ней и ближайшего к ней 18-го деления шкалы на расстоянии, равном более половины деления. Тогда отсчет по вертикальной линейке $N_0 = 18,5$ мм. (Если бы плоскость лимба находилась на расстоянии менее половины деления от 18 штриха шкалы, то $N = 18,0$ мм). Излишек над половиной деления определяют по лимбу. Пусть при этом 286 деление лимба совпадает с ребром вертикальной линейки, т.е. $n_0 = 0,286$ мм.

Нулевое положение соответствует отсчету:

$$X_0 = (N_0 + n_0) \text{ мм} = (18,5 + 0,286) \text{ мм} = 18,786 \text{ мм}.$$

А) Измерение толщины пластинки производят так. Определив нулевое положение, поднимают винт вращением головки δ так, чтобы под него можно было положить измеряемую пластину на

зеркальное стекло. Затем опускают винт до соприкосновения с измеряемой пластиной. При этом рычажок А должен занять то же положение на шкале 7, что и при нулевом положении сферометра. Определяют по вертикальной шкале 2 и лимбу новое положение микрометрического винта Х мм.

Очевидно, толщина пластины

$$d = |X_1 - X_0| \text{ мм.} \quad (2)$$

В). Измерение радиуса кривизны сферической поверхности. Определяют нулевое положение сферометра X_0 . Поднимают винт 3 так, чтобы сферометр можно было установить всеми ножками на исследуемую поверхность. Затем опускают винт до соприкосновения его со сферической поверхностью и делают отсчет нового положения винта Х мм. Высоту Н сферического сегмента, отсеченного плоскостью, проходящей через концы B_1, B_2, B_3 ножек сферометра (рис.5) вычисляют по формуле:

$$H = |X - X_0| \text{ мм.} \quad (3)$$

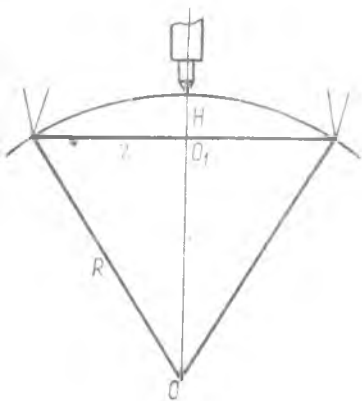


Рис.5.

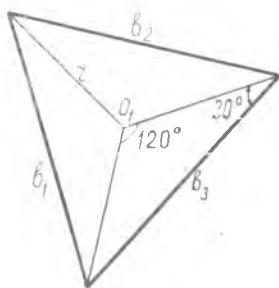


Рис.6.

Из рис.5 видно, что

$$R^2 = (R - H)^2 + z^2, \quad (4)$$

где R - радиус кривизны сферы, H - высота сегмента, отсеченного плоскостью, проходящей через концы ножек сферометра, стоящего на исследуемой сфере, z - радиус основания этого

сегмента. Из рис.6 видно, что $z = \frac{b}{\sqrt{3}}$ (5)
 где b — расстояние между ножками сферометра. Его можно измерить с помощью штангенциркуля или линейки. Подставив в (4) значение z из равенства (5), получим:

$$R = \frac{b^2 + 3H^2}{6H} \quad (6)$$

Упражнение 1. Определение диаметра проволоки микрометром.

Принадлежности: микрометр, проволока.

1. Убедиться, что микрометр исправен (нули его шкал совпадают).
2. Определить цену деления его шкал.
3. Измерить диаметр проволоки 5–6 раз в разных местах ее.

Результаты измерений занести в таблицу.

№ изм п/п	d мм	Δd мм

4. Вычислить среднее арифметическое значение диаметра, абсолютные ошибки отдельных измерений, а также среднюю абсолютную и относительную ошибки измерения его.

Упражнение 2. Определение толщины пластины стекла микрометром.

Принадлежности: микрометр, стеклянная пластинка.

1. Измерить толщину стеклянной пластины микрометром 5–6 раз в разных местах его. Результаты занести в таблицу.
2. Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерения толщины пластинки.

№ изм п/п	h мм	Δh мм

Упражнение 3. Определение толщины пластины сферометром.

Принадлежности: стеклянная пластинка, сферометр.

1. Определить цену деления вертикальной линейки γ и диска сферометра.
 2. Определить нулевое положение X_0 сферометра, поставив его на зеркальное стекло.
 3. Поднять винт 3 сферометра и подложить под него измеряемое стекло. Осторожно опустить винт до соприкосновения его с поверхностью измеряемого стекла. Сделать отсчет нового положения винта X_1 . Измерения нулевого положения сферометра и положения X_1 повторить 5-6 раз в разных местах пластинки.
- Результаты занести в таблицу.

Таблица.

N° изм. п/п	N_0	n_0	x_0	Δx_0	N	n	x_1	Δx_1	d
1									
2									
3									
4									
5									
Средние значения									

4. Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерения толщины стекла.

Упражнение 4. Измерение радиуса кривизны сферической поверхности.

Принадлежности: сферометр, линза, линейка или штангенциркуль.

1. Определить нулевое положение сферометра X_0 (не менее 5 раз в разных местах зеркального стекла).
2. Подняв винт на достаточную высоту, поставить сферо-

метр на выпуклую поверхность линзы. Определить новое положение винта X , соответствующее одновременному соприкосновению с поверхностью сферы ножек и винта сферометра. Измерение X повторить не менее 5 раз. Вычислить высоту сегмента по формуле (5).

3. Поставить сферометр на лист бумаги и сделать отпечатки ножек его, оттеняя их острым карандашом. Масштабной линейкой измерить три расстояния между ножками b_1, b_2, b_3 и найти их среднее арифметическое $b = \frac{b_1 + b_2 + b_3}{3}$.

4. Радиус кривизны линзы вычислить по формуле (6).

5. Вычислить относительную и абсолютную ошибки измерения радиуса.

Результаты измерений занести в таблицу.

N° изм. п/п	N_0	n_0	X_0	ΔX_0	N	n	X	ΔX	n	Δn	b	Δb	R	ΔR
1														
2														
3														
4														
5														
Средние значения														

Контрольные вопросы.

1. Устройство микрометра и сферометра.
2. Как определить сферометром радиус кривизны вогнутой сферической поверхности?

Л И Т Е Р А Т У Р А.

1. А.В.Кортнев, А.Н.Куценко, Ю.В.Рублев, Практикум по физике, введение, работа 1, 1965г.
2. Под редакцией проф. В.И.Ивероновой, Физический практикум, Задача 1 и 2, 1962.

РАБОТА № 3.

ТЕОДОЛИТ. ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ.

Принадлежности: теодолит, рулетка.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА.

Теодолит—один из совершенных приборов для измерения углов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Он широко применяется в авиации, геодезии, артиллерии и т.п.

Основанием теодолита служит подставка 1 (рис.1), на которой крепится лимб 2 с делениями, позволяющими производить измерение углов в горизонтальной плоскости. Относительно лимба, около общей с ним вертикальной оси, вращается круг (алидада), на котором укреплены два диаметрально расположенных нониуса (верньеры) и стойка 3. Лимб 2, алидада и стойка могут поворачиваться одновременно вокруг вертикальной оси при ослабленном винте 4 от руки, при закрепленном винте 4 микрометрическая подача осуществляется винтом 5. Алидада и зрительная труба 6 могут перемещаться вокруг той же оси относительно горизонтального лимба при освобожденном винте 7 от руки, при закрепленном винте 7 винтом 8 осуществляется микрометрическая подача. Зрительная труба 6 может вращаться вокруг горизонтальной оси, закрепленной на стойке 3. Положение трубы фиксируется на оси с помощью винта 9. Микрометрическая подача трубы в вертикальной плоскости осуществляется винтом 10 при закрепленном винте 9.

Внутри зрительной трубы перед окуляром помещена сетка нитей. Резкость изображения сетки достигается перемещением окуляра 6!

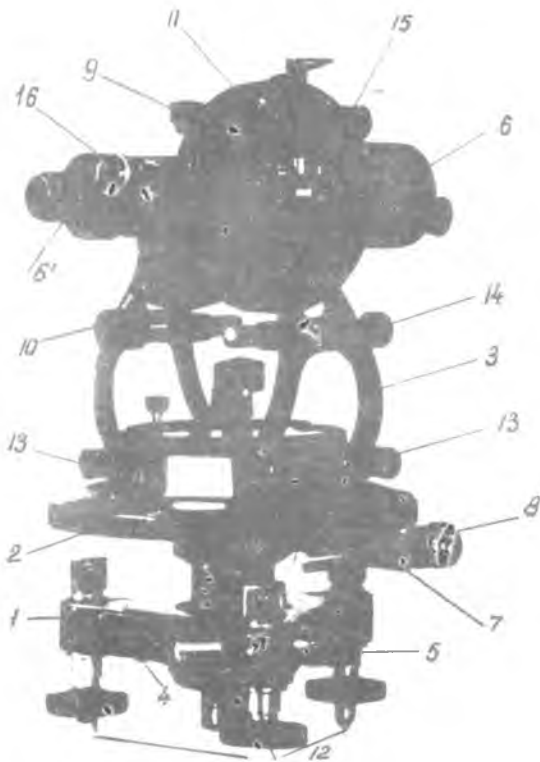


Рис.1.

На одном из концов горизонтальной оси насажен вертикальный лимб 11 с делениями, который при повороте трубы перемещается относительно двух диаметрально расположенных нониусов, с помощью которых производят отсчет углов в вертикальной плоскости.

Три подъемных винта 12 позволяют установить ось теодолита вертикально. Установку проверяют по уровням 13. (При правильной

установке пузырьки находятся на середине уровней).

Ось вращения зрительной трубы устанавливают горизонтально винтом 14 по уровню 15. Резкости изображения наблюдаемого объекта добиваются вращением кольца кремальеры 16 зрительной трубы.

Круговой нониус горизонтального и вертикального лимбов представляет собой небольшую дуговую линейку с делениями, которая перемещается относительно лимба, разделенного на градусы или части градуса (на 2, 3, 4, 6 или 12 частей). Число делений на угловом нониусе и их размеры бывают различны и зависят от цены деления лимба.

Предположим, что цена деления лимба α и угловые размеры n целых делений нониуса равны угловым размерам $(n-1)$ делениям лимба. Тогда цена одного малого деления нониуса β будет равна:

$$\beta = \frac{\alpha(n-1)}{n}.$$

Разность

$$\alpha - \beta = \alpha - \frac{\alpha(n-1)}{n} = \frac{\alpha}{n}. \quad (1)$$

Отношение $\frac{\alpha}{n}$ называют точностью нониуса. Точность нониуса определяет максимальную возможную погрешность при измерении угла. Если, например, цена деления лимба $\alpha = 20'$ и на нониусе нанесено $n = 40$ делений, то точность нониуса

$$\frac{\alpha}{n} = \frac{20'}{40} = 0,5'.$$

При любом положении нониуса относительно лимба одно из делений первого примерно совпадает с каким-либо делением второго. Отсчет по нониусу основан на способности глаза фиксировать это совпадение делений нониуса и лимба. Предположим, положение зрительной трубы таково, что нуль нониуса, например, горизонтального лимба оказался между "К" и "К+1" делениями лимба (см. рис. 2), причем m -ое деление нониуса совпадает с $(K+m)$ -ым делением лимба, тогда, очевидно, угол φ , соответствующий данному положению зрительной трубы теодолита, удовлетворяет равенству:

$$\varphi = K\alpha + m \frac{\beta}{n}, \quad (2)$$

т.е. измеряемый угол равен числу целых делений лимба, сложенному с произведением точности нониуса на порядковый номер

m -го деления нониуса, которое совпадает с некоторым делением лимба. Например, на рис.3 отсчет угла φ соответствует:

$$\varphi = 141^\circ 40' + 23 \frac{20'}{40} = 141^\circ 51,5'$$

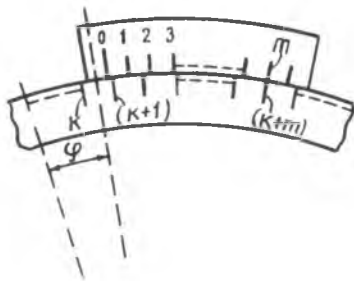


Рис.2.



Рис.3.

В этой работе предлагается измерить расстояние L от линии, соединяющей два положения теодолита A и B , до стены (в горизонтальной плоскости) (рис.4). Если расстояние между двумя положениями теодолита $AB = \ell$, то из рисунка 4 следует:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{L}{AD}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{L}{BD}, \quad AD + DB = \ell$$

Решая эти равенства совместно относительно L , получим:

$$L = \ell \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (3)$$

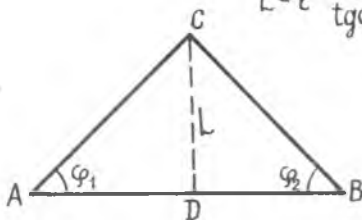


Рис.4.

Углы φ_1 и φ_2 измеряем с помощью теодолита, а l - рулеткой с миллиметровыми делениями.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Определить цену деления горизонтального лимба и точность его нониусов.

2. С помощью установочных винтов 12 и уровней 13, а затем винта 14 и уровня 15 установить теодолит на подставке А так, чтобы его ось была вертикальна, а ось зрительной трубы горизонтальна.

Установку производить так: сначала двумя винтами 12, расположенными против одного из уровней 13, вывести его пузырек приблизительно на середину уровня, затем двумя винтами 12, расположенными против второго из уровней 13 вывести его пузырек на середину уровня.

Если при этом пузырек первого уровня несколько смещен от середины, указанные действия повторять до тех пор, пока пузырьки не будут установлены на середине в обоих уровнях 13.

3. Закрепить винт 4, а винты 7 и 9 ослабить. Навести зрительную трубу 6 на метку - перекрестие. Добиться резкого изображения метки, вращая кольцо 16 зрительной трубы. Закрепить винты 7 и 9. Точку пересечения линий метки совместить с точкой пересечения визирных линий окуляра вращением винтов 8 и 10. Произвести отсчеты φ_1' и φ_1'' по нониусам горизонтального лимба согласно формуле (2).

4. Навести зрительную трубу на метку, находящуюся на линии АВ, способом, указанным в пункте 3. Сделать отсчеты φ_1''' и φ_1'''' по нониусам горизонтального лимба. Измерения, указанные в пунктах 3 и 4, повторить не менее пяти раз, слегка сбивая трубу и вновь наводя ее. Результаты занести в таблицу.

5. поместить теодолит на подставку В и повторить измерения, указанные в пунктах 2,3,4. Вновь полученные отсчеты углов $\varphi_2', \varphi_2'', \varphi_2''', \varphi_2''''$ записать в таблицу.

6. Измерить рулеткой расстояние l между двумя положениями теодолита А и В. Результат измерения занести в таблицу. Найти абсолютную и относительную ошибки измерения l .

7. Вычислить углы φ_1 и φ_2 по формулам:

$$\varphi_1 = \frac{(\varphi_{1\text{ср}}''' - \varphi_{1\text{ср}}') + (\varphi_{1\text{ср}}'''' - \varphi_{1\text{ср}}'')}{2} .$$

$$\varphi_2 = \frac{(\varphi_{2\text{ср}}''' - \varphi_{2\text{ср}}') + (\varphi_{2\text{ср}}'''' - \varphi_{2\text{ср}}'')}{2} .$$

8. Вычислить абсолютные ошибки измерения $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$.

9. Вычислить h по формуле (3).

10. Вычислить относительную и абсолютную ошибки измерения h .

ПРИМЕЧАНИЕ. При снятии показаний по лимбу следить по уровням, чтобы ось теодолита оставалась вертикальной.

Таблица.

Цена наименьш деления гори- зонтальн. лимба							
Точность нониусов							
Отсчеты по горизонтальному лимбу теодолита.	№ изм. п/п	1	2	3	4	5	Средние значения
	φ_1'						
	$\Delta \varphi_1'$						
	φ_1''						
	$\Delta \varphi_1''$						
	φ_1'''						
	$\Delta \varphi_1'''$						
	φ_1''''						
	$\Delta \varphi_1''''$						
	φ_2'						
	$\Delta \varphi_2'$						
	φ_2''						
	$\Delta \varphi_2''$						
	φ_2'''						
	$\Delta \varphi_2'''$						
	φ_2''''						
	$\Delta \varphi_2''''$						
	φ_1						
	$\Delta \varphi_1$						
	φ_2						
$\Delta \varphi_2$							
l							
Δl							
k							
Δk							
$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Как определить точность нониуса?
2. Как определить величину угла с помощью теодолита?
3. Вывести формулы для расчета абсолютной и относительной ошибок измерения углов и расстояния.

Л И Т Е Р А Т У Р А.

1. А.В. К о р т н е в, Р.В. Р у б л е в, А.Н. К у ц е н -
ко. Практикум по физике. Работа 1, упр.1, § 14 и упр.2, § 21.
1965.

РАБОТА № 4

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЕСЫ. ВЗВЕШИВАНИЕ ТЕЛА С ТОЧНОСТЬЮ ДО 0,1 мг.

Принадлежности: аналитические весы; комплект разновесок; взвешиваемое тело.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Типы и характеристики весов. В лабораторных исследованиях часто необходимо определять массы тел с заданной точностью. Это достигается при помощи взвешивания тел на весах. Рычажные весы представляют собой приборы для определения массы тел.

Допустим, что масса некоторого тела имеет величину

$$m_1 = 23,893 \text{ г.}$$

Точность в определении массы данного тела можно выразить так:

масса m_1 определена с точностью до одного миллиграмма;

ошибка (погрешность) в определении массы m_1 в большую и в меньшую стороны составляет доли миллиграмм (в данном случае $\pm 0,5 \text{ мг.}$).

В лабораториях наиболее широко применяются три типа весов.

1. Аналитические весы. Точность взвешивания на них составляет $0,0001 \text{ г.}$ ($0,1 \text{ мг.}$).

2. Полумикроаналитические весы. Их точность $0,00001 \text{ г.}$ ($0,01 \text{ мг.}$).

3. Микроаналитические весы. На них взвешивание производится с точностью до $0,000001\text{г}$ ($0,001\text{ мг}$).

Каждый из указанных типов весов имеет еще и другие важные характеристики: предельную нагрузку; чувствительность и цену деления.

Совершенно очевидно, что чем выше точность взвешивания, тем больше усложнена конструкция весов, а сам процесс взвешивания требует от экспериментатора и большей квалификации и большей затраты времени.

Методы взвешивания. При определении массы тела пользуются одним из четырех наиболее известных, методов взвешивания.

1. Прямой метод. На одну чашку весов кладут тело, а на другую гири. Масса взвешиваемого тела определяется массой гири и эквивалентной массой, фиксируемой по шкалам. В этом методе не учитываются инструментальные погрешности весов.

Инструментальные погрешности в совокупности иногда могут существенно и отрицательно влиять на определение массы тела. Вызываются эти погрешности различными причинами: неодинаковостью плеч коромысла весов; тем, что плечи коромысла не находятся в одной плоскости; прогибом коромысла; тем, что масса плеч коромысла распределена несимметрично относительно оси опоры; наличием температурных, электростатических и магнитных градиентов в том месте, где установлены весы. Для наилучшего исключения инструментальных погрешностей пользуются усложненными методами взвешивания.

2. Метод Гаусса. Он состоит в том, что тело взвешивают два раза, положив его вначале на одну чашку весов, а затем на другую. Масса тела при этом методе определится:

$$m = \sqrt{m_1 \cdot m_2},$$

где m_1 - масса тела при первом взвешивании; m_2 - масса того же тела при втором взвешивании.

3. Метод Борда. Тело уравновешивается на весах тарным грузом. Затем, снимают тело и на чашку весов кладут столько гири, чтобы опять уравновесить прежний тарный груз. Масса взвешиваемого тела определится при этом массой замещающих гирь.

4. Метод Менделеева. На одну чашку весов кладут гири, массой соответствующей предельной нагрузке весов, а на другую чашку — тарный вес и добиваются равновесия. Взвешиваемое тело кладут на чашку весов с гирями, а гири удаляют до наступления нового равновесия. Масса тела будет равна массе удаленных гирь.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕОРИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСОВ.

На аналитических весах можно взвешивать тела массой до 200г (на некоторых до 500 г). Это и есть одна из характеристик — предельная нагрузка. Как уже упоминалось, на аналитических весах тела можно взвешивать с точностью до 0,1 мг (0,0001г).

Конструкция весов такова, что возможные инструментальные погрешности могут составлять не больше $\pm 0,01$ мг, поэтому при взвешивании пользуются прямым методом.

Наиболее существенной характеристикой весов является их чувствительность, которая в конечном счете и определяет точность взвешивания. Чувствительностью весов называют отношение тангенса угла отклонения стрелки весов к массе того перегрузка, который вызывал это отклонение

$$\omega = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\Delta m}$$

Так как отклонение стрелки ограничено малыми углами ($\varphi < 5^\circ$), то с большей степенью точности можно считать, что

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$$

Шкала под концом стрелки не дуговая, а линейная. Но стрелка весов в десять раз длиннее шкалы, поэтому можно считать, что угол отклонения стрелки пропорционален числу делений, на которые она отклонилась. В связи с этим чувствительность весов определяют двумя способами.

1. Отношением угла φ , на который отклонилась стрелка, к тому грузу Δm , который вызвал это отклонение

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta m} \left[\frac{\text{рад}}{2} \right] \quad (2)$$

2. Отношением числа делений n шкалы, на которое отклонился конец стрелки, к тому грузу Δm , который вызвал это отклонение

$$\omega = \frac{n}{\Delta m} \left[\frac{\text{дел}}{2} \right] \quad (3)$$

Чувствительность весов численно равна тому количеству делений шкалы, на которые отклоняется стрелка весов, если на одну из их чашек положена гиря в один миллиграмм.

Определим, от каких величин зависит чувствительность весов. Допустим, что плечи коромысла весов равны между собой ($AO=OB$) и они не прогибаются при взвешивании. На левой чашке масса гиря m_1 , а на правой масса груза m_2 и коромысло находится в горизонтальном положении (рис.1).

Правило моментов сил тяжести действующих на тело и на гири, запишется так:

$$m_1 \cdot g \cdot AO = m_2 \cdot g \cdot OB.$$

Ясно, что в этом случае масса взвешиваемого тела равна массе гирь $m_2 = m_1$.

Если теперь на чашку с гирями положить добавочную гирю Δm , то коромысло и стрелка отклонятся на угол φ . Центр тяжести коромысла весов и стрелки переместится из точки C в точку C' . Однако система остановится и будет иметь место новое равновесие, для которого

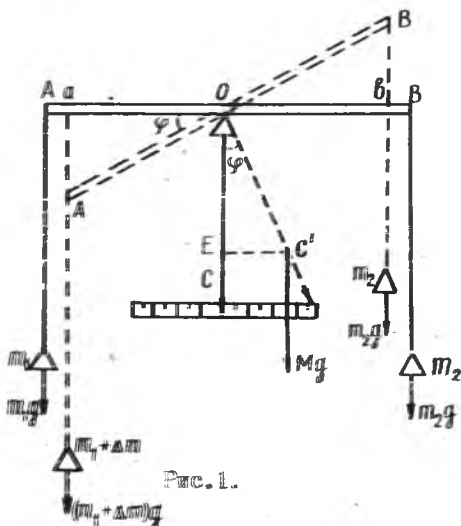


Рис. 1.

правило моментов сил запишется в таком виде:

$$(m_1 + \Delta m) g \cdot a_0 = m_2 g \cdot b_0 + M \cdot g \cdot C'E$$

После замены ($a_0 = AO \cdot \cos \varphi$, $b_0 = BO \cdot \cos \varphi$ и $C'E = CO \cdot \sin \varphi$) и сокращения на g имеем:

$$(m_1 + \Delta m) \cdot AO \cos \varphi = m_2 \cdot BO \cdot \cos \varphi + M \cdot CO \cdot \sin \varphi,$$

$$m_1 \cdot AO + \Delta m \cdot AO = m_2 \cdot BO + M \cdot CO \cdot \operatorname{tg} \varphi .$$

По условию $m_1 = m_2$, $AO = BO = \ell$ (длина плеч коромысла). После нового сокращения получаем окончательную формулу, из которой определяется чувствительность весов

$$\Delta m \cdot \ell = M \cdot CO \cdot \operatorname{tg} \varphi ,$$

$$\omega = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\Delta m} = \frac{\ell}{M \cdot CO} \quad (1-a); \quad \omega = \frac{\varphi}{\Delta m} = \frac{\ell}{M \cdot CO} \quad (2-a);$$

$$\omega = \frac{n}{\Delta m} = \frac{\ell}{M \cdot CO} \quad (3-a).$$

Здесь ℓ длина плеча коромысла весов; CO - расстояние между центром тяжести коромысла и осью его опоры.

Если не учитывать прогиба плеч весов и то, что плечи могут находиться не в одной плоскости, то ℓ и CO будут постоянными величинами. M - масса коромысла и стрелки весов. Отсюда следует, что чувствительность весов является постоянной величиной и не зависит от массы взвешиваемого тела.

Цена деления шкалы весов обратно пропорциональна их чувствительности

$$\Omega = \frac{1}{\omega} = \frac{\Delta m}{n} , \quad (4)$$

$$\Delta m = \Omega n .$$

Цена деления есть тот минимальный груз в долях грамма или миллиграмма, который отклоняет стрелку весов на одно деление. Цена деления шкалы любого прибора и есть то минимальное значение величины, которое можно регистрировать этим прибором.

ОПИСАНИЕ ВЕСОВ.

Весы заключены в застекленный корпус, который устанавливается в местах с наименьшей вибрацией. Доступ к ним осуществляется через боковые двери их корпуса. Набор гирь хранится в дополнительном футляре. Самая малая гиря имеет массу 10 мг. Изготавливать

гири меньше 10 миллиграмм непрактично.

Роль гирь в 1 мг, 2 мг и т.д. выполняет так называемый рейтер-проволочка массой в 10 мг, который навешивается на планку ВВ, связанную с верхней частью коромысла (рис.2). Так как каждая сторона планки размечена на 10 одинаковых интервалов, то рейтер, установленный, например, на первое деление правой части планки, будет создавать такой же момент силы, как и гиря в 1 мг, положенная на эту чашку.

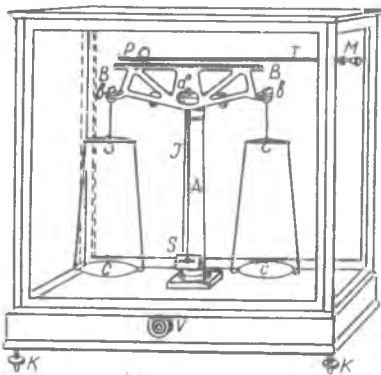


Рис.2.

Рукояткой М через штангу Т рейтер Р можно навешивать на любое деление планки ВВ. У некоторых экземпляров весов навешивание рейтера осуществляется поворотом лимба, укрепленного на футляре.

Каждый из 10 интервалов планки размечен на 10 более мелких интервалов, но ими, как правило, не пользуются при взвешивании.

В середину коромысла перпендикулярно его длине вставлена стальная призма, ребром кото-

рой коромысло опирается на агатовую полированную пластинку колонки А. Призмы установлены и на концах коромысла ВВ. На ребрах конечных призм через опорные планки подвешены чашки весов СС.

Поворотом рукоятки V осуществляется поднятие коромысла и чашек весов. Тем самым призмы освобождаются от своих опор и устраняется их излишний износ. Такое состояние весов называется **а р р е т и р о в а н н ы м** (нерабочим) состоянием.

Некоторые виды весов усовершенствуют. Например, устанавливают над чашками воздушные демпферы, чтобы уменьшить длительность колебаний стрелки. Указательная стрелка иногда заменяется световым зайчиком. Осветитель таких весов, естественно, подключается к источнику тока.

На весах типа АДВ-200-МС с помощью двух, совмещенных на одной оси и вращающихся независимо друг от друга, лимбов накладываются или снимаются разновески в пределах от 10 до 1210 миллиграмм. Вращением малого лимба происходит наложение или снятие десятков миллиграмм, а вращением большого лимба накладываются или снимаются сотни миллиграмм. С ручкой арретира у этих весов совмещен выключатель оптической шкалы отсчета.

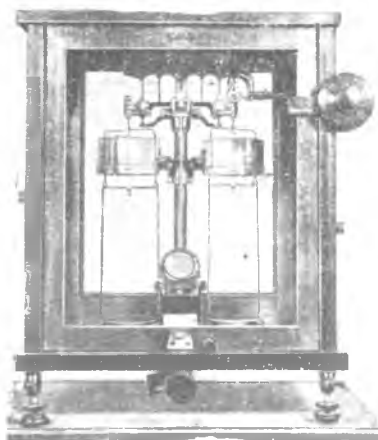


Рис. 3.

ПРАВИЛА ПОЛЬЗОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМИ ВЕСАМИ.

1. Нагрузку и разгрузку чашек весов, а также перестановку рейтера на их коромысле разрешается производить только на арретированных весах.
2. Грузы следует располагать так, чтобы общий центр тяжести их приходился по возможности на середину чашки весов.
3. Освобождать и арретировать весы следует медленно и плавно. Арретируют их в тот момент, когда стрелка проходит положение равновесия.
4. Разновески нужно брать пинцетом (руками к ним прикасаться нельзя), снимая разновески, следует их класть только в футляр, каждую на предназначенное ей место.
5. Не следует полностью освобождать коромысло, пока весы еще мало уравновешены: его нужно освободить настолько, чтобы заметить, которая из чашек легче, судя по отклонению стрелки. После этого следует арретировать весы и прибавить или убавить разновесок (их разрешается класть только на одну чашку весов). Арретир полностью открывают тогда, когда коромысло начинает свободно качаться. Если при этом чашки качаются с большей амплитудой, их

успокаивают прикосновением кончика бумаги.

6. Если амплитуда колебания котомысла мала, то ее можно увеличить. Для этого достаточно приоткрыть дверцу весов и слегка махнуть перед чашкой листом бумаги или рукой.

7. При наблюдении качания весов дверцы их должны быть закрытыми.

8. Не следует оставлять надолго грузы на чашках, особенно, если весы не апретированы.

Когда взвешивание окончено, весы надо апретировать, снять нагрузки и закрыть дверцы.

ПРИМЕЧАНИЕ: Студентам не следует самим производить регулировку весов. Если весы неисправны, необходимо обратиться к преподавателю или лаборанту.

ВЗВЕШИВАНИЕ НА АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСАХ.

На аналитических весах можно определить массу взвешиваемого тела с точностью до 0,1 миллиграмма. Вся процедура взвешивания сводится к трем операциям:

- 1) определению нулевой точки P_0 ненагруженных весов (положение равновесия ненагруженных весов);
- 2) определению положения равновесия весов с перегрузкой P_n ;
- 3) определению положения равновесия весов с недогрузкой P_n .

Определение нулевой точки ненагруженных весов. Казалось бы, положением равновесия весов должно быть то деление на шкале, на которое указывает стрелка, когда весы освобождены от апретира и находятся в спокойном состоянии. Однако такое равновесие не принимают во внимание. Дело в том, что равновесие весов должно обеспечиваться равенством моментов сил тяжести, действующих на правую и левую чашки. На самом же деле к моментам сил тяжести прибавляются нежелательные моменты сил трения. Силы трения покоя, как известно, много больше сил трения при движении. Следовательно, чтобы свести к минимуму нежелательные моменты сил трения, равновесие весов определяют не в состоянии их покоя, а при колебании. Нулевой точкой ненагруженных весов называется то деление шкалы, около которого колеблется стрелка, когда чашки весов пусты.

Эта точка определяется из пяти отсчетов колебаний стрелки.

$$n_0 = \frac{n_1 + n_3 + n_5}{3} + \frac{n_2 + n_4}{2} \quad (5)$$

Поясним это на примере.

1. Допустим, что шкала имеет нуль на середине (рис. 4).

Стрелка при отклонениях остановилась на таких делениях:

$$n_1 = +3,5, \quad n_2 = -2, \quad n_3 = +3,$$

$$n_4 = -1,5 \quad \text{и} \quad n_5 = 2.$$

Из этих данных нулевая точка определится:

$$n_0 = \frac{3,5 + 3 + 2}{3} + \frac{-2 - 1,5}{2} = +1,6$$

2. Допустим, что нуль находится в начале шкалы (рис. 5).

Отсчеты оказались:

$$n_1 = 2, \quad n_2 = 1,5, \quad n_3 = 4,5,$$

$$n_4 = 2 \quad \text{и} \quad n_5 = 5,5.$$

Из этих данных нулевая точка определится: $n_0 = 4,2$.

Поворотом рукоятки (рис. 6) отпускают арретир весов и наблюдают за колебанием их стрелки. Добиваются того, чтобы амплитуда колебаний стрелки не выходила за пределы шкалы, но была достаточно большой. Замечают и одновременно записывают те 5 делений на шкале, на которых останавливалась стрелка, совершая 2 полных колебания. По формуле (5) определяют n_0 .

Завешивание тела и определение точек равновесия весов при перегрузке и недогрузке. Эзвешиваемое тело кладут обычно на левую чашку весов, а гири на правую, соблюдая указанные выше правила взвешивания. Добиваются такого состояния, когда самая малая гиря (разновеска) в 10 мг, положенная на чашку весов, уводит стрелку

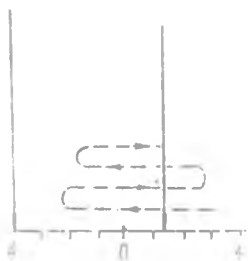


Рис. 4.

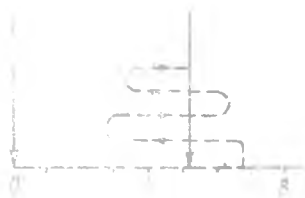


Рис. 5.

влево от Π_0 (состояние перегрузки — лишние гири). Тогда же эта гиря в 10 мг снимается с чашки, стрелка весов должна уходить вправо от Π_0 (состояние недогрузки — не хватает гирь).

Когда такое состояние достигнуто, гирю в 10 мг кладут на свое место в футляр и начинают манипулировать рейтером. Обиваются по существу такого состояния, чтобы на одном делении планки рейтер создавал бы состояние перегрузки, а на другом, меньшим на одно деление, состояние недогрузки.

Теперь, когда созданы посредством рейтера состояния перегрузки весов, определяют (так же как и Π_0) точку равновесия $\Pi_{\text{п}}$ перегруженных весов и точку равновесия $\Pi_{\text{н}}$ недогруженных весов.

Правильность определения этих точек проверяется по неравенству

$$\Pi_{\text{н}} > \Pi_0 > \Pi_{\text{п}}$$

Если неравенство выполняется, то приступают к подсчету массы взвешенного тела. Она будет состоять из трех слагаемых.

1. Масса всех гирь на чашке весов $M_{\text{г}}$. Так как самая малая гиря (разновеска) имеет массу 10 мг ($0,01\text{г}$), то $M_{\text{г}}$ будет представлена числом граммов с точностью до второго знака (до сотых долей).

2. Эквивалентная масса рейтера $M_{\text{р}}$ будет равна тому количеству единиц миллиграммов, которое равно номеру деления на планке, на которой находился рейтер, когда он создает состояние недогрузки. Это объясняется тем, что рейтер массой в 10 мг , находясь на первом (из десяти) делении планки создает такой же момент сил, как и гиря в один миллиграмм, положенная на чашку весов. Таким образом, эквивалентная масса рейтера $M_{\text{р}}$ будет определяться с точностью до единиц миллиграмм (тысячных долей грамма)

3. Эквивалентная масса, отсчитанная по делениям шкалы $M_{\text{ш}}$. Эта масса определяется следующим образом. Масса гирь и эквивалентная масса рейтера в сумме меньше массы тела, т.е. равновесие весов характеризуется состоянием недогрузки.

$\Pi_{\text{н}}$ правее Π_0 . Если рейтером увеличить массу гирь на 1 мг , то

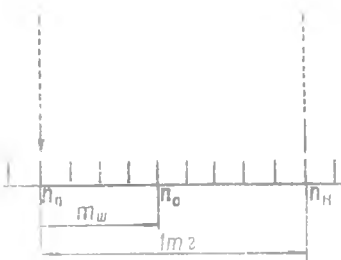


Рис. 6.

стрелка весов переходит в другое состояние равновесия - равновесие перегрузки n_n (n_n находится левее n_0). Таким образом, масса гирь в 1 мг отклоняет стрелку на $n_n - n_n$ делений шкалы. Чтобы добиться равновесия нагруженных весов в точке n_0 необходимо к массе гирь и эквивалентной массе рейтера, когда он дает состояние непогрузки, прибавить гирю меньшую, чем 1 мг, т.к. n_0 находится на шкале между n_n и n_n . Обозначим массу этой эквивалентной гири, определяемой по делениям шкалы весов через $m_{ш}$. Величина ее массы определится из пропорции (рис. 6)

$$\begin{aligned} (n_n - n_n) & \text{ ————— } 1 \text{ мг}, \\ (n_0 - n_n) & \text{ ————— } m_{ш}, \end{aligned}$$

откуда

$$m_{ш} = \frac{n_n - n_0}{n_n - n_n} \cdot 1 \text{ мг}. \quad (7)$$

Ясно, что эквивалентная масса, определяемая по делениям шкалы, будет составлять доли миллиграмма, т.к. в (7) числитель меньше знаменателя. Точность определения $m_{ш}$ будет составлять десятую долю миллиграмма (0,0001г).

Таким образом, масса взвешенного тела определится:

$$m_T = m_r + m_p + m_{ш}$$

Пример:

$$m_r = 14,25 \text{ г}; m_p = 0,004 \text{ г}; m_{ш} = 0,0007 \text{ г},$$

$$m_T = 14,25 \text{ г} + 0,004 \text{ г} + 0,0007 \text{ г} = 14,2547 \text{ г}.$$

Вычислив массу взвешиваемого тела, определяют из формулы (7) чувствительность весов ω и цену деления Ω

$$\omega = \frac{n}{\Delta m} = \frac{n_n - n_n}{1 \text{ мг}}; \quad \Omega = \frac{1}{\omega} = \frac{\Delta m}{n} = \frac{1 \text{ мг}}{n_n - n_n}$$

Записывают номер весов, на которых производилось взвешивание и номер взвешиваемого тела.

ВЫЧИСЛЕНИЕ МАССЫ ВЗВЕШИВАЕМОГО ТЕЛА С УЧЕТОМ
ПОПРАВКИ НА СИЛУ АРХИМЕДА.

Плотность взвешиваемого тела не равна плотности гирь. Взвешивание производилось в воздухе. Вследствие этого, в процессе взвешивания, на тело и на гири действовали разные выталкивающие силы - силы Архимеда. Отсюда следует, что полученная масса тела m_T не равна массе гирь m'_G , где $m'_G = m_G + m_p + m_{ш}$

Если плотность тела ρ_T больше плотности гирь ρ_G ($\rho_T > \rho_G$), то $m_T < m'_G$.

наоборот: если $\rho_T < \rho_G$, то $m_T > m'_G$.

Эти погрешности не возникли бы, если бы взвешивание производилось в вакууме.

Однако нет необходимости усложнять процесс взвешивания, т.к. математически можно вычислить поправку на действие силы Архимеда. Если учитывать эту поправку, то масса тела будет соответствовать массе гирь.

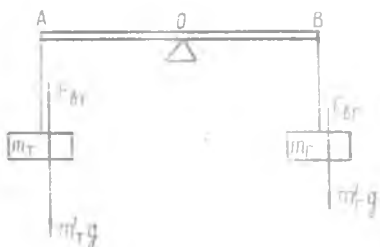


Рис. 7.

При взвешивании в воздухе (рис. 7), когда весы находились в равновесии, правило моментов сил записывается так:
 $(m'_T g - F_{\delta T}) A O = (m'_G g - F_{\delta G}) B O$
 т.к. $A O = B O$, то

$$m'_T g - F_{\delta T} = m'_G g - F_{\delta G} \quad (8)$$

Здесь m'_T масса тела; m'_G - масса гирь; g - ускорение свободного падения;

$F_{\delta T}$ - сила Архимеда, действующая на тело, будет

$$F_{\delta T} = V_T \rho_{\text{воз}} g = \frac{m_T}{\rho_T} \rho_{\text{воз}} g \quad (9)$$

$F_{\delta G}$ - сила Архимеда, действующая на гири, определится

$$F_{\delta G} = V_G \rho_{\text{воз}} g = \frac{m'_G}{\rho_G} \rho_{\text{воз}} g \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) $\rho_в$ - плотность воздуха.

Если значения $F_{вТ}$ из (9) и $F_{вГ}$ из (10) подставить в (8) и сократить на Q , получим следующее:

$$m'_Т - \frac{m'_Т}{\rho_Т} \rho_в = m'_Г - \frac{m'_Г}{\rho_Г} \rho_в \quad (8-а)$$

Из последнего соотношения масса тела $m'_Т$ выразится через массу гирь $m'_Г$ формулой

$$m'_Т = m'_Г \left(\frac{1 - \frac{\rho_в}{\rho_Г}}{1 - \frac{\rho_в}{\rho_Т}} \right) \quad (8-б)$$

Производя деление числителя на знаменатель по правилам деления многочленов, получим

$$\frac{1 - \frac{\rho_в}{\rho_Г}}{1 - \frac{\rho_в}{\rho_Т}} = 1 - \frac{\rho_в}{\rho_Г} + \frac{\rho_в}{\rho_Т} - \frac{\rho_в^2}{\rho_Г \rho_Т} + \frac{\rho_в^2}{\rho_Т^2} - \dots$$

Величины $\frac{\rho_в}{\rho_Г}$ и $\frac{\rho_в}{\rho_Т}$ малы. Поэтому их квадратами можно пренебречь. В этом случае для массы тела получаем равенство

$$m'_Т = m'_Г \left(1 - \frac{\rho_в}{\rho_Г} + \frac{\rho_в}{\rho_Т} \right) = m'_Г + m'_Г \rho_в \left(\frac{1}{\rho_Т} - \frac{1}{\rho_Г} \right) \quad (11)$$

Среднюю плотность воздуха $\rho_в$ и осредненную плотность всех гирь с достаточной степенью точности можно брать такими:

$$\rho_в = 0,0012 \text{ г/см}^3; \quad \rho_Г = 8,4 \text{ г/см}^3.$$

подставив значения $\rho_в$ и $\rho_Г$ в (9), получаем окончательную формулу для определения массы взвешиваемого тела

$$m'_Т = m'_Г + m'_Г \cdot 0,0012 \text{ г/см}^3 \left(\frac{1}{\rho_Т} - 0,12 \text{ см}^3/\text{г} \right) \quad (12)$$

Здесь $m'_Г$ - масса гирь, $(m'_Г = m_Г + m_Р + m_Ш)$,
 $\rho_Т$ - плотность взвешиваемого тела.

Вычисление массы тела с учетом поправки на силу Архимеда по формуле (12) следует производить в граммах также с точностью до четвертого знака после запятой.

Результаты всех измерений и вычислений записывают в таблицах № 1 и № 2.

Таблица № 1

	Отклонения стрелки					Положение репитера
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	
	$\Pi = \frac{\frac{\Pi_1 + \Pi_3 + \Pi_5}{3} + \frac{\Pi_2 + \Pi_4}{2}}{2}$					
Ненагруженные весы						X
Взвешивание с недогрузкой						Π_0
Взвешивание с перегрузкой						Π_n
						Π_p

Таблица № 2

Масса гирь	Эквивалентная масса репитера	Эквивалентная масса шкалы	Масса тела без поправки	Масса тела с учетом поправки на силу Архимеда
m_g	m_p	$m_{ш}$	$m_T = m_r + m_p + m_{ш}$	m_T

РАБОТА (№ 5)

ПИКНОМЕТР. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Плотностью вещества называют массу, заключенную в единице объема. Если тело однородно, масса его m , объем V , то плотность может быть определена согласно равенства:

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

С понятием плотности не следует смешивать понятие об удельном весе вещества. Удельным весом вещества называют вес единицы объема тела. Удельный вес γ и плотность тела ρ связаны соотношением: $\gamma = \rho g$, где g - ускорение силы тяжести. Если есть два тела одинакового объема, плотности которых ρ_1 и ρ_2 , а массы соответственно m_1 и m_2 то справедливо равенство:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1}{m_2} . \quad (1)$$

Это равенство используют для определения плотности вещества с помощью пикнометра.

Пикнометр представляет собой сосуд, объем которого чаще всего 25-50 мл.

Пикнометры самой различной формы (см. рис.1) изготавливают почти исключительно из стекла вследствие его малой химической активности.

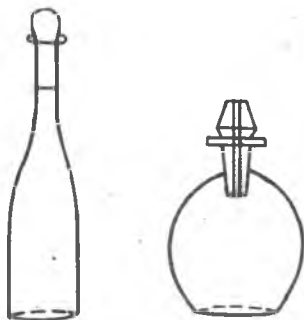


Рис. 1.

Наиболее простым является пикнометр первой формы, наполнение которого жидкостью производится с помощью пипетки до метки на горлышке.

Пикнометр второй формы имеет притертую пробку с капилляром внутри. Если пикнометр, наполненный до краев жидкостью, закрыть пробкой, то излишек жидкости вытесняется через капилляр.

Для определения плотности исследуемой жидкости с помощью пикнометра достаточно произвести три взвешивания.

1. Определить массу чистого сухого пикнометра m_1 , взвешивая его в воздухе.

2. Наполнить пикнометр дистиллированной водой комнатной температуры до метки. Определить массу пикнометра с водой m_2 .

Плотность воды ρ_1 находится из таблиц. Очевидно, $(m_2 - m_1)$ - масса воды в объеме пикнометра.

3. Наполнить чистый пикнометр исследуемой жидкостью до метки и определить его массу m_3 . $(m_3 - m_1)$ - масса исследуемой жидкости в объеме пикнометра. Тогда, согласно (1), можно записать:

$$\rho'_x = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho_1, \quad (2)$$

где ρ'_x - плотность исследуемой жидкости без учета поправки.

При специальных лабораторных исследованиях из жидкостей предварительно удаляют растворенный воздух, изменяющий их плотность. При переливании жидкости в пикнометр нужно следить за тем, чтобы внутри него не осталось пузырьков воздуха, для этого наливают жидкость в пикнометр так, чтобы она стекала по его стенкам.

При точном определении плотности температура жидкостей должна оставаться строго постоянной, что достигается термостатированием. Недостатком пикнометров является зависимость их объемов (вследствие расширения стекла) от температуры. Ошибка, возникающая при этом, может быть устранена, если пикнометр перед взвешиванием поместить на 10-20 минут в стакан с водой комнатной

температуры и после этого дополнить или убавить количество жидкости до метки.

Формула (2) дает так называемую непоправленную плотность жидкости, так как в ней не учитываются потери веса в воздухе при определении массы тела на весах.

Для внесения поправки в формулу (2) на указанные потери используем условие равновесия равноплечих весов в воздухе и закон Архимеда.

Получим следующие равенства для указанных выше взвешиваний.

$$P = P_1 - V\rho_2g, \quad (3)$$

- где P - вес сухого пикнометра в воздухе;
 P_1 - вес разновесок в пустоте, $P_1 = m_1g$;
 m_1 - масса разновесок при этом взвешивании;
 V - объем воздуха, вытесненного разновесками;
 ρ_2 - плотность воздуха в условиях опыта;
 g - ускорение свободного падения;
 ρ_2Vg - вес воздуха, вытесненного разновесками.

Если ρ_3 — плотность разновесок, то $V = \frac{m_1}{\rho_3}$.
 Тогда равенство (3) можно переписать в виде:

$$P = m_1g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3} \right). \quad (4)$$

Для второго взвешивания можно записать равенство:

$$P + \rho_1V_1g - \rho_2V_1g = m_2g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3} \right), \quad (5)$$

- где ρ_1V_1g - вес воды в объеме пикнометра;
 ρ_2V_1g - вес воздуха, вытесненного водой;
 m_2 - масса разновесок при втором взвешивании.

Третье взвешивание позволяет записать равенство:

$$P + \rho_x V_1 g - \rho_2 V_1 g = m_3 g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3} \right), \quad (5)$$

где ρ_x - истинная плотность исследуемой жидкости;

$\rho_x V_1 g$ - вес ее в объеме пикнометра;

$\rho_2 V_1 g$ - вес воздуха, вытесненного ею;

m_3 - масса разновесок при третьем взвешивании.

Вычитая (4) из (5) и (6) и деля результаты один на другой, получим.

$$\rho_x = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2. \quad (7)$$

Для определения плотности твердого тела с помощью пикнометра также необходимо произвести три взвешивания.

1. Чистый пикнометр наполняют дистиллированной водой комнатной температуры до метки и определяют его массу m'_1 .

2. Взвешивают в воздухе исследуемое твердое тело m'_2 .

3. Помещают твердое тело в пикнометр с водой. Воду, поднявшуюся выше метки, удаляют пипеткой. Определяют массу пикнометра с водой и твердым телом m'_3 .

Очевидно, объем удаленной воды равен объему исследуемого твердого тела. Масса удаленной воды равна

$$(m'_1 + m'_2 - m'_3).$$

Используя равенство (1), можно записать:

$$\rho'_x = \frac{m'_2}{m'_1 + m'_2 - m'_3} \cdot \rho_1. \quad (8)$$

Плотность твердого тела ρ'_x определена без учета потерь веса в воздухе, которые наблюдались при взвешивании.

Рассуждения, аналогичные приведенным при выводе формулы (7), дают следующее выражение исправленного значения плотности твердого тела с учетом указанных потерь:

$$\rho_x = \frac{m'_2}{m'_1 + m'_2 - m'_3} (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2. \quad (9)$$

У п р а ж н е н и е 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПИКНОМЕТРА.

Принадлежности: аналитические весы; разновес; пикнометр; дистиллированная вода; исследуемая жидкость; термометр; фильтровальная бумага; пипетка.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.

1. Определить массу чистого сухого пикнометра, соблюдая правила взвешивания на аналитических весах (см. работу 4) m_1 .
2. Наполнить пикнометр дистиллированной водой до метки (излишки воды удалить пипеткой). Сушить внешнюю поверхность пикнометра фильтровальной бумагой. Определить его массу m_2 .
3. Вылить воду из пикнометра, ополоснуть его исследуемой жидкостью и наполнить его до метки. Сушить поверхность фильтровальной бумагой. Определить массу пикнометра с исследуемой жидкостью m_3 . Результаты измерения занести в таблицу 2.
4. Вычислить плотность исследуемой жидкости по формуле (7).
5. Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерения плотности. Результаты вычислений занести в таблицу 2.

Т А Б Л И Ц А 1.

Температура воды $t^{\circ}\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Плотность воды $\rho, \text{г/см}^3$	0,99897	0,99880	0,99862	0,99843	0,99823	0,99802	0,99780	0,99757	0,99732	0,99707

У п р а ж н е н и е 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
ПИКНОМЕТРОМ.

Принадлежности: аналитические весы; газвес; пикнометр; исследуемое твердое тело (дробь); сосуд с дистиллированной водой; пипетка; термометр; фильтровальная бумага.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.

1. Ополоснув пикнометр дистиллированной водой, наполнить его ею до метки (излишки удалить пипеткой). Осушить внешнюю поверхность пикнометра фильтровальной бумагой. Определить массу пикнометра с водой m_1' , соблюдая правила взвешивания на аналитических весах (см. работу 4).

2. Определить массу твердого тела (дроби) m_2' .

3. Поместить взвешенную дробь в пикнометр. Воду, поднявшуюся выше метки удалить пипеткой.

Определить массу пикнометра с водой и дробью m_3' . На дроби не должно оставаться пузырьков воздуха. Наличие последних ввиду малости самих дробинок может весьма значительно исказить результат. Взвешивание производить по всем правилам точного взвешивания. Результаты измерения занести в таблицу 3.

4. Вычислить плотность твердого тела по формуле (9).

5. Вычислить абс. и отн. ошибки измерения плотности.

ТАБЛИЦА 3.

№ п/п	Вид измерения	Крайние отклонения стрелки весов при колебаниях.					Положение равновесия весов	Масса разности весов
		μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ	
1.	Определение нулевой точки.							
2.	Определение массы пикнометра с	с недогрузкой						
3.	водой		с перегрузкой					
4.	Определение массы	с недогрузкой						
5.	твердого тела.		с перегрузкой					
6.	Определение массы пикнометра с водой	с недогрузкой						
7.	и твердым телом.		с перегрузкой.					
8.	Комнатная температура $t^\circ\text{C}$							
9.	Плотность воды ρ_1							
10.	Плотность воздуха ρ_2							
11.	Плотность исследуемой жидкости ρ_x							
12.	Абс. ошибка $\Delta\rho_x$							
13.	Отн. ошибка $E = \frac{\Delta\rho_x}{\rho_x} \cdot 100\%$							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что называется плотностью вещества? Удельным весом? Единицы измерения этих величин в системе СИ и СГС.
2. Получите формулу для вычисления плотности жидкости (твердого тела) с учетом потерь веса в воздухе.
3. Сформулируйте правила и порядок взвешивания на аналитических весах.

Л И Т Е Р А Т У Р А.

1. А.В.К о р т н е в, Ю.В.Р у б л е в, А.Н.К у щ е н к о.
"Практикум по физике". 1963.
2. Под редакцией проф.В.И.И в е р о н о в о й. "Физический практикум". 1962.

РАБОТА № 6.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Для однородного тела массы m и объема V плотность определим по равенству:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Согласно (1) для вычисления плотности однородного тела достаточно знать его массу и объём. Массу тела можно определить путём взвешивания. Непосредственное определение объёма тела может быть затруднительно, если поверхность тела имеет сложную форму. В таком случае объём тела определяют на основании закона Архимеда: на всякое тело, погруженное в жидкость (газ), действует сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости (газа), вытесненной телом. В качестве жидкости удобно использовать дистиллированную воду, плотность которой при температуре опыта может быть определена из таблиц. Если P - вес вытесненной телом воды, ρ_1 - плотность воды, то объём тела будет $V = \frac{P}{\rho_1 g}$, где g - ускорение свободного падения.

У п р а ж н е н и е 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ВЗВЕШИВАНИЕМ.

Принадлежности: аналитические весы; разновес; треножник; тонкая проволока; сосуд с дистиллированной водой; термометр; исследуемое тело.

Если исследуемое твердое тело тонет в воде, то для определения плотности гидростатическим взвешиванием достаточно определить вес его в воздухе P_1 , затем, подвесив тело на тонкой проволоке к крючку одной из чашек весов, определить вес тела с проволокой в воздухе P_2 , а погрузив тело в дистиллированную воду, определить вес тела с проволокой в воде P_3 .

Вес вытесненной телом воды равен $P_2 - P_3$.

Если ρ_1 - плотность воды при температуре опыта, то объём тела определяется равенством $V = \frac{P_2 - P_3}{\rho_1 g}$, где g - ускорение свободного падения. Тогда на основании (1) плотность исследуемого тела ρ_x' выразится формулой:

$$\rho_x' = \frac{P_1}{P_2 - P_3} \rho_1. \quad (2)$$

Формула (2) получена без учета потери веса в воздухе.

Чтобы найти плотность исследуемого тела ρ_x с учетом этой потери, воспользуемся условием равновесия равноплечих весов в воздухе (вес тела в воздухе, равен весу разновески в воздухе, уравновешивающих тело) и законом Архимеда. Тогда условие равновесия весов при взвешивании исследуемого тела может быть выражено равенством:

$$\rho_x g V - \rho_2 g V = P_1 - V_2 \rho_2 g, \quad (3)$$

где ρ_x - плотность тела, V - его объём, g - ускорение свободного падения, ρ_2 - плотность воздуха при условиях опыта, $P_1 = m_1 g$ - вес разновески в пустоте, m_1 - масса разновески при первом взвешивании, V_2 - их объём, $\rho_x g V$ - вес твердого тела в вакууме, $\rho_2 g V$ - вес воздуха, вытесненного телом, $\rho_2 V_2 g$ - вес воздуха, вытесненного разновесками. Если плотность разновесок ρ_3 , то

$$V_2 = \frac{m_1}{\rho_3}.$$

Подставив выражение для V_2 в равенство (3), получим:

$$\rho_x g V - \rho_2 g V = m_1 g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right). \quad (4)$$

Условие равновесия весов при взвешивании тела с проволокой в воздухе и тела с проволокой в воде выразится равенствами:

$$\rho_x g V - \rho_2 g V + \rho' = m_2 g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right), \quad (5)$$

$$\rho_x g V - \rho_1 g V + \rho' = m_3 g \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right), \quad (6)$$

где ρ' - вес проволоочки - подвеса (выталкивающей силой, действующей на неё, пренебрегаем ввиду ее малости),

m_2 - масса разновесок по паспорту при втором взвешивании и

m_3 - масса разновесок по паспорту при третьем взвешивании.

Вычтем (6) из (5) и результат разделим на (4), получим исправленное значение искомой плотности:

$$\rho_x = \frac{m_1}{m_2 - m_3} (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2. \quad (7)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.

1. Взвесить исследуемое тело в воздухе по всем правилам взвешивания на аналитических весах (см. работу 4).
2. Подвесить исследуемое тело на тонкой проволоке к крючку левой чашки весов. Способом, указанным в пункте 1, определить массу тела с проволокой m_2 .
3. Поставить трензник над левой чашкой весов. На него поместить сосуд с дистиллированной водой. При арретированных весах погрузить исследуемое тело в воду, следя за тем, чтобы тело не касалось дна и стенок сосуда, через поверхность воды проходила только одна неперекрученная проволока (для уменьшения капиллярного действия) и на поверхности тела не оставалось воздушных пузырьков. Определить массу разновесок, уравновешивающих вес тела с проволокой в воде m_3 .

Результаты измерений занести в таблицу 2.

4. По формуле (7) рассчитать плотность исследуемого тела.

Плотность воздуха принять равной $0,0012 \text{ г/см}^3$.

Определив температуру окружающего воздуха, найти по таблице плотность воды ρ_1 .

5. Определить абсолютную $\Delta \rho_x$ и относительную $\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x}$ ошибки измерения плотности ρ_x .

ТАБЛИЦА 2.

№ № п/п	Тип измерения	Крайние поло- жения стрелки на шкале при колебаниях её.					Поло- жения равно- весия весов	Масса разно- весок:
		п ₁	п ₂	п ₃	п ₄	п ₅		
1.	Пенагруженные весы							
2.	Взвешивание тела в воз- духе.	С нед.						
3.		С пере- груз.						
4.	Взвешивание тела с прово- лочкой в воз- духе.	С нед.						
5.		С пере- груз.						
6.	Взвешивание тела с прово- лочкой в воде.	С нед.						
7.		С пере- груз.						
8.	Температура воды $t^{\circ}\text{C}$							
9.	плотность воды ρ_1							
10.	плотность воздуха ρ_2							
11.	$\rho_x \pm \Delta \rho_x$							
12.	$\epsilon = \frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} \cdot 100 \%$							

У п р а ж н е н и е 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ
ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ВЗВЕШИВАНИЕМ.

Принадлежности: аналитические весы; разновес; сосуд с дистиллированной водой; сосуд с исследуемой жидкостью; грузило; тонкая проволока.

Для измерения плотности исследуемой жидкости гидростатическим взвешиванием необходимо взять какое-либо твердое тело (грузило) и подвесить его на тонкой проволоке на крючок одной из чашек весов. Определить вес грузила с проволокой в воздухе

P_1 . Если погрузить его в дистиллированную воду, то вес грузила с проволокой в воде изменится и станет равным P_2 .

Это же грузило с проволокой, находящееся в исследуемой жидкости весит P_3 . Разность $(P_1 - P_2)$ есть вес воды в объеме грузила. Если ρ_1 - плотность воды, то $V = \frac{P_1 - P_2}{\rho_1 g}$ - объем грузила. Таков же будет объем исследуемой жидкости, вытесненной грузилом при погружении его в жидкость. Вес исследуемой жидкости, вытесненной грузилом, равен $(P_1 - P_3)$. Тогда плотность жидкости ρ'_x найдем, согласно (1) по формуле:

$$\rho'_x = \frac{P_1 - P_3}{P_1 - P_2} \cdot \rho_1. \quad (8)$$

Формула (8) определяет ρ'_x без учета потери веса при взвешивании в воздухе. Для учета этих потерь при вычислении плотности жидкости воспользуемся условием равновесия равноплечих весов и законом Архимеда. Три указанных выше взвешивания дадут равенства:

$$V\rho g - V\rho_2 g + p' = P_1 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right), \quad (9)$$

где $V\rho g$ - вес грузила в вакууме, $V\rho_2 g$ - вес воздуха в объеме грузила, $P_1 = m_1 g$, m_1 - масса разновесок при первом взвешивании

P' - вес проволоочки - подвеса в воздухе

$$V\rho g - V\rho_1 g + p' = P_2 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right), \quad (10)$$

где $V\rho_1g$ - вес воды в объеме грузила, $P_2 = m_2g$,
 m_2 - масса разновесок при втором взвешивании

$$V\rho g - V\rho_x g + p' = P_3 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right), \quad (11)$$

где $V\rho_x g$ - вес исследуемой жидкости в объеме грузила.
 $P_3 = m_3g$, m_3 - масса разновесок при третьем взвешивании.

Выталкивающей силой, действующей на проволоку пренебрегаем ввиду ее малости. Вычитая (10) и (11) из (9) и разделив результаты друг на друга, получим:

$$\rho_x = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2, \quad (12)$$

где ρ_x - исправленная плотность исследуемой жидкости,
 ρ_2 - плотность воздуха, ρ_1 - плотность воды
(определять по таблице).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.

1. Определить массу разновесок m_1 , уравнивающих вес грузила с проволокой в воздухе, соблюдая все правила взвешивания на аналитических весах (см. работу 4).

2. поставить над чашкой весов на треножнике стакан с дистиллированной водой и опустить грузило в воду, следя за тем, чтобы оно не касалось дна и стенок сосуда, к поверхности грузила не прилипали пузырьки воздуха и через поверхность воды проходила лишь одна неперекрученная проволока.

Определить массу разновесок m_2 , уравнивающих вес грузила в воде P_2 .

3. Удалить сосуд с водой, осушить грузило фильтровальной бумагой. Поставить на треножник сосуд с исследуемой жидкостью, повесить в нее грузило, соблюдая указания выше предосторожности. Определить массу разновесок M_3 , уравновешивающих вес грузила в исследуемой жидкости ρ_3 .

4. Определить температуру воды. Найти ее плотность по таблице. Вычислить плотность исследуемой жидкости по формуле (12). Результаты измерений занести в таблицу 3.

5. Вычислить абсолютную $\Delta \rho_x$ и относительную $\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x}$ ошибки измерения плотности ρ_x .

ТАБЛИЦА 3.

№ № п/п	Вид измерения.		Крайние поло- жения стрелки на шкале при колебаниях ее					Поло- жения равно- весия весов	Масса равно- весок
			n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n	
1.	Ненагруженные весы								
2.	Взвешивание грузила с проволокой в воздухе	С нед.							
3.		С пере- груз.							
4.	Взвешивание грузила с проволокой в воде	С нед.							
5.		С пере- груз.							
6.	Взвешивание грузила с проволокой в исследуемой жидкости.	С нед.							
7.		С пере- груз.							
8.	Температура воды $t^{\circ}\text{C}$								
9.	Плотность воды ρ_1								
10.	Плотность воздуха ρ_2								
11.	$\rho_x \pm \Delta \rho_x$								
12.	$\epsilon = \frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} \cdot 100\%$								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что называют плотностью вещества? Единицы плотности в СГС и СИ системах.
2. Можно ли при определении плотности твердых тел гидростатическим взвешиванием пользоваться не водой, а другими жидкостями?
3. Какие преимущества и недостатки определения плотности гидростатическим взвешиванием по сравнению с другими методами определения плотности?
4. Перечислите правила и порядок взвешивания на аналитических весах.

Л И Т Е Р А Т У Р А.

1. Под редакцией проф. В.И.Ивероновой.
"Физический практикум". 1962.

РАБОТА № 7.

КАТЕТОМЕТР. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ
МЕТОДОМ СООБЩАЮЩИХСЯ СОСУДОВ.

Принадлежности: катетометр КМ-6, U - образная трубка, содержащая известную и исследуемую жидкости, эталон, термометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ И ОПИСАНИЕ ПРИВОРА.

Плотность жидкостей можно определить методом сообщающихся сосудов, который заключается в следующем. В закрепленную вертикально U - образную трубку нальём жидкость, плотность которой известна, а затем в оба колена трубки нальём жидкость, несмешиваемую с первой, плотность которой ρ_x надо определить. Равновесие жидкостей в сообщающихся сосудах трубки наступит при условии, когда давление на любом горизонтальном уровне внутри жидкости в обоих коленах трубки одинаково. Давление P вертикального столба жидкости определим по формуле:

$$p = \rho g h, \quad (1)$$

где ρ - плотность жидкости;
 g - ускорение свободного падения;
 h - высота столба.

Запишем условие равновесия жидкостей в трубке для горизонтального уровня AA (см. рис. 1), проходящего через вершину самого нижнего мениска жидкости.

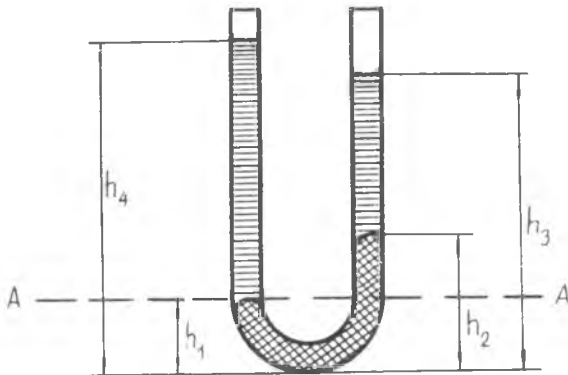


Рис. 1.

$$\rho_x g (h_4 - h_1) = \rho g (h_2 - h_1) + \rho_x g (h_3 - h_2). \quad (2)$$

Отсюда

$$\rho_x = \rho \frac{h_2 - h_1}{h_4 - h_1 - h_3 + h_2}. \quad (3)$$

Точность результата измерения плотности исследуемой жидкости ρ_x определяется точностью значения плотности известной жидкости ρ и точностью определения положения висот уровней

h_1, h_2, h_3, h_4 относительно шкалы.

В данной работе измерение высот уровней менисков жидкостей h_1 , h_2 , h_3 , h_4 проводится с помощью катетометра КМ-6. Катетометр служит для дистанционного измерения расстояния между двумя точками, лежащими на одной или разных вертикалях.

Катетометр КМ-6 состоит (см. рис. 2) из вертикальной колонки 1, установленной на треножке 2, измерительной каретки 3, зрительной трубы 4 и отсчётного микроскопа 5. В колонку вмонтирована стеклянная миллиметровая шкала, ось которой строго параллельна оси колонки. Изображение штрихов миллиметровой шкалы проектируется в плоскость масштабной сетки, установленной в фокальной плоскости окуляра отсчётного микроскопа. Масштабная сетка разделена в вертикальном и горизонтальном направлениях на десять частей (см. рис. 5) и представляет собой поперечный масштаб, служащий для отсчёта долей миллиметра. Светлые линии сетки получили в оптической технике название биссекторов.

Отсчётный микроскоп установлен таким образом, что десять горизонтальных биссекторов сетки укладываются между двумя штрихами миллиметровой шкалы, следовательно, каждому биссектору в вертикальном направлении соответствует одна десятая миллиметра. В горизонтальном направлении десятая часть биссектора равна одной сотой миллиметра. Тысячные доли миллиметра (микроны) оцениваются на глаз в долях деления.

Измерение расстояний между двумя точками производится с помощью зрительной трубы и отсчётного микроскопа сравнением измеряемой длины со шкалой. Зрительная труба и отсчётный микроскоп смонтированы в одной каретке 3. Перемещая каретку по колонке вдоль миллиметровой шкалы, установив предварительно строго вертикально ось колонки и горизонтально ось зрительной трубы с помощью установочных винтов 6 по цилиндрическому и круглому уровням, а также вращая колонку вокруг вертикальной оси, осуществляют наводку зрительной трубы на выбранные точки объекта. Соответствующие отсчеты снимают через окуляр отсчётного микроскопа по миллиметровой линейке и масштабной сетке, видимых в поле зрения окуляра микроскопа. Длины вертикальных отрезков определяют как разность соответствующих отсчетов по шкале.

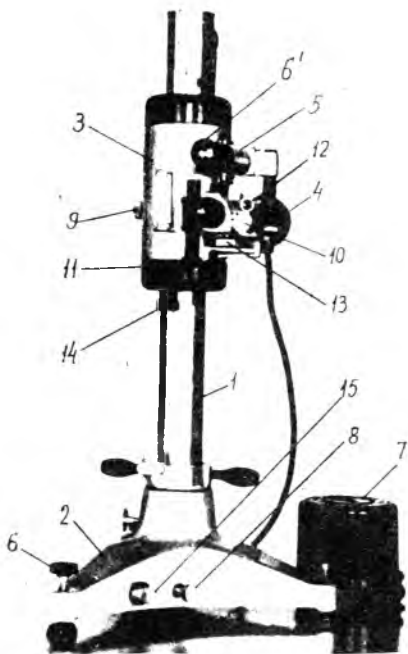


Рис. 2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Проверить по отвесу вертикальность положения U-образной трубки.

2. Подъемными винтами 6 треножника 2 КМ-6 с помощью круглого уровня установить ось колонки 1 вертикально.

3. Включить в сеть через трансформатор 7 осветитель отсчетного микроскопа.

4. Ослабив винты 8 и 9, поднять измерительную каретку 3 приблизительно на нижний уровень исследуемой жидкости (см. рис. 1) и с помощью целика и мушки зрительной трубы осуществить грубую наводку ее на вершину выбранного мениска. Закрепить винты.



Рис. 3.

5. Установить цилиндрический уровень 10 на тубусе зрительной трубы микрометрическим винтом 11 так, чтобы изображения концов пузырька, рассматриваемого через лупу 12, совпадали (см. рис.3).

При этом ось зрительной трубы имеет строго горизонтальное положение

6. Вращая маховичок 13, добиться резкости изображения стеклянной трубки и вершины выбранного мениска жидкости в поле зрения окуляра зрительной трубы. Окуляр зрительной трубы установить на резкое изображение сетки. Сетка зрительной трубы имеет перекрестие, правый горизонтальный штрих которого выполнен в виде углового биссектора (рис.4)

зрительной трубы имеет перекрестие, правый горизонтальный штрих которого выполнен в виде углового биссектора (рис.4)

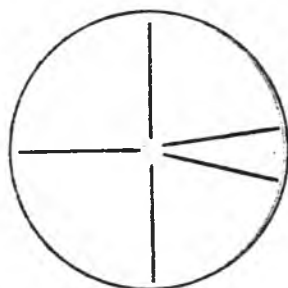


Рис. 4.

7. Произвести точную наводку зрительной трубы на вершину мениска в вертикальной плоскости с помощью винта 14, в горизонтальной плоскости с помощью винта 15. Вершина мениска должна располагаться в правой половине сетки точно посередине углового биссектора на уровне горизонтального штриха.

8. Добиться резкого изображения масштабной сетки и миллиметровой шкалы в поле зрения окуляра отсчетного микроскопа 5. (см. рис.5).

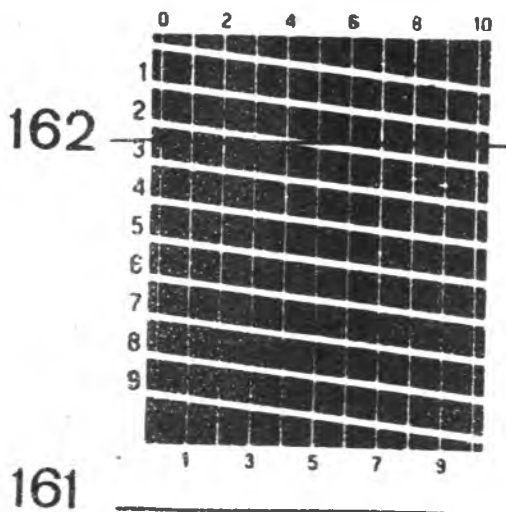


Рис. 5.

Снять отсчет по масштабной сетке. В поле зрения микроскопа одновременно видны изображения двух штрихов миллиметровой шкалы, обозначенные крупными числами слева, и масштабная сетка. Мелкие цифры, расположенные вертикально в левой части сетки, означают десятые доли миллиметра, а цифры, расположенные горизонтально сверху и снизу сетки - сотые доли миллиметра. Целое число миллиметров отсчета есть порядковый номер наибольшего миллиметрового штриха (крупное число слева), который прошел нулевой биссектор (на рис.5-162 мм).

Число десятых — номер последнего пройденного миллиметровым штрихом биссектора (малая цифра слева над мм.-штрихом на рис. 6—0,2 мм). Число сотых и тысячных оценивается по положению той точки верхнего миллиметрового штриха, которая лежит точно посередине наклонной светлой полосы сетки по горизонтальной шкале. Например, на рис. 5 отсчет сотых и тысячных дает 0,044 мм. На рис. 5 полный отсчет соответствует $h_1=162,244$ мм.

9. Для повышения точности измерения отсчет необходимо повторить не менее трех раз, сбивая несколько наводку зрительной трубы и вновь восстанавливая ее. Результаты измерения записать в таблицу 1.

10. Повторить действия, указанные в пунктах 7—9, измерив положение уровней h_2 , h_3 , h_4 . Каждый замер производить не менее трех раз.

11. Определить плотность известной жидкости при температуре опыта по таблице. Температуру опыта $t^{\circ}\text{C}$ определить по комнатному термометру.

12. Вычислить среднее значение плотности исследуемой жидкости по формуле:

$$\rho_x = \rho \frac{h_{2cp} - h_{1cp}}{h_{4cp} - h_{1cp} - h_{3cp} + h_{2cp}}$$

13. Вычислить ошибки измерения плотности.

ТАБЛИЦА 2.

№ изм. п/п	h_1	h_2	h_3	h_4	ρ	$t^{\circ}\text{C}$	ρ_x
1.							
2.							
3.							
Средние значения							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что называется плотностью и угельным весом вещества ?
2. Размерность плотности в СГС и СИ системах.
3. Изменится ли расчетная формула, если одна из трубок будет наклонена или заменена более широкой ?
4. Как установить колонку КМ-6 в вертикальное положение, а зрительную трубу в горизонтальное ? Как контролируется эта установка ?
5. Как отсчитывается положение вершины мениска по шкале микроскопа ?
6. С какой точностью можно отсчитывать расстояние между точками в вертикальном направлении при помощи нивелиметра ?

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.И. Соколов. "Физический практикум". 1936.
2. И.Ф. Савельев. "Курс общей физики". том.1.1966.

РАБОТА № 8.

СТРОБОТАХОМЕТР. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ
С ПОМОЩЬЮ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ.

Принадлежности: установка для определения скорости пули; строботахометр; линейка до 50 см; пульки (5 штук).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Важнейшими характеристиками движения точки и поступательного движения твердого тела являются скорость движения и ускорение.

Если движение равномерное, то численное значение скорости находится как отношение пройденного пути ко времени.

Если движение неравномерное, т.е. величина скорости меняется, то, поделив пройденный путь на время, мы найдем среднюю скорость движения на данном пути:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

Знание средней скорости недостаточно для характеристики неравномерного движения. Нас часто интересует вопрос о том, какую скорость имеет тело в тот или иной момент времени (мгновенная скорость). Мгновенная скорость равна пределу отношения $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}$$

Как видно из приведенных формул, размерность скорости есть

$$[v] = M^0 L^1 T^{-1}$$

В данной работе предлагается измерить скорость пули сразу после вылета её из ствола. Эту скорость мы найдём, если измерим достаточно малый отрезок пути, проходимый пулей, и затраченное на этот путь время. Малые промежутки времени можно измерять, например, с помощью вращающихся дисков из легко пробиваемой бумаги.

На общей оси на некотором расстоянии l друг от друга насажены два диска, которые приводятся в движение мотором и пробиваются пулей, летящей вдоль оси вращения дисков (рис.1). По смещению пробоин и по скорости вращения дисков легко определить время полета пули между ними.

Если система делает n оборотов в минуту и за время полета пули успела повернуться на какую-то часть оборота n' , то отношение $\frac{60n'}{n}$ дает нам искомое время в секундах:

$$\Delta t = \frac{60n'}{n} \quad (3)$$

Среднюю скорость полета пули между дисками определим, как

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = l \frac{n}{60n'} = l \frac{6n}{60 - 6n'} \quad (4)$$

г.г. $n' = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{360^\circ}$, где $(\varphi_2 - \varphi_1)$ - угловое смещение пробойки в градусах. Диск расположен близко к стволу ружья, поэтому найденную скорость можно принять за скорость вылета пули.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ.

Установка для определения скорости полета пули представлена на рис. 1.

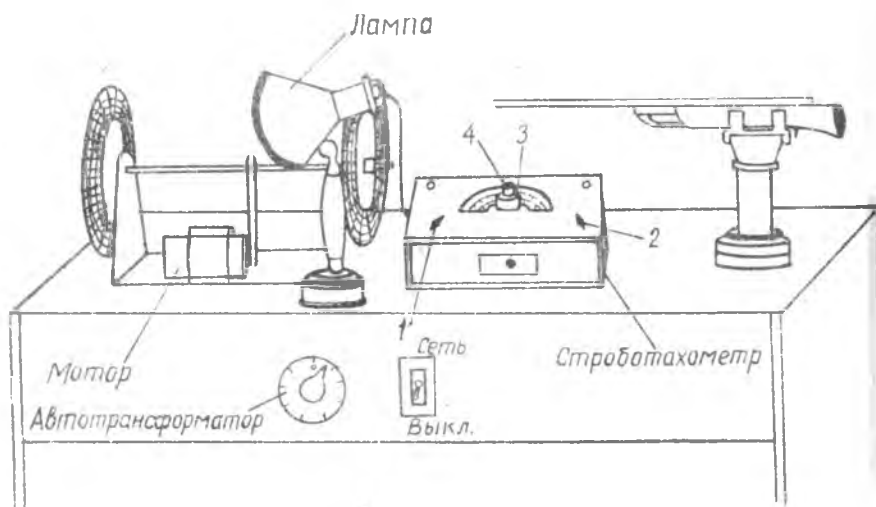


Рис. 1.

Для определения скорости вращения дисков в данной работе используется стробоскопический эффект, который наблюдается при освещении поверхности вращающегося диска мигающей лампой. Когда частота ν_d оборотов диска и частота ν_l вспышек импульсной лампы строботаксметра оказываются кратными, диск при визуальном наблюдении кажется неподвижным. Для удобства наблюдения на диске сделана метка - яркая линия, проведенная вдоль радиуса. Если $\frac{\nu_d}{\nu_l} = N$, где N - целое число, то на диске, кажущемся неподвижным, видна одна линия (метка). Максимальная частота вспышек лампы, при которой наблюдается этот эффект, очевидно, равна частоте оборотов диска (за время между двумя вспышками линия возвращается в прежнее положение).

Если $\frac{\nu_l}{\nu_d} = N$, где N - целое число, т.е. частота вспышек лампы больше частоты оборотов диска и кратна ей, то на диске, кажущемся неподвижным, при визуальном наблюдении видим вместо одной N линий. В этом случае $\nu_d = \frac{\nu_l}{N}$.

Если частота вспышек лампы больше или меньше частоты оборотов диска, но не кратна ей, то диск кажется вращающимся, причем кажущаяся скорость вращения метки определяется отношением $\frac{\nu_l}{\nu_d}$.

Частоту вспышек лампы можно менять с помощью регулятора 3 (грубо) и регулятора 4 (плавно) настройки строботаксметра, причем величину ее можно читать непосредственно по одной из шкал прибора в зависимости от измеряемого диапазона. Диапазон частот устанавливается переключателем 2 на передней стенке прибора: I диапазон - 300 - 1200 об/мин; II диапазон - 1200 - 5000 об/мин; III диапазон - 6000 - 30000 об/мин.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Ознакомиться с установкой. Проверить правильность крепления дисков.
2. Включить тумблер "сеть" на стенке стола.
3. Перевести переключатель 1 из положения "выкл." в положение "сеть". Прогреть прибор в течение 3-4 минут.
4. Вращая регулятор автотрансформатора, задать произвольную скорость вращения мотора.

5. Поставить переключатель 1 в положение "лампа".
6. С помощью регуляторов 3 и 4 найти такую частоту вспышек лампы, при которой на диске видна одна неподвижная метка. Убедиться, что наблюдаемая картина соответствует условию $\nu_d = \nu_g$ (если ν_d немного больше ν_g , то метка кажется вращающейся в обратную сторону).
7. Записать показание строботахометра и выключить лампу, поставив переключатель 1 в положение "выкл."
8. Зарядить винтовку и выстрелить вдоль оси вращающихся дисков. При этом нужно соблюдать осторожность, т.к. скорость полета пули довольно велика.
9. Остановить вращающиеся диски (выключить мотор). Найти пробойны на дисках, определить их угловое смещение и отметить карандашом.
10. Повторить в указанной последовательности опыт 5 раз при различных скоростях вращения в пределах 1200-2000 об/мин. Результаты измерений записать в таблицу 1.
11. Выключить установку.
12. Измерить линейкой расстояние между дисками.
13. Вычислить скорость пули по формуле (4), абсолютную и относительную ошибки измерения её.

ТАБЛИЦА 1.

Определение скорости полета пули

№ № измере- ния пп	Положе- ние про- боин на 1 диске	Положе- ние про- боин на 2 диске	Смеще- ние про- боин	Рассто- яние между дисками	Скорость вращения мотора n $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	Скорость полета пу- ли v $\frac{\text{м}}{\text{сек.}}$
	φ_1	φ_2	$\varphi_2 - \varphi_1$	l м		

14. Окончательный результат измерения:

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается стробоскопический эффект ?
2. Получить расчетную формулу для определения скорости полета пули.

Л И Т Е Р А Т У Р А.

1. А.В. Кортнев, К.В. Рублев, А.Н. Куценко. "Практикум по физике". 1968.
2. С.Э. Фриш и А.В. Тиморева. "Курс общей физики". том 1. Издатгиз. 1962.

РАБОТА № 9

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Принадлежности: массивная металлическая линейка с отверстиями (маятник); секундомер; масштабная линейка или штангенциркуль; приспособление для подвешивания маятника.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

§ 1. Понятие о физическом маятнике.

Физическим маятником называется твердое тело, имеющее ось вращения, не проходящую через его центр тяжести (рис.6). В предлагаемой работе физический маятник представляет собой массивную металлическую линейку с отверстиями. Отверстия предназначены для подвешивания маятника на стальную призму, ребро которой служит осью вращения.

Колебание физического маятника есть вращательное движение. Частицы маятника, совершающего колебания, движутся по дугам окружностей, центры которых лежат на оси вращения. Для понимания предлагаемой работы нужно знать некоторые закономерности движения точки по окружности, а так же вращательного и колебательного движения твердого тела.

§ 2. Движение частицы по окружности.
Понятие о вращательном движении.

Линейная скорость v частицы (материальной точки), равномер-

но движущейся по окружности равна $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, а угловая ее скорость ω равна $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$, где $\Delta \varphi$ - угол поворота радиуса, соединяющего эту частицу с центром окружности.

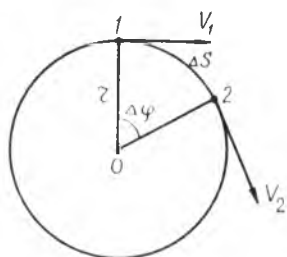


Рис. I

При неравномерном движении частицы по окружности (рис. I) отношение $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ есть ее средняя линейная скорость, а отношение $\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ - средняя угловая скорость частицы за время Δt . Пределы, к которым стремится отношение $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ и $\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ при $\Delta t \rightarrow 0$ есть соответственно линейная v и угловая ω скорости частицы в данный момент времени.

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{или} \quad v = \frac{ds}{dt}; \quad \omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Среднее тангенциальное (линейное, касательное) ускорение a_{cp} частицы, движущейся неравномерно по окружности, и ее среднее угловое ускорение ε_{cp} за время Δt равны:

$$a_{cp} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t}; \quad \varepsilon_{cp} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}.$$

Тангенциальное ускорение a и угловое ускорение ε в данный момент времени определяются формулами:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}; \quad \varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t}, \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

При равнопеременном движении частицы по окружности ее тангенциальное ускорение a и угловое ускорение ε - величины постоянные.

Примечание. Линейная скорость, тангенциальное ускорение, угловая скорость и угловое ускорение величины векторные, мы же рассматриваем только их модули.

Разделив обе части равенства $\Delta S = r \Delta \varphi$ (рис.1) на Δt и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем, что $v = r\omega$. Из формулы $v = r\omega$ следует, что $\Delta v = r \Delta \omega$. Разделив обе части равенства $\Delta v = r \Delta \omega$ на Δt и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем, что $a = \varepsilon r$.

Используя соотношения $\Delta S = r \Delta \varphi$ (или $s = r \varphi$), $v = r\omega$ и $a = \varepsilon r$, можно некоторые формулы, устанавливающие соотношения между путем S , линейной скоростью v , тангенциальным ускорением a и временем t преобразовать в формулы, дающие связь между углом φ поворота радиуса, соединяющего частицу с центром окружности, угловой скоростью частицы ω , угловым ускорением ε и временем t .

Например:

1. Уравнение равномерного движения: $S = vt$, $\varphi = \omega t$.
2. Ускорение при равнопеременном движении: $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$, $\varepsilon = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t}$.
3. Скорость при равноускоренном движении:

$$v = v_0 + at, \quad \omega = \omega_0 + \varepsilon t.$$

4. Средняя скорость при равнопеременном движении:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2}, \quad \omega_{\text{ср}} = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2}.$$

5. Путь при равнопеременном движении:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad \varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

Если частицы тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной оси, то движение этого тела называется **вращательным**, все частицы тела имеют одинаковые угловые скорости и ускорения.

Движение тела называется **поступательным**, если прямая, проведенная через две любые точки этого тела, перемещается параллельно своему первоначальному положению. Все частицы твердого тела, движущегося поступательно, имеют одинаковые линейные скорости и ускорения.

При поступательном движении ускорение, с которым движется тело, определяется массой этого тела и действующей на него силой. При вращательном движении угловое ускорение тела определяется его моментом инерции и моментом вращающей силы.

Понятие о моменте инерции тела можно получить из опыта, схема которого изображена на рис.2. На оси АВ укреплено легкое колесо К, радиус которого R .

К нити, намотанной на колесо подвешен груз P , который создает вращающий момент $M = FR$. На конце А оси АВ укреплен лег-

кий (невесомый) стержень, несущий на себе два тяжелых шарика массой m каждый. Эти шарики можно принять за материальные частицы, удаленные от оси вращения на расстояние τ . Если отпустить груз P , то вся система начнет вращаться с некоторым

угловым ускорением ε . Измерив время падения груза P и число оборотов всей системы за это время, можно найти угловое ускорение ε .

Если масса шариков m значительно больше массы всей остальной системы, то в результате опыта получается, что $\varepsilon = \frac{M}{2m\tau^2}$. Произведе-

ние массы m частицы на квадрат расстояния τ этой частицы от оси вращения называется ее моментом

Рис. 2

инерции J относительно данной оси

$$J = m\tau^2.$$

Если опыт происходил бы с одним шариком на стержне, то угловое ускорение ε равнялось бы:

$$\varepsilon = \frac{M}{J}, \quad \text{отсюда } M = J\varepsilon$$

Равенство $M = J\varepsilon$ есть уравнение основного закона динамики вращательного движения, который аналогичен второму закону динамики $F = m\alpha$ для поступательного движения.

Моментом инерции J твердого тела относительно какой-либо оси, называется сумма моментов инерции частиц, из которых состоит тело, относительно той же оси:

$$J = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \tau_i^2 = \sum_{(v)} \tau_i^2 \rho \Delta V_i \quad \text{или} \quad J = \int_V \tau^2 \rho dV.$$

Здесь z_i - расстояние i -ой частицы от оси вращения;
 ρ - плотность вещества;
 V - объем тела.

Момент инерции J является мерой инерции тела при вращательном движении. Величина момента инерции зависит от массы данного тела и от распределения его массы относительно оси вращения.

Момент инерции некоторых однородных тел правильной геометрической формы можно найти теоретически, вычислив интеграл по объему $\int z^2 \rho dV$. Результаты этих вычислений даются в справочниках. Например, момент инерции однородного цилиндра относительно его оси равен $J = \frac{1}{2} m r^2$, здесь m - масса цилиндра; r - радиус его основания. Момент инерции однородного шара относительно оси, проходящей через его центр, равен $J = 0,4 m r^2$.

Момент инерции неоднородных тел и тел произвольной (неправильной) формы определяется опытным путем. Например, при помощи установки, схема которой изображена на рис. 2.

В простейших случаях момент инерции можно находить простым суммированием. Найдем, например, момент инерции тонкого однородного кольца относительно его оси симметрии OO (рис.3).

Разобьем кольцо на элементы Δm_i , удаленные от оси на одно и то же расстояние $z_i = r$. По определению момент инерции J равен:

$$J = \sum_{i=1}^n \Delta m_i z_i^2 = r^2 \sum_{i=1}^n \Delta m_i = m r^2.$$

Следовательно, момент инерции кольца относительно оси OO равен $J = m r^2$, где m - масса кольца.

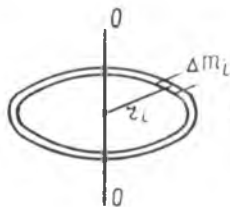


Рис. 3

Кинетическая энергия E_{K_i} каждой частицы (рис.4), вращающегося тела равна $E_{K_i} = \frac{\Delta m_i v_i^2}{2}$. Кинетическая энергия тела E_K равна сумме кинетических энергий его частиц

$$E_K = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_i v_i^2}{2}$$

, но $v_i = \omega r_i$



Рис. 4

Следовательно

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_i r_i^2 \omega^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2.$$

По определению

$$\sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = J.$$

и кинетическая энергия вращающегося тела равна:

$$E_k = \frac{J \omega^2}{2}.$$

Сравнивая между собой формулы $F = ma$ и $M = J\varepsilon$, а также формулы $E_k = \frac{mv^2}{2}$ и $E_k = \frac{J\omega^2}{2}$, мы замечаем,

что момент инерции и момент силы при вращательном движении играют такую же роль, как масса и сила при поступательном движении.

Эта аналогия имеет место и в других формулах. Например, работа при поступательном движении вычисляется по формуле $\Delta A = F \Delta S$, а при вращательном ее можно найти по формуле $\Delta A = M \Delta \varphi$, где $\Delta \varphi$ - угол, на который повернулось тело под действием вращающего момента M . Потенциальная энергия сжатой пружины вычисляется по формуле $E_n = \frac{K \Delta x^2}{2}$, а потенциальная энергия закрученной пружины - по формуле $E_n = \frac{K \Delta \varphi^2}{2}$, где $\Delta \varphi$ - угол закручивания пружины, а K - коэффициент жесткости при кручении.

Поступательное движение тела, масса которого m и скорость v , характеризуется количеством движения (импульсом) p , которое равно:

$$p = mv.$$

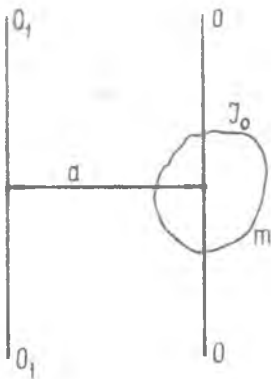
Вращательное движение тела количественно характеризуется моментом количества движения $L = J\omega$,

здесь J - момент инерции тела, а ω - угловая скорость.

При вращательном движении справедлив закон сохранения момента количества движения, согласно которому векторная сумма моментов количества движения тел, образующих замкнутую (изолированную) систему есть величина постоянная

$$\sum_{k=1}^n J_k \vec{\omega}_k = const.$$

Моменты инерции одного и того же тела относительно различных осей различны. По теореме Штейнера



$$J = J_0 + ma^2$$

можно, зная момент инерции J_0 тела относительно оси OO' , проходящей через его центр тяжести (рис.5), найти момент инерции J этого тела относительно оси O_1O_1 , которая параллельна оси OO' и удалена от нее на расстояние, равное a .

Например, момент инерции J_0 однородного стержня, масса которого m , и длина l относительно оси, проходящей через его середину (рис.6), равен:

$$J_0 = \frac{1}{12} ml^2.$$

Момент инерции J того же стержня относительно оси O_1O_1 , проходящей через конец стержня параллельно оси OO' (на расстоянии $\frac{l}{2}$ от нее), согласно теореме Штейнера, равен:

$$J = J_0 + m \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{12} ml^2 + \frac{1}{4} ml^2,$$

отсюда, $J = \frac{1}{3} ml^2$.

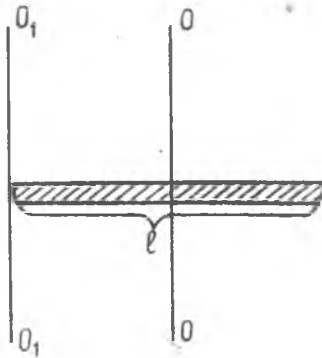
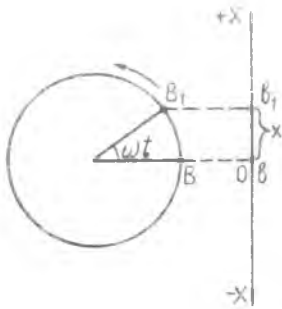


Рис. 6

§ 3. Понятия о гармонических колебаниях.

Колебательное движение частицы характеризуется двумя основными признаками: движение точно или приблизительно повторяющееся через некоторые промежутки времени; при колебании частица проходит через положение равновесия в противоположных направлениях.

Простейшими колебаниями являются гармонические колебания, при которых смещение частицы от положения равновесия изменяется по закону синуса. При равномерном движении точки B с угловой скоростью ω по окружности радиуса A (рис. I), ее проекция на ось XX совершает гармонические колебания по закону:



$$x = A \cdot \sin \omega t$$

или

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$$

Здесь x - смещение колеблющейся точки от положения равновесия;

A - амплитуда колебаний;

T - период колебаний (рав-

ный периоду обращения точки B по окружности);

ω - круговая или циклическая частота колеблющейся точки, которая равна:

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

f - число колебаний в сек; $\omega t = 2\pi \frac{t}{T} = \varphi$ - фаза колебаний. Фаза определяет положение колеблющейся точки в данный момент времени.

В более общем случае (рис. 2) смещение колеблющейся точки

от положения равновесия равно $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.
 Здесь фаза состоит из переменной части ωt и постоянной части φ_0 , которая называется начальной фазой или фазой в начале колебаний.

В частном случае, если $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ уравнение смещения принимает вид:

$$x = A \cos \omega t.$$

Скорость v точки при гармоническом колебании равна:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\frac{d}{dt} A \sin \omega t = \omega A \cos \omega t.$$

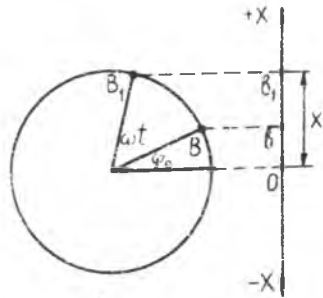


Рис. 2

На рис. 3 изображен график смещения, а на рис. 4 -
 - графики скорости при гармоническом колебании.

Ускорение a при гармоническом колебании точки равно:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin \omega t$$

или $a = -\omega^2 x$

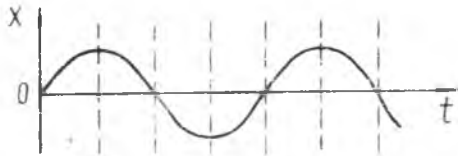


Рис. 3

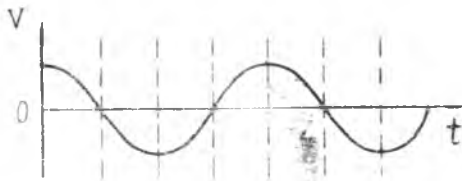


Рис. 4

Знак минус говорит о том, что вектор ускорения направлен против вектора смещения.

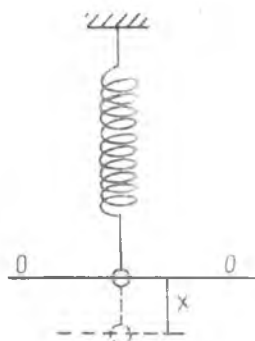


Рис. 5

На рис. 5 изображена схема одного из видов пружинного маятника, состоящего из груза массы m и пружины.

Рассмотрим колебания идеально (воображаемого) пружинного маятника, у которого пружина абсолютно упруга и не имеет массы, т.е. вся масса маятника сосредоточена в его грузе. Груз невелик и его можно рассматривать как материальную точку. Трение и сопротивление среды отсутствует. Груз совершает колебания только под действием инерции и упругой силы F , возвращающей маятник к положению равновесия.

Согласно закону Гука упругая сила F равна:

$$F = -kx.$$

Здесь x — деформация пружины, являющаяся смещению груза от положения равновесия, которое на рис. 5 изображено прямой 00 ; k — коэффициент жесткости пружины. Знак минус в формуле закона Гука говорит о том, что вектор возвращающей силы F направлен против вектора смещения x .

Заменяя в формуле $F = -kx$ возвращающую силу F по второму закону Ньютона $F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2}$ и проведя некоторые преобразования, приходим к равенству:

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

полагая, что

$$\frac{k}{m} = \omega^2,$$

получаем уравнение $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0$, которое справедливо при $x = A \sin \omega t$. В этом легко убедиться простой подстановкой. Следовательно, уравнение

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

есть дифференциальное уравнение гармонического колебания материальной точки (частицы), происходящего под действием упругой силы. Знач, что круговая частота ω равна $\omega = \frac{2\pi}{T}$, находим период колебаний T пружинного маятника

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

Итак, мы получили, что колебания происходящие под действием силы, изменяющейся по закону:

$$F = -kx.$$

являются гармоническими. Это второе определение гармонических колебаний (динамическое). Первое (кинетическое) дано в начале параграфа.

Гармонические колебания могут происходить под действием не упругих сил, изменяющихся по закону $F = -kx$. Такие силы называются квазиупругими (как бы упругими).

Примером квазиупругой силы может служить составляющая сила тяжести (рис.6), возвращающая физический маятник к положению равновесия при его колебаниях с малыми амплитудами.

При гармонических колебаниях энергия частицы из потенциальной переходит в кинетическую, затем из кинетической опять в потенциальную. Общее количество энергии колебаний остается при этом постоянным. Энергию E колебаний проще всего найти, определив максимальную кинетическую энергию частицы $E_{km} = \frac{mv_m^2}{2}$. Здесь v_m - максимальная скорость частицы, для нахождения которой нужно в формуле скорости $v = \omega A \cos \omega t$ положить $\cos \omega t = 1$. Получаем

$$v_m = \omega A,$$

потом находим энергию E колебаний частицы

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2.$$

§ 4. Вывод формулы для определения ускорения силы тяжести с помощью физического маятника

При малых амплитудах колебания физического маятника можно рассматривать как гармонические, т.е. считать, что угол φ отклонения маятника от положения равновесия (рис.6) изменяется

с течением времени по закону синуса.

$$\varphi = \varphi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t = \varphi_0 \sin \omega t.$$

Малыми называются такие амплитуды, при которых с допустимой погрешностью можно положить, что угол φ отклонения маятника от положения равновесия равен:

$$\varphi \approx \sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi.$$

При отклонении маятника от положения равновесия на малый угол φ (рис. 6) возникает квазиупругая сила F , возвращающая маятник к положению равновесия. Сила F равна $F = P \sin \varphi = mg \sin \varphi$, но $\sin \varphi \approx \varphi$, следовательно:

$$F = -mg\varphi.$$

Здесь m - масса маятника. Знак минус поставлен потому, что сила F и смещение маятника от положения равновесия φ направлены в противоположные стороны.

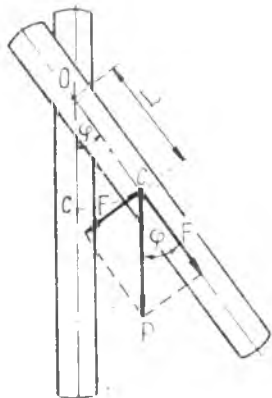


Рис. 6

Сила F , возвращающая маятник к положению равновесия, создает вращающий момент M равный

$$M = FL = mg\varphi L.$$

Здесь L - расстояние от оси вращения до центра тяжести маятника. Заменяя момент M по основному закону динамики вращательного движения

$$M = J\varepsilon = J \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

(здесь J - момент инерции, а ε - угловое ускорение маятника), имеем

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -mg\varphi L.$$

Отсюда:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgL}{J} \varphi = 0,$$

полагая, что $\frac{mgL}{J} = \omega^2$, получаем уравнение $\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0$, которое справедливо при $\varphi = \varphi_0 \sin \omega t$ или $\varphi = \varphi_0 \cos \omega t$, в чем легко убедиться простой подстановкой. Следовательно, уравнение

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0.$$

есть дифференциальное уравнение гармонических колебаний физического маятника.

Круговая частота колебаний физического маятника равна $\omega = \sqrt{\frac{mgL}{J}}$, но по определению $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Отсюда период T колебаний физического маятника при малых амплитудах равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL}}.$$

Длина математического маятника, период колебаний которого равен периоду колебаний данного физического маятника, называется приведенной длиной ℓ_n этого физического маятника. Выражение приведенной длины через характеристики физического маятника $\ell_n = \frac{J}{m\ell}$ легко получить, приравняв период колебаний физического и математического маятников.

Из формулы периода колебаний физического маятника находим ускорение силы тяжести:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{J}{mL}.$$

Здесь J момент инерции маятника относительно оси вращения.

Согласно теореме Штейнера J равняется:

$$J = J_0 + mL^2 = \frac{1}{12} m\ell^2 + mL^2.$$

Здесь ℓ длина всего стержня (маятника).

Подставляя это значение J в формулу ускорения силы тяжести, получим расчетную формулу для данной работы

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \left(\frac{\ell^2}{12L} + L \right).$$

Все величины, кроме g , входящие в правую часть этого равенства

ва, измеряются при выполнении работы.

Порядок выполнения работы

1. Измерить длину l всего стержня (маятника).
2. Повесить маятник на трехгранную призму, выбрав для этого произвольное отверстие на нем.
3. Измерить расстояние L от оси вращения до центра тяжести маятника.
4. Определить период колебаний T маятника при малых амплитудах (угол отклонения 2^0-3^0). Для этого при помощи секундомера измерить 50-100 колебаний и разделить это время на число колебаний.
5. Полученные данные записать в таблицу.
6. Вычислить ускорение силы тяжести g по расчетной формуле.
7. Измерения провести 3 раза при различных L .
8. Определить погрешности измерений, приняв за точное значение $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$.
9. Вычислить приведенную длину физического маятника.

Таблица

№ измерений:	l	L	t	T	g	Δg	$\frac{\Delta g}{g}$
1							
2							
3							
Среднее							

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.М. Яворский. «Курс физики», т. I, 1963.
2. С.Э. Фриш и А.В. Тиморева. «Курс физики», т. I, Физматгиз, 1962.

РАБОТА № 10

КРУТИЛЬНЫЙ МАЯТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ.

Принадлежности: крутильный маятник с шарами; секундомер; штангенциркуль или масштабная линейка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ *

ПОЯТЕНИЕ О КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ. ВЫВОД ФОРМУЛЫ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ.

На рис. I изображена схема крутильного маятника, состоящего из следующих частей: OO' – туго натянутая упругая стальная проволока; CB – нить; P – пружина, натягивающая проволоку OO' ; D – груз; CC – горизонтально расположенный металлический стержень; A – шары, надетые на стержень CC . При повороте стержня CC в горизонтальной плоскости на некоторый угол φ проволока OO' закручивается и возникает вращающий момент M пары сил, который возвращает стержень CC в положение равновесия. По инерции стержень проходит положение равновесия и отклоняется на некоторый угол в другую сторону, после чего под действием вращающегося момента опять возвращается к положению равновесия. Так происхо-

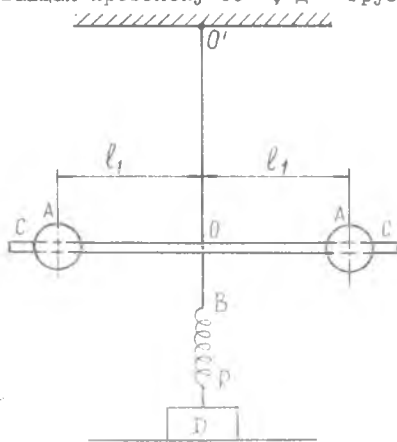


Рис. I

*. для того, чтобы понять содержание предлагаемой работы необходимо знать §§ 2, 3 работы № 9.

дут колебания крутильного маятника, которые при небольших углах отклонения φ можно считать гармоническими. Под небольшими углами отклонения понимаются такие углы (различные для различных проволок), при которых вращающий момент M , возникающий при закручивании проволоки, пропорционален углу φ поворота стержня OO_1 , т.е. при которых

$$M = -k\varphi.$$

Знак минус поставлен здесь потому, что сила упругости, возникающая при закручивании проволоки, направлена в сторону, противоположную возрастанию угла φ . Коэффициент пропорциональности k называется крутильной жесткостью проволоки OO_1 . Она численно равна моменту M пары сил, возникающему при закручивании проволоки на угол $\varphi = 1$ радиану.

Заменяя в формуле $M = -k\varphi$ момент M , по основному закону динамики вращательного движения $M = J\varepsilon = J \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ получаем дифференциальное уравнение колебаний крутильного маятника.

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{k}{J}\varphi = 0.$$

Сравнивая это уравнение с дифференциальным уравнением гармонического колебания физического маятника

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0.$$

устанавливаем, что круговая частота ω колебаний крутильного маятника равна $\omega = \sqrt{\frac{k}{J}}$.

Но $\omega = \frac{2\pi}{T}$, следовательно, период колебаний крутильного маятника равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}.$$

По формуле периода, зная T и J , можно найти k или, зная k и T , найти J .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение I. Измерение крутильной жесткости проволоки.

1) Укрепить шары А на концах стержня СС так, чтобы центры тяжести шаров были на одинаковом расстоянии от точки подвеса стержня О. Измерить расстояние l_1 .

Повернуть стержень СС в горизонтальной плоскости на $5-10^\circ$ и отпустить. Повторив это несколько раз, добиться того, что маятник будет совершать только крутильные колебания.

Измерить секундомером время t , в течении которого маятник совершит $n = 10-20$ (полных) колебаний. Найти период колебаний $T = \frac{t}{n}$. Измерения проделать три раза.

2) Сдвинуть шары на 10-12 сантиметров ближе к оси вращения и измерить расстояние l_2 центров шаров от точки подвеса. Определить период колебаний T_2 , измерив время t_2 , затраченное на $n_2 = 10-20$ колебаний.

Измерения проделать три раза. Результаты измерений занести в таблицу I.

Таблица I

№ измерения:	l_1	n_1	t	T_1	l_2	n_2	t_2	T_2
1								
2								
3								
Среднее значение:								

Численные значения массы стержня и шаров, а также радиусы шаров пишутся на установке или измеряются при выполнении работы.

Момент инерции J каждого из шаров относительно оси OO' определяется по теореме Штейнера (раб.9, §2).

$$J = J_0 + m\ell^2.$$

Здесь J_0 - момент инерции шара относительно оси, проходящей через его центр параллельно оси OO' ;

m - масса шара.

Моменты инерции всей системы в первом случае J_1 и во втором J_2 равны:

$$J_1 = J_c + 2(J_0 + m\ell_1^2), \quad J_2 = J_c + 2(J_0 + m\ell_2^2)$$

Здесь J_c момент инерции стержня CC относительно оси OO .

Подставляя значения J_1 и J_2 в общую формулу периода колебаний крутильного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{K}}$, получаем

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J_c + 2J_0 + 2m\ell_1^2}{K}}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J_c + 2J_0 + 2m\ell_2^2}{K}}$$

Отсюда

$$K = \frac{8\pi^2 m(\ell_1^2 - \ell_2^2)}{T_1^2 - T_2^2}$$

По этой формуле вычисляется крутильная жесткость K проволоки, на которой висит стержень CC .

Упражнение 2. Определение момента инерции стержня.

Снять шары со стержня и определить период колебания стержня.

По формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{K}}$ вычислим момент инерции J стержня CC относительно оси OO' . Для контроля следует вычислить момент инерции стержня CC относительно той же оси по формуле

$$J = \frac{1}{12} m\ell^2$$

Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2

№ изме- рений	t	n	T	$J = \frac{K T^2}{4\pi^2}$	$J = \frac{1}{12} m\ell^2$
1				-	-
2				-	-
3				-	-
Среднее значение:					

Определять погрешности измерения величин T , K , J

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Кортнев, А.И. Куценко, Ю.В. Рублев.
Практикум по физике, 1965.

РАБОТА № II

ТРИФИЛАРНЫЙ ПОДВЕС. ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ.

Принадлежности: трифилярный подвес; секундомер; масштабная линейка и штангенциркуль; образцы для измерения момента инерции.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

На рис. I изображена схема трифилярного подвеса, который состоит из диска радиуса R , подвешенного горизонтально на трех нитях к неподвижному диску несколько меньшего радиуса r . Центры дисков расположены на одной вертикальной оси OO_1 .

Повернем нижний диск около оси OO_1 на некоторый угол φ_0 и отпустим его. Диск начнет совершать крутильные колебания около оси OO_1 , при малых амплитудах колебания можно приближенно рассматривать как гармонические, т.е. считать, что угол φ изменяется по закону синуса

$$\varphi = \varphi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1)$$

здесь T - период крутильных колебаний диска.

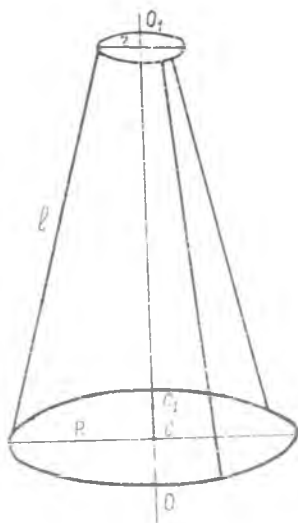


Рис. I

При повороте на угол φ_0 диск поднимается на некоторую высоту $h = CC_1$ (рис.2) и у него появляется запас потенциальной энергии $E_n = mgh$ (m - масса диска). Когда диск проходит положение равновесия, потенциальная энергия колебаний превращается в кинетическую энергию вращательного движения $E_k = \frac{J\omega^2}{2}$ (см. работу 2, § 2).

Согласно закону сохранения энергии $mgh = \frac{J\omega_m^2}{2}$. Отсюда, момент инерции диска равен:

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

По этой формуле можно найти момент инерции диска J , если известна его масса m , максимальная угловая скорость ω_m и высота поднятия h .

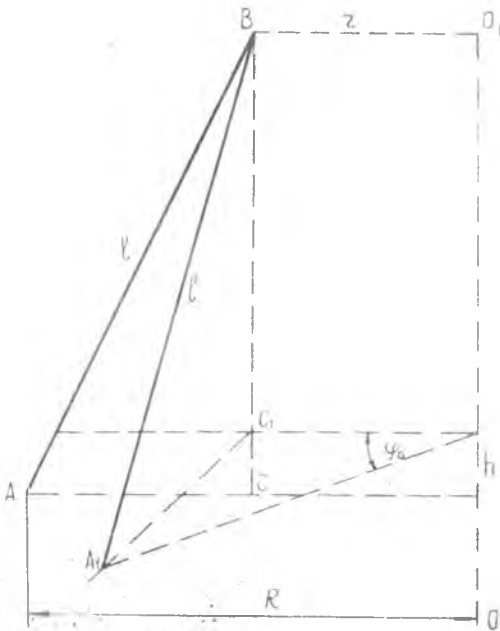


Рис. 2

Для нахождения ω_m про дифференцируем по t обе части уравнения (1)

Получаем
$$\omega = \varphi_0 \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Положив $\cos \frac{2\pi}{T} t = 1$, находим максимальную угловую скорость диска

$$\omega_m = \frac{2\pi\varphi_0}{T} \quad (3)$$

Высота h , на которую поднимается диск, находясь в крайнем положении, определяется из геометрических соображений (рис. 2)

Из $\triangle ABC$ имеем $\ell^2 = BC^2 + (R - z)^2$, а из $\triangle A_1BC_1$

$$\ell^2 = BC_1^2 + A_1C_1^2 = BC_1^2 + R^2 + z^2 - 2Rz \cos \varphi_0.$$

Из этих двух равенств получаем, что

$$BC^2 - BC_1^2 = 2Rz(1 - \cos \varphi_0) = 4Rz \sin^2 \frac{\varphi_0}{2}.$$

На рис. 2 видно, что $BC - BC_1 = h$. При малых амплитудах колебаний можно с допустимой погрешностью положить, что

$BC + BC_1 \approx 2\ell$ и $\sin \frac{\varphi_0}{2} \approx \frac{\varphi_0}{2}$. Проводя замены, получим, что

$$h \cdot 2\ell = 4Rz \cdot \frac{\varphi_0^2}{4}, \quad \text{откуда}$$

$$h = \frac{Rz\varphi_0^2}{2\ell} \quad (4)$$

По формулам (2), (3) и (4) находим момент инерции J нижнего диска

$$J = \frac{mgRz}{4\pi^2} \cdot T^2 \quad (5)$$

Равенство (5) является основной расчетной формулой в этой работе. Все величины, входящие в ее правую часть, измеряются при выполнении работы. По этой формуле можно определить момент инерции J_0 нагруженной платформы, а, следовательно, и момент инерции

J_1 тел, положенных на нее

$$J_1 = J_0 - J$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I. Определение момента инерции ненагруженной платформы (нижнего диска).

1) Измерить радиус платформы R , радиус верхнего диска и длину подвесов ℓ . Масса платформы (а иногда некоторые из перечисленных выше величины) указана на установке.

2) Привести в колебательное движение платформу, для чего нажать на специальный рычаг, укрепленный над верхним диском.

3) Измерить секундомером время t , за которое происходит $n = 30+50$ колебаний. Определить период колебаний T . Все измерения произвести трижды и результаты занести в таблицу I.

4) По формуле (5) вычислить момент инерции ненагруженной платформы.

Таблица I

№ измерений	m	R	r	ℓ	n	t	T	J
1								
2								
3								
Среднее значение								

II. Определение момента инерции исследуемого тела.

1) Положить исследуемое тело на платформу так, чтобы его центр тяжести оказался на оси вращения.

2) Определить период колебаний нагруженной платформы. Результаты занести в таблицу 2.

3) Определить массу исследуемого тела.

4) По формуле (5) вычислить момент инерции нагруженной платформы, приняв за массу m сумму масс тела и платформы. Найти момент инерции тела $J_1 = J_0 - J$, где J - момент инер-

ции ненагруженной платформы, J_0 - момент инерции нагруженной платформы.

Таблица 2

измерения	n	t	T	J_0
1				
2				
3				
Среднее значение				

5) Оценить погрешности измерений.

IV. Измерение момента инерции тела с последующей проверкой результата по теореме Штейнера.

1) Поставить на платформу два одинаковых цилиндра, расположив их симметрично относительно оси вращения на известное расстояние a от нее.

2) Определить момент инерции цилиндров так, как это указано в упражнении II.

3) Результаты опыта проверить теоретически, вычислив момент инерции цилиндра по теореме Штейнера (см. работу 9, § 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Под редакцией проф. В.И. И в е р о н о в о й, Практикум по физике, 1962.

2. А.В.К о р т н е в, А.Н. К у ц е н к о, Ю.В. Р у б л е в, Практикум по физике, 1965.

РАБОТА № 12

КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА
ИНЕРЦИИ ТЕЛА НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ.

Принадлежности: Патрон от токарного станка, подвешенный на проволоке; ключ от патрона; секундомер; штангенциркуль; набор тел.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Тяжелый груз с приспособлением для закрепления исследуемых тел подвешен на упругой (стальной) проволоке, с которой жестко соединен. В предлагаемой работе этим грузом служит патрон от токарного станка. Отвернув специальную крепежную шайбу можно снять патрон с проволоки и закрепить в нем исследуемое тело, для чего с помощью ключа развести кулачки патрона на нужное расстояние, вставить между ними исследуемое тело и снова укрепить его. Затем патрон с закрепленным телом подвешивается на проволоке.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для понимания выполняемой работы нужно знать содержание § 2 и § 3 краткой теории работы № 9.

А. Понятие о крутильных колебаниях.

Тело, жестко подвешенное на упругой проволоке (в нашей работе патрон от токарного станка), повернем около вертикальной оси на некоторый угол φ и отпустим. Под действием упругого вращающего момента, возникающего при закручивании проволоки,

тело начнет совершать крутильные колебания. Через положение равновесия тело проходит по инерции. Крутильные колебания - это переменное вращательное движение. Частицы тела, совершающего крутильные колебания, движутся по дугам окружностей.

При крутильных колебаниях периодически изменяется вращающий момент, угол поворота тела, его угловая скорость, ускорение, кинетическая энергия и т.д.

Если пренебречь затуханием, то при небольших углах поворота крутильные колебания можно рассматривать как гармонические, т.е. считать, что угол φ поворота тела изменяется по закону

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Небольшими углами поворота φ следует считать такие углы, при которых вращающий момент M , создаваемый упругими силами при закручивании проволоки, пропорционален углу закручивания.

$$M = -K\varphi.$$

здесь K - крутильная жесткость проволоки.

При больших углах закручивания, различных для разных проволок, пропорциональность между M и φ нарушается и крутильные колебания нельзя считать гармоническими.

б. Вывод формулы для определения момента инерции тела.

Период T крутильных колебаний тела с моментом инерции J , подвешенного на проволоке, жесткость которой K , определяется формулой (см. работу № 10)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{K}}.$$

Отсюда,

$$J = \frac{KT^2}{4\pi^2}. \quad (I)$$

Период T измеряется при помощи секундомера. Коэффициент крутильной жесткости K из правой части уравнения (I) можно исключить. Для этого прикрепим к патрону тело, момент инерции которого относительно оси проходящей через под-

вес известен. Измерив период T_1 колебаний патрона, нагруженного телом с моментом инерции J_1 , по формуле (1) определим их суммарный момент инерции

$$J + J_1 = \frac{\kappa T_1^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) находим, что J равно

$$J = J_1 \frac{T_2^2}{T_1^2 - T^2} \quad (3)$$

По этой формуле определяется момент инерции J ненагруженного патрона.

Закрепим в патроне вместо тела с известным моментом инерции J_1 , тело с неизвестным моментом инерции J_x и измерим период T_x колебаний нагруженного патрона.

Суммарный момент инерции в этом случае, согласно формуле (1), равен

$$J + J_x = \frac{\kappa T_x^2}{4\pi^2} \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) находим, что

$$J_x = J \frac{T_x^2 - T^2}{T^2} \quad (5)$$

Заменяя в равенстве (5) J по равенству (3), получаем расчетную формулу для данной работы

$$J_x = J_1 \frac{T_x^2 - T^2}{T_1^2 - T^2} \quad (6)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Определить момент инерции тела опытным путем используя формулу (6).

1) Проведя необходимые измерения, по формуле

$$J_1 = \frac{m d^2}{8} \quad (7)$$

определить момент инерции имеющегося цилиндра (m - масса цилиндра, d - диаметр цилиндра).

2) Составить (самостоятельно) таблицу для записи результатов измерений, воспользовавшись для этого формулами (6) и (7) и учитывая, что все измерения следует повторять по три раза.

3) Найти период колебаний T ненагруженного патрона при небольших углах отклонения ($5-10^\circ$). Для этого измерить секундомером время t , за которое патрон совершит $n = 10-20$ полных колебаний и воспользоваться формулой $T = \frac{t}{n}$.

4) Прикрепить к патрону цилиндр с известным моментом инерции J_1 .

5) Измерить период колебаний T , нагруженного патрона согласно п.3.

6) Прикрепить к патрону вместо тела с известным моментом инерции исследуемое тело и измерить снова период T колебания нагруженного патрона.

7) Вычислить момент инерции исследуемого тела по формуле (6).

8) Оценить погрешности измерений.

Упражнение 2. Найти момент инерции исследуемого тела, воспользовавшись формулами (5) и (1).

$$J_x = J \frac{I_x^2 - T^2}{T^2} \quad (5) \quad \text{и} \quad J = \frac{K T^2}{4 g l^2} \quad (1)$$

Напишем без вывода формулу крутильной жесткости K и применим ее к проволоке, на которой подвешен патрон

$$K = \frac{\pi N r^4}{2L}.$$

Здесь r - радиус проволоки;
 L - длина проволоки;
 N - модуль сдвига.

Известно, что модуль сдвига N по численному значению равен приблизительно 0,4 модуля Юнга E , т.е.

$$N \approx 0,4 E.$$

Следовательно,

$$K = \frac{0,4 \pi E \cdot d^4}{32L}. \quad (8)$$

Здесь E - модуль Юнга вещества, из которого состоит проволока. Его величина указывается на установках:

d - диаметр проволоки;

L - длина проволоки, тоже указывается на установке.

Если d и L не указаны, то они измеряются при выполнении работы.

Момент инерции J_x исследуемого тела вычисляется по формулам (8), (1) и (5). При этом значения периодов колебаний T и T_x берутся из первого упражнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Н. М а и с о в а. Практикум по курсу общей физики, 1961.
2. С.Э. Ф р и ш и А.В. Т и м о р е в а. Курс общей физики т. I, 1958.
3. В.М. Я в о р с к и й, Курс физики, т. I, 1963.

РАБОТА № 13

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ КРУТИЛЬНЫЙ МАЯТНИК.
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ

Принадлежности: баллистический крутильный маятник; пневматический пистолет или ружье; секундомер; два стальных шара; масштабная линейка или штангенциркуль.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис.1 изображена схема баллистического крутильного маятника. К вертикально натянутой упругой стальной проволоке AB прикреплен горизонтально расположенный стержень CC . На одном конце стержня прикреплен диск (мишень) D , а на другом — противовес P . Кроме того, на концах стержня имеются специальные приспособления, не показанные на схеме, в которые для измерения момента инерции маятника помещаются стальные шары. В месте прикрепления стержня CC к проволоке имеется зеркальце Z . По углу поворота светового луча, отраженного от зеркальца, измеряется угол поворота стержня.

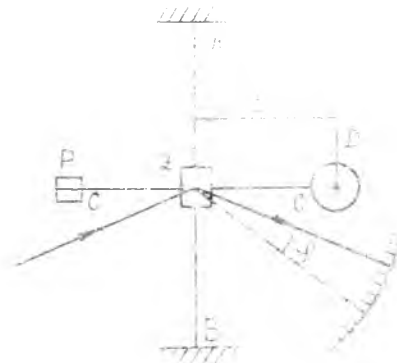


Рис. 1

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ *

А. Понятие о крутильных колебаниях.

Повернем стержень СС (рис. I) на некоторый угол φ в горизонтальной плоскости и отпустим. Маятник начнет совершать крутильные колебания, которые происходят под действием упругого крутящего момента, возникающего при закручивании проволоки АВ. Положение равновесия стержень СС проходит по инерции. При крутильных колебаниях периодически изменяется угол φ поворота стержня СС, его угловая скорость, кинетическая энергия, изменяется крутящий момент и некоторые другие величины.

Если пренебречь затуханием, то при небольших углах поворота колебания крутильного маятника можно рассматривать как гармонические колебания, т.е. считать, что угол поворота φ изменяется по закону

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где φ_0 - амплитуда колебаний.

Небольшими углами поворота φ следует считать такие углы, при которых вращающий упругий момент M пропорционален углу закручивания φ , т.е.

$$M = -K\varphi.$$

Здесь K - коэффициент крутильной жесткости проволоки АВ.

При попадании горизонтально летящей пули в диск Д маятник начинает совершать крутильные колебания.

Б. Определение скорости пули.

Пуля, летящая поступательно, со скоростью v , обладает количеством движения или импульсом p , равным $p = mv$.

Здесь m - масса пули. Та же пуля при вращательном движении, дви-

*) Для понимания теории баллистического крутильного маятника нужно знать содержание § 2 и § 3 работы № 9.

гань по окружности радиуса z , обладает моментом количества движения L , равным $L = J\omega$. Если пулю рассматривать как частицу, то ее момент количества движения можно выразить через линейную скорость v или через количество движения

$$L = J\omega = mz^2 \frac{v}{z} = mvz = pz.$$

При попадании в диск пули некоторое, весьма малое время, движется вместе с диском по окружности радиуса z (рис.1). В начальный момент взаимодействия с пулей диск покоится, а пуля обладает моментом количества движения mvz . Считая удар неупругим, полагаем, что в конечный момент взаимодействия угловая скорость диска и пули одна и та же, и равна максимальной скорости колебаний диска ω_m . Общий момент количества движения L маятника и пули после их взаимодействия равен

$$L = (J_1 + J)\omega_m.$$

Здесь J_1 - момент инерции пули, а J - момент инерции маятника. Очевидно, что $J_1 \ll J$, т.е. $L = J\omega_m$.

Согласно закону сохранения момента количества движения

$$mvz = J\omega.$$

Отсюда скорость пули v равна

$$v = \frac{J\omega_m}{mz}. \quad (1)$$

Величины m и z могут быть непосредственно измерены.

Момент инерции маятника J можно измерить, воспользовавшись формулой периода T колебаний крутильного маятника (см. теорию работы № 10).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K}}.$$

Отсюда,

$$J = \frac{KT^2}{4\pi^2}. \quad (2)$$

Период колебаний T измеряется при помощи секундомера, и после этого в правой части уравнения (2) остается неизвестным только коэффициент крутильной жесткости K . Для его исключения проведем второй опыт.

Поместим на концах стержня CC при помощи имеющихся там приспособлений стальные шары известной массы m , и определим период колебаний T_1 нагруженного маятника.

Принимая шары за материальные точки, по формуле (2) определяем момент инерции нагруженного маятника

$$J + 2m_1 z_1^2 = \frac{K T_1^2}{4\pi^2} \quad (3)$$

Здесь z_1 - расстояние от центра каждого из шаров до оси вращения, т.е. до проволоки AB (рис.1).

Исключая из уравнений (2) и (3) коэффициент крутильной жесткости K , находим момент инерции ненагруженного маятника

$$J = \frac{2m_1 z_1^2}{\left(\frac{T_1}{T}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

Теперь для нахождения скорости пули v по формуле (1) остается определить максимальную угловую скорость крутильных колебаний маятника, возникших в результате попадания пули в его диск. Для этого нужно продифференцировать по t обе части формулы

$$\varphi = \varphi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

Получаем

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T} \varphi_0 \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Из последнего равенства видно, что угловая скорость ω максимальна при

$$\cos \frac{2\pi}{T} t = 1$$

Следовательно,

$$\omega_m = \frac{2\pi \varphi_0}{T} \quad (5)$$

Здесь φ_0 - амплитуда колебаний, т.е. угол, на который поворачивается стержень CC после попадания пули в диск D .

Угол φ_0 измерится поворотом светового луча, отражаемого от зеркала Z . Следует иметь ввиду, что при повороте зеркала, а, следовательно, и стержня CC на угол φ_0 луч, отраженный зеркалом Z , поворачивается на угол $2\varphi_0$. Дело в том, что при повороте зеркала на угол φ_0 увеличивается угол падения луча (т.к. поворачивается перпендикуляр проведенный в точку падения луча) и угол отражения, в результате чего луч поворачивается на угол $2\varphi_0$.

Итак, для определения скорости пули v следует воспользоваться формулой

$$v = \frac{J\omega_m}{2m}$$

и формулами (4) и (5) для нахождения величин J и ω_m .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Все измерения (кроме взвешивания) следует проводить по три раза. Результат каждого измерения заносить в составленную самостоятельно таблицу.

1. Взвесить десять пуль и найти массу m одной пули.
2. Измерить расстояние от оси вращения маятника до центра диска (пуля должна попадать в центр диска).
3. Отклонив маятник рукой на $3-7^\circ$ в горизонтальной плоскости, измерить время 10-20 полных колебаний. Вычислить период колебаний T маятника.
4. Положить шары, предварительно определив их массы, в специальные приспособления на концах маятника и измерить период T_1 колебаний нагруженного маятника.
5. По формуле (4) вычислить момент инерции ненагруженного маятника.
6. Привести маятник в состояние покоя. Снять шары. Включить осветитель и произвести выстрел, измерить угол отклонения зайчика.
7. Зная, максимальный угол отклонения маятника (он равен половине угла отклонения зайчика), по формуле (5) найти

максимальную угловую скорость ω_m колебаний маятника.

8. По формуле (1) вычислить скорость пули.

9. Оценить погрешности измерения скорости пули.

Л и т е р а т у р а

1. Кортнев и др. Практикум по физике, 1965.

2. В.А.Ильорский, Курс физики, т.1, 1963.

РАБОТА № 14

МАЯТНИК ОБЕРБЕКА.*)

Принадлежности: установка, смонтированная на столе или на стене; секундомер; набор гирь; штангенциркуль.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

На рис. 1 изображена схема маятника Обербека. Четыре стержня с грузами массой m укреплены крестообразно на одной оси со шкивом радиуса ζ . К нити, намотанной на шкив, подвешен груз P . Груз P устанавливается на верхней платформе А. При опускании этой платформы груз падает вдоль линейки и ударяется о нижнюю платформу В. Если груз падает с ускорением a , то шкив, а, следовательно, и стержни с грузами движутся с угловым ускорением

$$\xi = \frac{a}{\zeta}.$$

Упражнение I.

Измерить момент инерции маятника при различных моментах вращения.

Все четыре груза одинаково удалены от оси вращения.

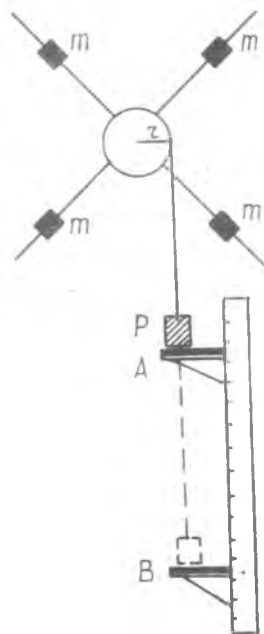


Рис. 1

*) Для усвоения теоретической части этого вопроса см.

1. Измерить штангенциркулем радиус шкива, на который намотана нить.
2. Поставить на верхнюю платформу груз P и, отпустив его, измерить время t и высоту H падения груза.
3. По формулам $H = \frac{at^2}{2}$ и $\varepsilon = \frac{a}{r}$ найти угловое ускорение $\varepsilon = \frac{2H}{rt^2}$. По формуле $J = \frac{M}{\varepsilon}$ найти момент инерции маятника. Момент силы M определяется по формуле $M = m(g - a)r$.
4. Повторить измерения еще для двух различных грузов.
5. Перемотать нить на шкив другого диаметра и повторить все измерения для одного груза.
6. Результаты работы занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	r	P	M	H	t	ε	J
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:

7. Найти среднее значение момента инерции.
8. Определить погрешности измерения момента инерции.

Упражнение 2. Найти изменение момента инерции маятника при перемещении грузов Π относительно оси вращения.

1. Все четыре груза, находящиеся на стержнях придвинуть вплотную к закрепленным концам стержней и трижды измерить момент инерции маятника (см. упр.1). Найти среднее значение момента инерции J_1 .
2. Грузы переместить к концам стержней. Трижды измерить момент инерции маятника и найти его среднее значение J_2 .
3. Найти изменение момента инерции маятника $\Delta J = J_2 - J_1$.
4. Проверить результат измерения ΔJ по теореме Штейнера, для чего измерить расстояния l_1 и l_2 грузов от оси вращения в первом и втором случаях. Затем воспользоваться следующими фор-

мулами: $J_1 = J_K + 4 (J_2 + m \ell_1^2),$

$$J_2 = J_K + 4 (J_2 + m \ell_2^2).$$

Здесь J_K - момент инерции крестовины (стержней);

J_2 - момент инерции одного груза, масса которого m .

Отсюда

$$\Delta J_1 = J_2 - J_1 = 4m (\ell_2^2 - \ell_1^2).$$

Сравнить ΔJ_1 с ΔJ полученным по пункту 3.

5. Определить погрешности измерений в упражнении 1 и в упражнении 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Под ред. проф. В.И. И в е р о н о в о й. Практикум по физике, 1962.

2. А.В. К о р т н е в, А.Н. К у ц е н к о, Ю.В. Р у б л е в, Практикум по физике, 1965.

РАБОТА № 15

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК. ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Принадлежности: набор пружин, набор грузиков известной массы; секундомер; масштабная линейка или штангенциркуль; стойка для подвешивания пружин.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Существуют различные виды пружинных маятников (например, маятник карманных часов). В предлагаемой работе рассматривается пружинный маятник, состоящий из небольшого груза (материальной точки), подвешенного на легкой, упругой пружине. Деформация растяжения x упругой пружины под действием деформирующей силы F определяется по закону Гука

$$F = -kx.$$

Здесь k - коэффициент жесткости пружины.

Пружинный маятник совершает колебания, период T которых, равен:

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

Здесь m - масса маятника, т.е. груза подвешенного на пружине.

Вывод этой формулы и понятия о гармонических колебаниях смотрите в работе № 9, § 3.

Упражнение I. Определение коэффициента жесткости пружины статическим методом.

1. Подвесить на пружину известный груз P и измерить удлинение x пружины.

2. Найти коэффициент жесткости « k » пружины по формуле $k = \frac{P}{x}$

$$T_{\text{кр}} =$$

$$T_{2\text{ср}} =$$

$$T_{3\text{ср}} =$$

$$T_{1\text{ср}}^2 =$$

$$T_{2\text{ср}}^2 =$$

$$T_{3\text{ср}}^2 =$$

3. По полученным данным построить график зависимости квадрата периода T^2 от массы груза m .

Упражнение 3. Исследование зависимости периода собственных колебаний пружинного маятника от коэффициента жесткости пружины.

1. Измерить период собственных колебаний пружинного маятника для всех имеющихся пружин при одном и том же грузе. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

№ пружин	n	t	T	$\frac{1}{T^2}$	K с/м
1					
2					
3					

2. Построить график зависимости $\frac{1}{T^2}$ от K , где K - коэффициент жесткости определенный статическим методом.

3. Вычислить коэффициент жесткости K по формуле $K = \frac{4\pi^2 m}{T^2 g}$ и сравнить его с K в таблице 2.

4. Оценить погрешности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

Г. Б. М. Я в о р с к и й, Курс физики, т. I, 1963.

2. С. Э. Ф р и ш и А. В. Т и м о р е в а. Курс общей физики, т. I, 1962.

РАБОТА № 16

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕРЖНЕ

Принадлежности: прибор Кундта; сукно; канифоль; линейка с миллиметровыми делениями.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Бегущие волны. На каждую частицу вещества со стороны других окружающих ее частиц, действуют силы притяжения и силы отталкивания. Частицы в веществе, однако, находятся в покое из-за того, что равнодействующая этих сил равна нулю. Частицы в веществе можно смеотить с их "собственных" мест, отдалив от одних соседних частиц и приблизив к другим. При малых перемещениях равнодействующая указанных выше сил становится отличной от нуля. Эта сила, называемая упругой силой, стремится смещенные частицы возвратить в их исходное положение.

Упругая сила, возвратив частицу в ее исходное положение, становится равной нулю. Но частица, оставаясь в прежнем месте, имеет теперь скорость и, следовательно, кинетическую энергию. Эту кинетическую энергию частица передает соседним частицам, выводя их из положения равновесия, а соседние передают энергию следующим и т.д.

Таким образом, сообщенная какому-либо участку упругой среды энергия вынуждает частицы колебаться около своего положения равновесия, а введенная энергия будет переноситься по среде все дальше и дальше от своего первоначального места. Процесс распространения колебаний в среде называется волной. Наиболее характерно то, что в волновом процессе происходит перенос энергии без переноса частичек среды.

Если к участку среды прикладывается периодически действующая возмущающая сила, то от места возмущения будут непрерывно исхо-

дить волны, которые называются бегущими волнами (рис.1). Представим себе, что точка, от которой идут колебания (центр колебаний), колеблется в сплошной среде. Колебания распространяются от центра во все стороны.

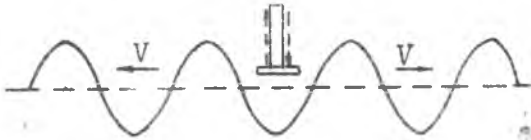


Рис. 1

Геометрическое место точек, до которых к некоторому моменту времени дошло колебание,

называет фронт волны. Можно также в среде выделить геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах. Эта совокупность точек, образующих поверхность одинаковых фаз, называется волновой поверхностью или поверхностью волны. Очевидно, что фронт волны частный случай волновой поверхности. Если среда изотропна, то колебания от центра распространяются во все стороны с одинаковой скоростью. В этом случае фронт волны и поверхности одинаковых фаз представляет собой сферы, центры которых лежат в центре колебаний (рис.2).

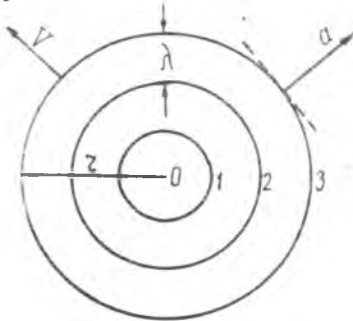


Рис. 2

которые распространяются колебания называются лучами. Если колебания частиц происходит вдоль луча, то волны называются продольными. Если колебания происходят перпендикулярно лучу, то волны называются поперечными. Плоскими волнами считают такие, у которых фронт волны есть плоскость, а лучи, следовательно, параллельны друг другу.

Рассмотрим плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси Ox . Будем считать, что в данной волне точки среды совершают гармоническое колебание около своих положений равновесия. Следует

заметить, что во многих волновых процессах колебания точек среды описываются более сложными функциями, чем синус или косинус. Колебание точек среды, расположенных в начале координат (рис.3), запишется уравнением

$$y = A \sin \omega t, \quad (1)$$

где A - амплитуда колебания;

ω - угловая частота;

t - время, отсчитанное от момента начала колебания.

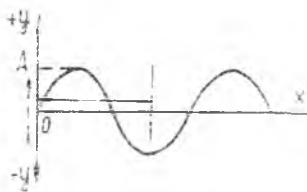


Рис. 3

Очевидно, что таким же уравнением можно выразить колебания всех точек луча

Ox , только время t для каждой точки будет разное. Уравнение колебаний произвольной точки луча на расстоянии x от центра запишется так:

$$y = A \sin \omega t_1, \quad (2)$$

Понятно, что эта точка начала колебаться позже, чем центр колебаний на некоторое время τ , необходимое для того, чтобы колебание от центра дошло до нее. Это запаздывание определится как

$$t_1 = t - \tau.$$

Уравнение (2) после замены t_1 его значением принимает вид

$$y = A \sin \omega (t - \tau). \quad (2a).$$

Так как вдоль оси x скорость волны v , то время запаздывания τ будет

$$\tau = \frac{x}{v}.$$

После новой замены имеем:

$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

Уравнение (26) называется уравнением плоской волны. Оно определяет величину смещения от положения равновесия любой произвольной точки луча в данный момент времени.

Уравнение сферической волны будет аналогичным:

$$y = \frac{A}{r} \cdot \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right), \quad (2c)$$

где r - радиус сферы, до которой дошел фронт волны.

Характерным для сферической волны является то, что амплитуда ее убывает с увеличением расстояния от центра колебаний.

Уравнение плоской волны (26) приводится к другому виду следующими заменами:

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

Здесь ω - угловая частота;
 T - период колебаний.

$$\lambda = v T.$$

Здесь λ - длина волны;
 v - скорость волны.

Стояние волны. Бегущая вдоль оси Ox волна может на своем пути встретить препятствие - границу раздела двух сред с различными физическими свойствами. Здесь наблюдаются сложные явления. Волна частично пройдет во вторую среду, частично отразится. И для механических волн будут справедливы известные законы - угол падения волны будет равен углу отражения. Отношение синуса угла падения волны к синусу угла преломления (прошедшей во вторую среду) волны будет равно отношению скоростей волн в этих средах. Если вторая среда будет иметь большую плотность, чем первая, то отраженная волна изменит фазу на π по отношению к падающей. Наоборот: потери фазы в отраженной волне не будет, если плотность второй среды меньше первой.

Рассмотрим случай, когда отраженная волна идет навстречу падающей. Будем считать, что волны на своем пути не затухают, т.е. энергия везде одинаковая (рис.4). Уравнения этих волн будут:

$$J_1 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (\text{падающей}),$$

$$J_2 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \quad (\text{отраженной}).$$

В уравнении отраженной волны перед дробью $\frac{x}{\lambda}$ ставится знак плюс из тех соображений, что ее скорость v имеет противоположное направление к выбранной системе координат.

Частицы среды на расстоянии x от центра O будут приходить в колебательное движение от обеих волн. Результирующее колебание определится их суммой, поскольку они совершаются в одном направлении



Рис. 4

$$y = y_1 + y_2 = A \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right].$$

После сложения тригонометрических функций получается уравнение стоячей волны

$$y = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t. \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) позволяет сделать вывод, что частицы среды, где имеет место стоячая волна, по-прежнему совершают гармонические колебания около своих положений равновесия; амплитуды колебаний частиц среды в стоячей волне различны и зависят от того, на каком расстоянии x они находятся.

Точки с максимальной амплитудой, равной $2A$, будут расплываться в тех местах, где x равен целому числу полуволн:

$$X = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, 3. \quad (4)$$

При этих значениях X , как легко видеть, в уравнении стоячей волны (3) косинус обращается в единицу. для так называемых узлов-точек, не участвующих в колебаниях, условием будет следующее:

$$X = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2, 3. \quad (5)$$

Расстояние между соседними пучностями или соседними узлами в стоячей волне всегда равно половине длины волны.

В этом можно убедиться, если в (4) и (5) сделать соответствующие вычисления

$$X_n - X_{n-1} = n \frac{\lambda}{2} - (n-1) \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}. \quad (4a)$$

$$X_n - X_{n-1} = (2n-1) \frac{\lambda}{4} - [2(n-1)+1] \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}. \quad (5a)$$

На рис.5 изображена стоячая волна, которую образуют падающая 1 и отраженная 2 волны.

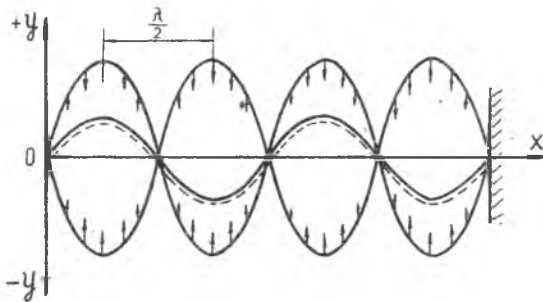


Рис., 5

Из уравнения (3) следует, что между соседними узлами фаза для всех точек одна и та же, а при переходе через узел фаза сразу меняется на π (меняется знак ψ).

Таким образом, выясняются следующие особенности стоячей волны. В случае бегущей волны разные точки колеблются с одинаковой амплитудой, но в различных фазах, а в случае стоячей волны разные точки колеблются в одинаковой фазе, но с различной амплитудой.

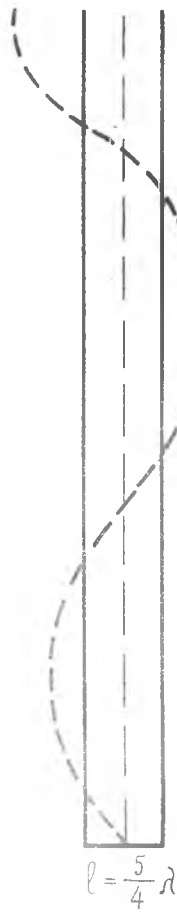
Если у открытого конца трубы поместить какой-либо источник колебаний, то от него колебания будут передаваться воздушному столбу. Меняя длину трубы, обнаружим, что при определенных длинах воздушного столба амплитуда колебаний резко возрастает. Это будет в том случае, когда собственная частота колебаний воздушного столба совпадает с частотой колебаний источника (при отсутствии затухания). Такое явление называется р е з о н а н с о м.

В трубе, закрытой с одного конца, собственной частоте будут соответствовать такие стоячие волны, при которых у открытого конца образуется пучность, а у закрытого - узел, т.е. явление резонанса будет иметь место всякий раз, когда в трубе уложится нечетное число четвертей волны (рис.6).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе определяется скорость звука в металлическом стержне. Для этой цели используется прибор Кундта, состоящий из широкой стеклянной трубы Т, закрытой с одного конца пробкой П и стержня С, входящего одним концом в трубу (рис.7). Стержень зажат в точках А и В. К его концу, входящему в трубу, прикреплен легкий диск Д. Если стержень на участке между опорами А и В натирать сукном, слегка покрытым канифолью, то в нем возникают продольные волны.

Вследствие отражения этих волн на концах стержня, в нем образуются стоячие волны с узлами в точках закрепления стержня. Колебания стержня передаются воздуху в трубе. Вследствие отра-



тени волны от пробки П и диска Д, в трубке создаются стоячие воздушные волны. Чтобы их обнаружить, в трубу насыпают пробковые опилки, которые вследствие колебания воздуха располагаются в характерные Кундтовы фигуры. В пучностях воздушной волны опилки разбрасываются, в узлах же остаются в покое. Стоячие волны образуются также, если пробка П отсутствует. В этом случае отражение волн происходит от воздушной среды, окружающей трубку.

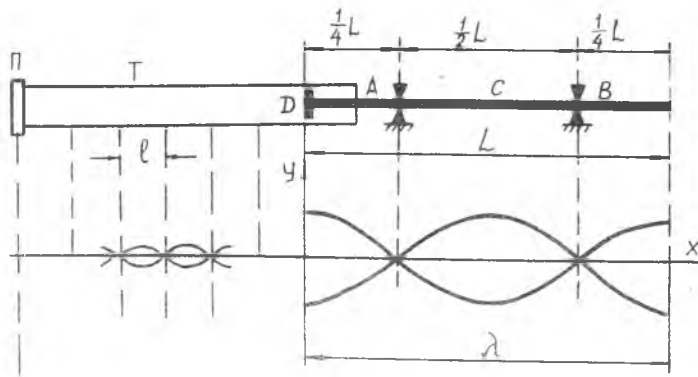


Рис. 7

На графике (рис.7) по оси X изображено смещение колеблющихся точек вдоль стержня и расположение фигур Кундта в трубке. Вводятся такие обозначения: L - длина стержня; λ - длина волны в стержне; l - расстояние между узлами одной фигуры Кундта; v - скорость упругих волн в стержне; v_1 - скорость упругих волн в воздухе; λ_1 - длина волны в воздухе; T - период колебаний, который является общим и для частичек стержня и для частичек воздуха в трубе.

$$\lambda = vT - \text{длина волны в стержне;}$$

$$\lambda_1 = v_1 T - \text{длина воздушной волны в трубке.}$$

Разделив эти равенства друг на друга, и заменив $\lambda = L$, $\lambda = 2\ell$ (см. рис. 7), мы получаем расчетную формулу для скорости упругих волн в исследуемом стержне

$$v = v_1 \frac{L}{2\ell} \quad (6)$$

Скорость упругих волн в воздухе, в том числе и звуковых, можно принять

$$v_1 = 340 \text{ м/сек.}$$

Такая скорость соответствует температуре 20°C , при которой обычно протекает опыт.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом опыта проверяют, не касается ли диск стенок трубки. В таком случае поднимают или опускают трубку при помощи винтов. Натирают стержень на участке АВ сукном, покрытым канифолью. При этом стержень должен издавать резкий высокий звук. Следят в то же время за образованием Кундтовых фигур в трубке. Постепенно надвигая трубку на стержень, добиваются образования отчетливых фигур. Измеряют общую длину нескольких фигур и вычисляют длину ℓ каждой. Измеряют длину стержня L . Подсчитывают скорость упругих волн в стержне по формуле (6). Подсчитывают ошибки результатов, полученных в опыте.

РАБОТА № 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО КОРМБУ

Принадлежности: исследуемый стержень; пеньки с опорами для стержня; микроскоп; гири.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Деформацией называется всякое изменение в расположении частиц твердого тела под влиянием внешних сил. К простейшим деформациям относят растяжение (обратное ему сжатие), изгиб и кручение. Все другие виды деформации (сдвиг, изменение объема тела и т.д.) являются сложными.

Все виды деформации подчиняются трем основным законам.

1. В пределах упругости деформация пропорциональна величине внешнего усилия.
2. Перемена знака внешнего усилия вызывает только перемену знака деформации, без изменения ее абсолютной величины.
3. При действии нескольких внешних усилий общая деформация равна сумме частных деформаций.

Если к стержню или проволоке приложить силу F перпендикулярно площади поперечного сечения S и сила равномерно распределена по этому сечению, то испытуемый образец удлинится (или укоротится) на ΔL , которое называется абсолютным удлинением (Рис. I). В пределах упругой деформации величина растяжения (или сжатия), как известно, может быть найдена из закона Гука

$$\Delta L = \frac{FL}{ES}, \quad (I),$$

где L - первоначальная длина образца;
 E - модуль Юнга, которым характеризуются упругие свойства



Рис. 1

ва материала стержня.

Деформация изгиба оценивается так называемой стрелой прогиба Δz (рис.2). Деформация изгиба будет считаться упругой, если стрела прогиба стремится к нулю ($\Delta z \rightarrow 0$) при устранении деформирующих усилий.

При изгибе тела одни его слои растягиваются, а другие сжимаются. Длина какого-то среднего слоя OO' (рис.3) остается неизменной. Изгиб сводится к растяжению и сжатию отдельных участков тела, поэтому стрела прогиба Δz , как и абсолютное удлинение при растяжении, должна быть пропорциональна действующей силе F и обратно пропорциональна модулю Юнга E . Однако эта зависимость более сложная, чем формула (1) закона Гука. Величина стрелы прогиба зависит от размеров тела, от его формы и от способов крепления тела с неподвижными опорами.

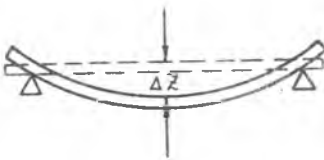


Рис. 2

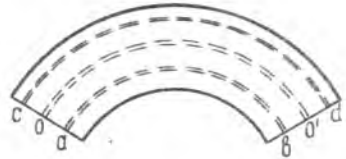


Рис. 3

Если стержень опирается на ребра двух опор, расстояние между которыми ℓ и к середине стержня прикладывается сила P_r (рис.4), то величина стрелы прогиба Δz определяется формулой

$$\Delta z = \frac{P_r \ell^3}{4Ea\delta^2}, \quad (2)$$

где a и b соответственно ширина и высота прямоугольного сечения стержня (вывод формулы дается в приложении). Эта формула справедлива при условии, что вес стержня значительно меньше веса тех гирь P_r , которые прикладываются к его середине для создания изгиба.

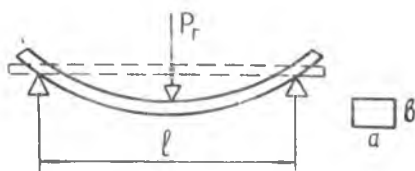


Рис. 4

Для определения модуля Юнга E материала стержня соотношение (2) можно переписать в другом виде:

$$E = \frac{P_r l^3}{4 \Delta z a b} \quad (2a)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На панели установлены опоры для укладки стержня и кронштейн для крепления микроскопа. Панель крепится на стене. На середину стержня одета навеска для установки гирь. На грани стержня, обращенной к наблюдателю, имеется метка - горизонтальная линия (граница черного и белого полей).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В первую очередь производится фокусировка и настройка тубуса микроскопа на собственную микрометрическую шкалу и на метку стержня (перечень этих работ указан в работе № 18). Измеряется линейкой с точностью до одного миллиметра длина стержня (расстояние между его опорами). Измеряется штангенциркулем с точностью до десятых долей миллиметра в трех разных местах ширина

стержня a . Ширина стержня вычисляется как среднее значение из 3-х измерений. Аналогично по трем измерениям вычисляется средняя высота стержня b .

Наблюдают в микроскоп и записывают, на каком делении шкалы микроскопа n_0 видна горизонтальная метка стержня, когда отсутствует нагрузка. На основание подвески устанавливают гиру $P_{Г1}$ (0,5 кг). Наблюдают и записывают, на какое деление шкалы микроскопа n_1 сместилась метка.

Вычисляют стрелу прогиба в делениях шкалы

$$D_1 = n_1 - n_0.$$

Вычисляют стрелу прогиба ΔZ_1 в миллиметрах (с точностью до тысячных долей миллиметра) по формуле

$$\Delta Z_1 = \kappa D_1,$$

где κ число, обратное увеличению микроскопа.

В таблице, приложенной к установке, приведены значения κ для различных длин тубуса.

Результаты всех измерений записывают в таблицах и вычисляют первое значение модуля Юнга E_1 для груза $P_{Г1}$. Модуль вычисляется по формуле (2а)

$$E = A \frac{P_{Г1}}{\Delta Z},$$

где

$$A = \frac{l^3}{4ab^3}.$$

Коэффициент A будет постоянным для всех последующих вычислений. Модуль Юнга E вычисляют с точностью до целых тысяч единиц ($\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$).

Аналогичным способом выполняют еще четыре опыта с другими грузами (1 кг, 1,5 кг, 2 кг и 2,5 кг).

П р и м е ч а н и е: Перед тем, как ставить новый груз, прежний полностью снимается и производится наблюдение за положением метки n_0 , когда стержень не нагружен.

Результаты всех измерений и вычислений записывают в таблицы.

Таблица 1.

Длина стержня l .

Ширина стержня a .

Высота стержня b .

Коэффициент $A = \frac{l^3}{4ab^3}$.

Коэффициент K .

Таблица 2

№ опыта	Вес P_r (кг)	Стрела прогиба $D = n - n_0$ (делений)	Стрела прогиба $\Delta z = h \cdot D$ (мм)	Модуль Юнга $E = A \frac{P_r}{\Delta z}$ (кг/мм ²)
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее значение модуля Юнга				$E_{\text{ср}}$

Вычисляют среднее значение модуля Юнга в единицах системы СИ.
Вычисляют погрешности в выполненном опыте.

П р и л о ж е н и е. Вывод формулы для величины стрелы прогиба

Рассмотрим прямоугольный стержень, который имеет ширину a , высоту b и длину свободного участка L (рис. I).

На расстоянии X от места крепления возьмем элемент стержня длиной dx и вычислим стрелу прогиба dZ стержня, вызванную изгибом этого элемента.

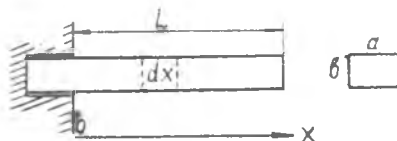


Рис. I

На рис. 2 изображен рассматриваемый элемент. Направление I поперечного сечения стержня на расстоянии X . Направление II поперечного сечения стержня на расстоянии $X + dx$. Если сечение III параллельно сечению I, то на участке dx слои, лежащие выше осевой линии OO растянулись, а нижние сжались. Слой толщиной dy , лежащий выше осевой линии OO , на расстоянии y от нее, удлинится на величину $d\ell$. Это удлинение можно выразить через другие величины следующим образом. Обозначим через dc удлинение самых верхних слоев элемента. В таком случае можно написать пропорцию:

$$\frac{d\ell}{y} = \frac{dc}{\frac{b}{2}}.$$

Отсюда

$$d\ell = \frac{2dc \cdot y}{b}.$$

(I)

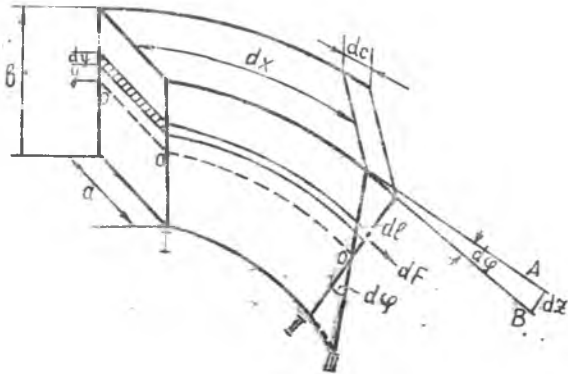


Рис. 2

Удлинение указанного элемента вызвано некоторой элементарной силой dF . По закону Гука $d\ell$ определится

$$d\ell = \frac{dF \cdot dx}{E \cdot a \cdot dy}, \quad (2)$$

где E - модуль Юнга материала стержня.

Подставив $d\ell$ из (1) в (2) и решая (2) относительно dF ,

$$\text{имеем: } dF = \frac{2Edcay}{dx \cdot b^3} \cdot dy \quad (2a)$$

Элементарная сила dF , приложенная к элементу толщины dy , действует перпендикулярно расстоянию y . Так как расстояние y является плечом силы dF , то элементарный момент силы dF будет

$$dM = y \cdot dF$$

или

$$dM = \frac{2Edc \cdot a}{dx \cdot b^3} \cdot y^2 dy \quad (3)$$

Момент силы, действующий на все поперечное сечение стержня, определится суммой элементарных моментов, т.е. интегрированием

$$M = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \frac{2Edc \cdot a}{dx \cdot b^3} \cdot y^2 dy = \frac{Edcab^2}{8 dx} \cdot \quad (3a)$$

Ясно, что такой момент сил можно создать, если приложить к стержню на том же участке x груз весом P . Равновесие момента упругих сил в стержне и момента действующих на стержень внешних сил определится равенствами:

$$M = P \cdot x \quad \text{или} \quad \frac{Edcab^2}{8 dx} = P \cdot x \quad (4)$$

Удлинение верхнего слоя элемента dx на dc вызывает его изгиб. Мерой изгиба будет угол $d\varphi$ между плоскостями I и III, а также между линиями A и B, проведенными перпендикулярно к этим плоскостям.

Величина упомянутого угла легко определяется

$$d\varphi = \frac{dc}{\frac{b}{2}} = \frac{2dc}{b}. \quad (5)$$

Подставив dc из (4) в (5), для угла $d\varphi$ имеем:

$$d\varphi = \frac{12Px dx}{Eab^3}. \quad (5a)$$

Концы линий А и В (рис.4) совпадают со свободным концом стержня, а конец стержня фиксируется текущей координатой x . Ясно, что изгиб только элемента длины dx стержня на угол $d\varphi$ создает стрелу прогиба $d\zeta$ конца стержня, которая определится простым соотношением

$$d\zeta = x \cdot d\varphi = \frac{12P}{Eab^3} \cdot x^2 dx. \quad (6)$$

Величина всей стрелы прогиба $\Delta\zeta$ на свободном участке стержня длиной L , где весит груз P , определится интегрированием (6) в пределах от 0 до L .

$$\Delta\zeta = \int_0^L \frac{12P}{Eab^3} x^2 dx = \frac{4Pl^3}{Eab^3}. \quad (7)$$

Формула (7) определяет стрелу прогиба стержня, изображенного на рис. 1. В лабораторной установке стержень кладется на две опоры (рис.5). Длина исследуемого стержня l есть расстояние между его опорами. Так как концы данного стержня неподвижны, а груз P_r подвешивается на его середину, то стрела прогиба будет расстояние, на которое опускается средняя точка стержня (рис.3).

Формулу (7) можно применить и к данному стержню с закрепленными концами, если считать, что

$$L = \frac{l}{2} \quad \text{и} \quad P = \frac{P_r}{2}.$$

После замены L и P в (7) получаем расчетные формулы для стрелы прогиба Δz и для модуля Юнга материала стержня, который используется в лабораторной работе

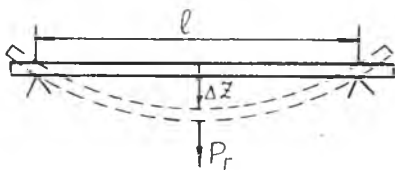


Рис. 3

$$\Delta z = \frac{P_r \cdot l^3}{4 E a b^3}, \quad (8)$$

$$E = \frac{P l^3}{4 \Delta z a b^3}. \quad (8a)$$

При выводе формулы (8) мы не учитывали то, что распределенный по длине собственный вес стержня должен создавать добавочную стрелу прогиба Δz_0 . Однако, если вес гирь, прикладываемых к середине стержня, сложенный с весом концов стержня за его опорами, будет значительно больше веса стержня между опорами, то добавочную стрелу прогиба можно не учитывать, т.к. $\Delta z_0 \ll \Delta z$

РАБОТА № 18

МОДУЛЬ ЮНГА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Принадлежности: исследуемая вертикально натянутая проволока; набор грузов разных весов; микроскоп с микрометрической шкалой; осветитель; микрометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Деформацией называется изменение формы и размеров сплошного тела или его элементов. Наиболее простыми видами деформации являются растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Деформация может быть следствием теплового расширения, воздействия магнитного и электрических полей, а также внешних механических сил.

Деформация называется упругой, если она исчезает после удаления вызвавших ее причин, и пластической, если она остается (хотя бы частично) после прекращения действия деформирующих сил.

Все реальные твердые тела обладают в большей или в меньшей степени свойствами пластической деформации. Однако при некоторых условиях пластическими свойствами тела можно пренебречь. В таком случае тела будут считаться упругими. Следует подчеркнуть, что тела можно считать упругими только до определенной величины нагрузочной силы и в каких-то ограниченных условиях. Пластичность тела может быть заметной и сильно выраженной, если его температура увеличивается, если силовая нагрузка меньше предельной, но действует длительно или переменнo с большей частотой.

Для тел, обладающих свойствами упругой деформации растяжения или сжатия экспериментально была установлена количествен-

ная зависимость между величинами, характеризующими размеры тела и приложенную силу. Эта зависимость носит название закона Гука и записывается формулой:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{ES} \quad (I)$$

Здесь F - величина силы, действующей на стержень перпендикулярно его сечению;

l - длина стержня;

S - площадь сечения;

E - величина, характеризующая упругие свойства тела, называемая модулем Юнга;

Δl - абсолютное удлинение (сжатие).

Решив (I) относительно E , имеем

$$E = \frac{F}{S} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{F}{S} \cdot \frac{l}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (Ia)$$

Отношение силы, действующей перпендикулярно любой плоскости тела и распределенной по ней равномерно к величине этой плоскости, называют напряжением

$$P = \frac{F}{S}$$

Отношение абсолютного удлинения тела к его первоначальной длине называется относительным удлинением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Вводя эти определения получаем выражение для модуля Юнга:

$$E = \frac{P}{\varepsilon} \quad (Iб)$$

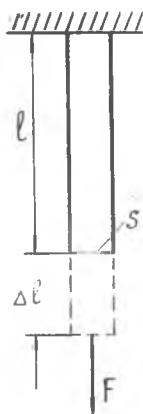


Рис. I

Следовательно, модуль Юнга есть величина, определяемая отношением напряжения в теле к относительному удлинению тела, вызванному этим напряжением.

В частном случае, если $\mathcal{E} = 1$, т.е. абсолютное удлинение равно первоначальной длине стержня l , а площадь его поперечного сечения равна 1 м^2 , то в этом случае модуль Юнга численно равен приложенной силе. Таким образом, модуль Юнга E численно равен той силе, которая могла бы стержень с единичным сечением растянуть на величину, равную его первоначальной длине. Реальные твердые тела допускают удлинения только на несколько процентов от начальной длины, после чего наступает разрыв. Каждый материал при комнатной температуре имеет свое собственное значение модуля Юнга.

В данной работе, как это следует из формулы (1а), модуль Юнга вещества, из которого сделана проволока, определяется вычислением (математической обработкой) измеренных значений величин l , S , F и Δl .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

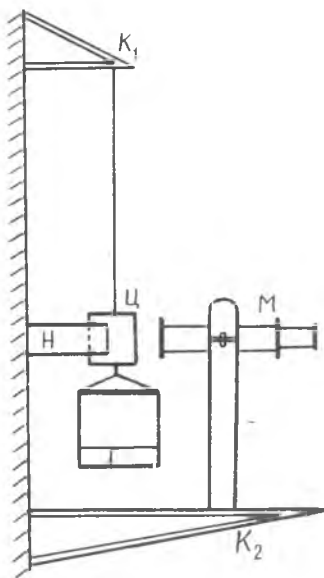


Рис. 2

На кронштейн K_1 (рис.2) укреплен конец проволоки, другой конец которой скреплен с грузом G , создающим ей натяжение. Проволока пропущена через ось цилиндра C и жестко скреплена с ним. Цилиндр C свободно проходит в отверстии направляющего кронштейна H . Этим устраняется боковая качка исследуемой проволоки. Боковая поверхность цилиндра C , слегка срезанная со стороны микроскопа M , имеет бумажную наклейку с черными и белыми полями. Горизонтальная четкая граница полей представляет собой линию, за перемещением которой наблюдают

в микроскоп при растяжении проволоки. На кронштейне K_2 крепится микроскоп M . Натягивающий груз Γ одновременно является площадкой, на которую устанавливают грузы, создающие растяжение проволоки. Набор этих грузов разных весов приложен к установке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В первую очередь производится настройка микроскопа - фокусировка его на собственную микрометрическую шкалу и на горизонтальную метку (границу раздела черного и белого полей) на исследуемой проволоке. Наблюдая в окуляр, передвигают трубу 1 относительно трубки 2 до появления четкого изображения делений микрометрической шкалы. После этого перемещают трубу 2 относительно трубки 3 до появления четкого изображения метки на проволоке.

Если окажется, что деления в микроскопе не параллельны метке на проволоке, то вращением трубки 2 добиваются этой параллельности.



Рис. 3

Измеряют микрометром диаметр проволоки в трех местах. Находят средний диаметр из трех измерений и вычисляют поперечное сечение в квадратных миллиметрах с точностью до второго десятичного знака.

Замечают и записывают, на каком делении шкалы микроскопа видна метка на проволоке, когда платформа Γ не нагружена. Ставят на платформу груз $P_1 = 0,5$ кг. В микроскопе будет видна граница полей смещенной вверх и совпадающей с другим делением шкалы. На самом же деле граница опустится вниз. При первом грузе P_1 определяют, на сколько интервалов между самыми мелкими делениями шкалы микроскопа сместилась метка на проволоке. Чтобы определить фактическое удлинение Δl_1 проволоки от груза P_1 необходимо число самых малых делений D_1 шкалы микроскопа, на которые сместилась метка проволоки, ум-

ножить на коэффициент К

$$\Delta l_1 = \kappa D_1.$$

Коэффициент К представляет собой число, обратное увеличению микроскопа, может быть различным в зависимости от длины тубуса микроскопа. Метка и соответствующая ей цифра на тубусе 2, граничащая с трубкой 3 и указывает длину тубуса. В таблице, приложенной к установке, приведены значения коэффициента К для различных длин тубуса.

Пример: $D_1 = 3$ деления. Длина тубуса $L = 140$ мм.
 $\kappa = 0,053$ мм/дел.

$$\Delta l = \kappa D = 0,053 \text{ мм/дел} \cdot 3 \text{ дел} = 0,159 \text{ мм}.$$

Величину груза P_1 и все измерения, связанные с ним, записывают в таблицу и вычисляют первое значение модуля Юнга E_1 .

Аналогичные измерения и вычисления выполняют для других четырех грузов P_2, P_3, P_4 и P_5 .

Примечание. После выполнения измерений с каждым из грузов, его снимают и проверяют на каком делении шкалы микроскопа находится метка на проволоке, когда платформа Г не нагружена.

Таблица измерений.

№ опыта	Груз $P,$ кг	Диаметр проволоки $d,$ мм	Сечение проволоки $S,$ мм ²	Деления в микро- scope $D,$ дел	Кoeffи- циент $\kappa,$ мм/дел	Удлине- ние $\Delta l = \kappa D,$ мм	Модуль $E,$ кг/мм ²
1							
2							
3							
4							
5							
Среднее значение модуля Юнга							$E_{\text{ср}}$

Определяют погрешности (ошибки) результатов измерения модуля Юнга.

Среднее значение модуля Юнга вычисляют в единицах системы СИ (в Н/м^2).

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Работа № 1	
Штангенциркуль, определение плотности тел	3
Работа № 2	
Микрометр и сферометр	9
Работа № 3	
Теодолит, измерение расстояния	17
Работа № 4	
Аналитические весы. Взвешивание тела с точностью до 0,1 мг.	25
Работа № 5	
Микрометр. Определение плотности вещества	39
Работа № 6	
Гидростатическое взвешивание	48
Работа № 7	
Катетометр. Определение плотности жидкости методом сообщающихся сосудов	58
Работа № 8	
Строботахометр. Определение скорости пули с помощью вращающихся дисков	66

Работа № 9	
Физический маятник. Измерение ускорения силы тяжести	72
Работа № 10	
Крутильный маятник. Измерение момента инерции	86
Работа № 11	
Трифилярный подвес. Измерение момента инерции	91
Работа № 12	
Крутильные колебания. Измерение момента инерции тела неправильной формы	96
Работа № 13	
Баллистический крутильный маятник. Измерение скорости полета пули	101
Работа № 14	
Маятник Обербека	107
Работа № 15	
Пружинный маятник. Изучение свободных колебаний...	110
Работа № 16	
Измерение скорости звука в металлическом стержне...	113
Работа № 17	
Определение модуля Юнга по изгибу	123
Работа № 18	
Модуль Юнга при растяжении	132

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

М Е Х А Н И К А.

Редактор - И.С.Колышева

Подписано в печать 17/II - 1967 г. Е000253. Формат 60 x 90^I/₁₆.
Объем 8³/₄ печ.л. Тираж 3000 экз. Заказ № 1685

Куйбышевский авиационный институт им.С.П.Королева,
г.Куйбышев, ул.Молодогвардейская, 151.

Ротаприцтный цех областной типографии им.Мяги, г.Куйбышев,
ул. Венцека, 60, Цена 40 коп.