Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ

Учебно-методическое пособие
для студентов физического
и других естественных факультетов

Под редакцией профессора *А. А. Игнатьева*

Саратов
Издательство Саратовского университета
2012

УДК 531 (076.5)
ББК 22.3я73
Ф50

Составители :
А. А. Игнатьев, В. А. Малярчук, Л. А. Романченко

Ф 50 **Физический практикум**. **Упругие деформации** : учеб.-метод. пособие для студентов физического и других естественных факультетов / сост. : А. А. Игнатьев, В. А. Малярчук, Л. А. Романченко ; под ред. проф. А. А. Игнатьева. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. – 24 с. : ил.
ISBN 978-5-292-04121-4

Учебно-методическое пособие посвящено изучению упругих деформаций в твердых телах. В пособии представлены краткая теория, описания лабораторных установок, методики проведения лабораторных работ и обработки результатов экспериментов, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Предлагаются различные методы экспериментального определения модулей упругих деформаций.

Для студентов физического и других естественных факультетов.

Рекомендуют к печати :

кафедра общей физики,
базовая кафедра физики критических
и специальных технологий
Саратовского государственного университета
доктор технических наук *А. В. Ляшенко*
(Саратовский государственный университет)

УДК 531 (076.5)
ББК 22.3я73

Работа издана в авторской редакции

ISBN 978-5-292-04121-4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗ РАСТЯЖЕНИЯ, СДВИГА, КРУЧЕНИЯ И ИЗГИБА

Все реальные тела под действием приложенных сил меняют свою форму или объем. Эти изменения называются деформациями. У твердых тел деформации бывают упругими и пластическими. Упругими называются деформации, исчезающие после прекращения действия силы; пластическими – деформации, полностью или частично остающиеся после прекращения действия силы. Деформации реальных тел всегда в какой-то мере пластические, но при достаточно малых остаточных деформациях ими пренебрегают, и деформацию считают упругой. Для изучения и описания этого явления рассматривают идеализированные тела, которые могут претерпевать только упругие деформации и поэтому называются *абсолютно упругими*. Для абсолютно упругих тел существует однозначная прямая зависимость между действующими силами и вызываемыми ими деформациями. Эта зависимость описывается законом Гука, согласно которому *упругие деформации пропорциональны вызывающим их силам.*

Любая деформация твердого тела сопровождается возникновением в нем сил упругости или внутренних напряжений. Напряжением в данной точке называется предел отношения сил упругости на бесконечно малой площадке к величине площадки:

$$\sigma = \frac{dF}{dS}.$$

Существуют различные виды деформаций: растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг. Все они могут быть сведены к двум основным: растяжению (сжатию) и сдвигу.

Продольное растяжение

Деформация растяжения возникает, например, если верхний конец стержня закреплен, а к нижнему подвешен груз, под действием которого стержень удлиняется. Предположим, что действие силы равномерно распределяется по сечению стержня. Тогда внутри стержня возникает напряжение

$$\sigma = \frac{F}{S}, \tag{1}$$

где F – деформирующая сила; S – площадь сечения стержня. Если сила перпендикулярна сечению, то напряжение называется нормальным напряжением или натяжением.

Пусть первоначальная длина стержня ℓ_0, приращение длины под действием силы $\Delta\ell$. Тогда отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \tag{2}$$

называется относительной деформацией или относительным удлинением.

Для относительной деформации и напряжения закон Гука имеет вид

$$\sigma = E\,\varepsilon \tag{3}$$

или с учетом (1) и (2)

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell_0}, \tag{4}$$

где коэффициент пропорциональности E называется модулем Юнга.

Из равенства (4) следует *физический смысл модуля Юнга*: модуль Юнга численно равен напряжению, которое надо приложить к стержню, чтобы его длина удвоилась ($\varepsilon = 1$), если при такой деформации не возникает необратимых изменений (закон Гука остается верным).

Если стержень не растягивается, а сжимается, то меняется только знак деформации, а величина ее при тех же условиях не меняется. При действии нескольких деформирующих сил различного знака деформация равна алгебраической сумме всех деформаций.

Сдвиг

Рассмотрим тело $ABCD$, закрепленное на плоскости (рис. 1).

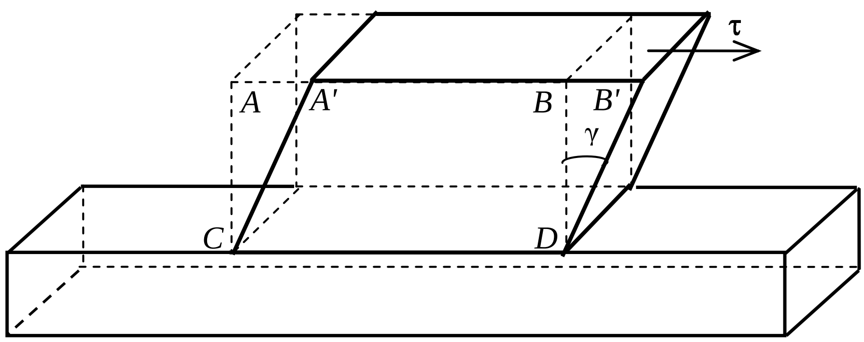

Рис. 1

Пусть на каждую единицу площади поверхности тела по касательной к поверхности действует сила $\boldsymbol{\tau}$ (касательное усилие), под действием которой слои тела сдвигаются друг относительно друга, причем величина сдвига тем больше, чем дальше отстоит слой от закрепленной поверхности тела. В результате каждая прямая, перпендикулярная к поверхности, повернется на некоторый угол γ (угол сдвига). При малых деформациях угол сдвига определится отношением:

$$\gamma = \frac{BB'}{BD},$$

т. е. угол γ характеризует относительную деформацию.

Закон Гука для деформации сдвига запишется в виде

$$\tau = G\gamma, \tag{5}$$

где G – модуль сдвига.

Из (5) следует

$$G = \frac{\tau}{\gamma}.$$

Физический смысл модуля сдвига: модуль сдвига численно равен касательному усилию, вызывающему такую деформацию сдвига, при которой любая прямая, проведенная перпендикулярно к поверхности, на которую действует сила, поворачивается на угол, равный единице.

Кручение

Если закрепить верхний конец стержня, а к нижнему приложить пару сил F в плоскости сечения, то любой радиус нижнего сечения повернется на некоторый угол φ – угол закручивания (рис. 2).

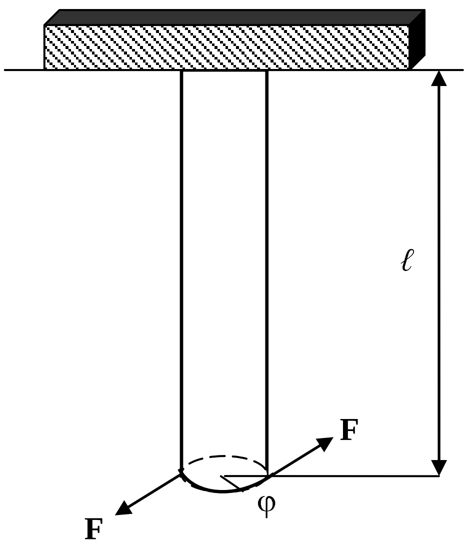

Рис. 2

Относительная деформация $\frac{\varphi}{\ell}$ представляет собой угол закручивания φ, приходящийся на единицу длины ℓ стержня. В пределах упругой деформации по закону Гука будет выполняться соотношение

$$M = f \cdot \varphi,$$

где M – закручивающий момент; f – модуль кручения.

Модуль кручения будет численно равен моменту сил, вызывающему поворот радиуса нижнего сечения на единичный угол, при длине стержня, равной единице.

В отличие от других модулей модуль кручения зависит не только от материала, но и от геометрических размеров проволоки.

Изгиб

Деформацию изгиба можно рассматривать на примере горизонтального стержня, один конец которого закреплен неподвижно, а к другому приложена некоторая деформирующая сила (рис. 3).

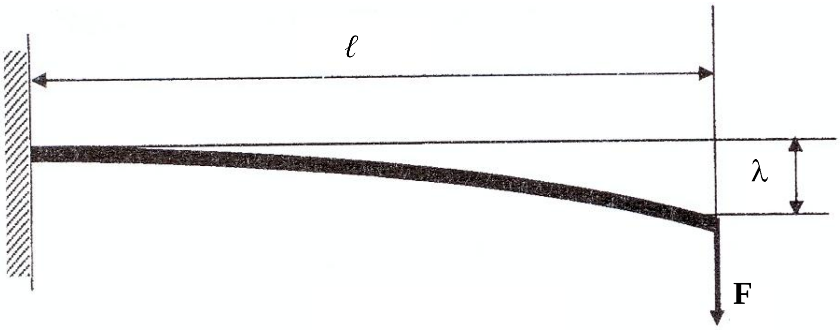

Рис. 3

Деформацию изгиба определяют стрелой прогиба λ, т. е. тем расстоянием, на которое опускается точка приложения равнодействующей всех изгибающих стержень сил. Деформацию изгиба представляет собой совокупность деформаций растяжения (для верхних слоев стержня) и сжатия (для его нижних слоев). Возможны и другие случаи деформации изгиба:

- стержень закреплен на концах, а сила приложена к его середине;
- стержень свободно лежит на опорах, сила приложена к середине.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ИЗ РАСТЯЖЕНИЯ

Оборудование

Установка, представленная на рис. 4, катетометр, микрометр, метровая металлическая линейка.

Описание установки

Установка представляет собой вертикальную штангу, висящую на стене, к которой прикреплены два кронштейна A и B (рис. 4).

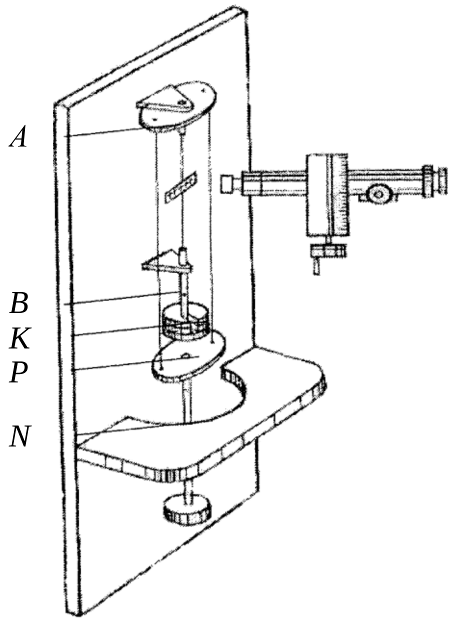

Рис. 4

Кронштейны расположены один над другим и служат для укрепления проволоки из исследуемого материала. При нагрузке, осуществляемой грузами P, проволока удлиняется, и указатель, прикрепленный к проволоке, перемещается вниз. Для точных измерений весьма небольших удлинений испытуемой проволоки служит измерительный микроскоп. Сущность его устройства заключается в том, что этот микроскоп в фокальной плоскости окуляра имеет шкалу, разбитую на сто делений (цена одного деления

0,05 мм). На испытуемой проволоке имеется указатель, представляющий собой пластинку, на передней стороне которой имеется тонкий штрих, служащий указателем нижнего конца испытуемой проволоки. На этом штрихе фиксируют горизонтальные отметки шкалы измерительного микроскопа.

Порядок выполнения работы

1. Измерить металлической линейкой длину проволоки от нижнего края верхнего цилиндра до черты указателя.

2. Измерить микрометром диаметр d проволоки. Измерение следует провести как минимум в 3-х местах. Вычислить среднее значение диаметра $d_{ср}$ и площадь сечения проволоки S.

3. Результаты измерений записать в табл. 1:

Таблица 1

№ Опыта	d, м	$d_{ср}$, м	ℓ, м	$S = \dfrac{\pi d_{ср}^2}{4}$, м^2	$\Delta\ell$, м	Δd, м
1						
2						
3						

Примечание. Δd и $\Delta\ell$ – максимальные абсолютные погрешности измерений, обусловленные неточностью измерительного прибора. Обычно эту погрешность принимают равной половине наименьшего значения деления шкалы измерительного прибора.

4. Определить на весах массу каждого груза.

5. Поместить все грузы на нижний стержень N (это делается для того, чтобы исключить погрешность, вносимую прогибом кронштейна A).

6. Переложить с нижнего на верхний стержень K два груза общим весом около 2 кг (эта нагрузка необходима для выпрямления проволоки и не принимается в расчет при измерении модуля упругости).

7. Установить указатель с горизонтальной чертой против объектива катетометра и настроить катетометр так, чтобы черта указателя была ясно видна. Вращая окуляр катетометра, совместить метку окуляра с чертой указателя.

8. Измерить с точностью до 0,01 мм цену деления окулярного микрометра при помощи нониуса и шкалы на стойке катетометра.

Пусть первый отсчет равен a. Подняв или опустив катетометр, сместить метку окуляра на 10 делений по отношению к черте указателя и снять отсчет b. Тогда цена одного деления шкалы окуляра определяется из соотношения

$$n = \frac{a - b}{10}.$$

Повторить измерение еще 2 раза и вычислить среднее значение $n_{ср}$. Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	a, мм	b, мм	n, мм/дел	$n_{ср}$, мм/дел
1				
2				
3				

9. Совместить метку окуляра с чертой указателя, затем переложить с нижнего стержня на верхний один груз и отсчитать, на сколько делений опустилась черта указателя (масса груза обозначена на его корпусе).

10. Переложить с нижнего на верхний стержень поочередно остальные грузы и измерить удлинение проволоки, вызываемое каждый раз суммарным грузом.

11. Построить график зависимости удлинения $\Delta\ell$ от нагрузки F и по графику убедиться, что деформация в исследуемой области является упругой.

12. Используя закон Гука (4), вычислить значение модуля по формуле:

$$E = \frac{l}{S} \cdot \frac{F \cdot \ell}{\Delta\ell}.$$

13. Результаты прямых измерений и вычислений занести в табл. 3.

Таблица 3

№ опыта	m, кг	F, Н	$\Delta\ell$, дел	$n_{ср}$, м/дел	$\Delta\ell$, м	ΔF, Н	$\Delta(\Delta\ell)$, м	E, Н/м^2	$E_{ср}$, Н/м^2	$\lvert\Delta E\rvert$, Н/м^2	$\lvert\Delta E_{ср}\rvert$, Н/м^2
1											
2											
3											

Примечание. ΔF – погрешность, допускаемая при взвешивании грузов, $\Delta(\Delta\ell)$ – при определении удлинения. Первая определяется точностью гирь и весов, вторую можно принять равной $n_{ср}/2$.

14. Подсчитать максимальную относительную погрешность метода измерений δ, обусловленную используемыми приборами.

$$\delta = \left(\frac{\Delta\ell}{\ell} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta(\Delta\ell)}{\Delta\ell} \right) \cdot 100\% ,$$

где $\frac{\Delta S}{S} = 2\frac{\Delta d}{d}$, а в качестве F и $\Delta\ell$ следует брать значения в средней части графика.

15. Определить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta E = \delta \cdot E_{ср}/100\%$$

и сравнить ее значение с величиной погрешности измерений $|\Delta E_{ср}|$.

16. Записать результат в виде: $E = E_{ср} \pm \Delta E$ и определить по таблице (см. Приложение) материал стержня.

Контрольные вопросы

1. Что происходит с кристаллической структурой твердого тела при упругой и пластической деформациях?
2. Назовите виды деформации.
3. Сформулируйте закон Гука для деформации растяжения.
4. Каков физический смысл модуля Юнга?
5. Объясните устройство катетометра.
6. Как размещаются грузы во время работы?
7. Как проверить, что все деформации соответствуют области упругости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ИЗ ИЗГИБА

Вывод рабочей формулы

Рассмотрим деформацию стержня произвольного сечения, один конец которого закреплен, а к другому приложена сила F. Длину стержня обозначим ℓ, поперечное сечение – S (см. рис. 3).

Сила F, действующая на свободный конец стержня, создает вращающий момент, под действием которого стержень стремится повернуться относительно горизонтальной оси. Но так как другой конец стержня закреплен, возникает сила реакции опоры, препятствующая повороту стержня. Стержень начнет изгибаться, причем верхние слои стержня будут растягиваться, а нижние – сжиматься. Всегда будет некоторый бесконечно тонкий слой, который не изменяет своей длины, так как он не испытывает напряжения. Этот слой называется нейтральным.

Представим себе, что стержень разделен на весьма тонкие пластинки системой плоскостей, перпендикулярных к его длине (рис. 5).

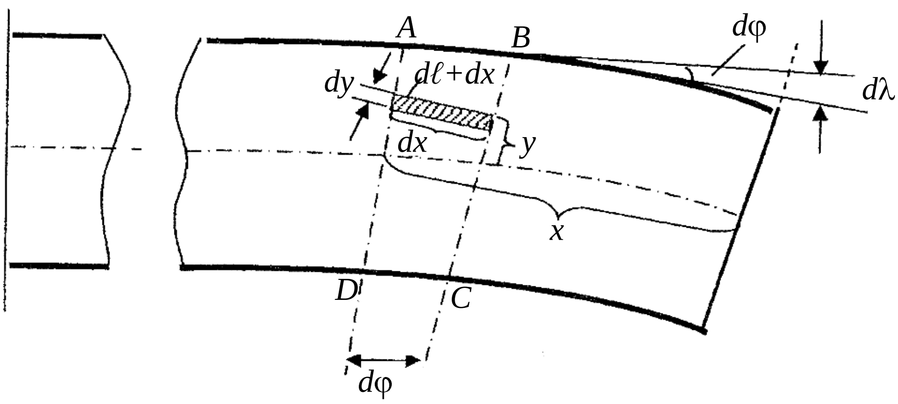

Рис. 5

В деформированном состоянии некоторая пластинка *ABCD***,** расположенная на расстоянии x от свободного конца стержня, изменит свою форму, так что ее стороны AD и BC образуют друг с другом некоторый малый угол $d\varphi$.

В точках верхнего слоя упругая реакция стержня вызывает силу, направленную к закрепленному концу стержня, а в точках нижнего слоя появляется такая же сила, направленная к свободному концу стержня. Такие пары сил возникают во всех слоях, симметричных нейтральному.

Пара упругих сил создает момент силы относительно горизонтальной оси, который компенсирует вращающий момент, созданный внешней силой F.

Каждый из внутренних моментов сил зависит от расположения того элемента стержня, к которому он приложен, поэтому суммарный момент вычисляется методами дифференциального исчисления.

В пластине *ABCD* (см. рис. 5) рассмотрим очень тонкий слой, параллельный нейтральному сечению и лежащий на расстоянии y от него. Ширина этого слоя dy, длина dx, поперечное сечение dS. Изгиб только этого слоя стержня приводит к возникновению стрелы прогиба $d\lambda$. Для нахождения $d\lambda$ проведем касательные к изогнутой поверхности стержня в точках A и B. Угол между ними равен углу между прямыми AD и BC, то есть $d\varphi$. Так как расстояние dx очень мало, то малы и величины $d\varphi$ и $d\lambda$, поэтому стрелу прогиба $d\lambda$ можно считать приблизительно равной длине дуги, лежащей против угла $d\varphi$ на расстоянии x от его вершины: $d\lambda = x\, d\varphi$.

Тогда удлинение рассматриваемого участка стержня

$$d\ell = y d\varphi = y\frac{d\lambda}{x},$$

относительное удлинение

$$\varepsilon = \frac{d\ell}{dx} = \frac{y}{x}\cdot\frac{d\ell}{dx}.$$

По закону Гука (4):

$$\frac{y}{x}\cdot\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{E}\cdot\frac{dF}{dS},$$

откуда

$$dF = E\cdot dS\cdot\frac{d\lambda}{x dx}y,$$

где E – модуль Юнга; dF – упругая сила, возникающая при удлинении слоя dx.

Так как плечо этой силы y, то момент dM упругих сил, возникающих в рассматриваемом участке сечения dS, запишем следующим образом:

$$dM = EdS\cdot\frac{d\lambda}{x dx}y^2. \qquad (6)$$

Для нахождения суммарного момента сил, возникающих во всем поперечном сечении S на участке длиной dx, выражение (6) следует проинтегрировать как по сечению выше нейтрального слоя, так и ниже него. При этом следует учесть, что $\int y^2 dS$ зависит от формы и размеров поперечного сечения стержня, но не зависит от его длины:

$$M = E\frac{d\lambda}{x dx}\int y^2 ds. \qquad (7)$$

Момент упругих сил, восстанавливающих форму стержня, равен моменту внешней силы F, изгибающей стержень. Если изгиб небольшой, то плечом силы F будет x – расстояние от AD до конца стержня. При значительном изгибе это плечо будет значительно короче.

Итак, условие равновесия запишется в виде:

$$F \cdot x = M,$$

где M определяется равенством (7).

Для определения полной стрелы прогиба полученное выражение следует еще раз проинтегрировать, теперь по длине стержня, то есть по dx.

В результате для стрелы прогиба стержня прямоугольного сечения, закрепленного одним концом, получим:

$$\lambda = \frac{4F\ell^3}{Eab^3},$$

где a и b – размеры сечения, причем b – размер стороны, параллельной приложенной силе (т. е. b определяет пределы изменения переменной y).

Если стержень свободно лежит на опорах, а сила приложена к середине стержня, то для стержня прямоугольного сечения

$$\lambda = \frac{F\ell^3}{4Eab^3}, \tag{8}$$

а в случае круглого сечения:

$$\lambda = \frac{F\ell^3}{12\pi ER^4}, \tag{9}$$

где R – радиус сечения стержня.

Оборудование

Установка (рис. 6), катетометр, линейка, штангенциркуль или микрометр, набор разновесов, набор грузов.

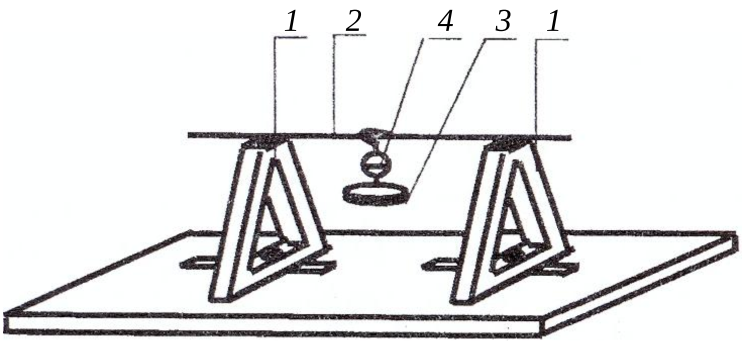

Рис. 6

Описание установки

На деревянных колодках *1* (рис. 6) установлены стальные призмы, на которых размещен стержень *2* из исследуемого материала. Для измерения стрелы прогиба в середине исследуемого стержня прикреплен подвес *3* для грузов, в верхней части которого имеется экран *4* с горизонтальной меткой.

Порядок выполнения работы

1. Измерить линейкой расстояние между стальными призмами установки..

2. Измерить штангенциркулем или микрометром диаметр d стержня и рассчитать значение его радиуса.

3. Вычислить значение постоянной величины $\dfrac{\ell^3}{12\pi R^4}$.

4. Результаты измерений и расчетов записать в табл. 4.

Таблица 4

№ опыта	ℓ, м	$\Delta\ell$, м	d, м	R, м	ΔR, м	$\dfrac{\ell^3}{12\pi R^4}$, м
1						
2						
3						

5. Установить объектив катетометра напротив экрана подвеса так, чтобы горизонтальная черта экрана была ясно видна. Вращая окуляр катетометра, совместить метки окуляра и экрана.

Измерить с точностью до 0,01 мм цену деления окулярного микрометра при помощи нониуса и шкалы на стойке катетометра. Пусть первый отсчет равен a. Подняв или опустив катетометр, сместить метку окуляра на 10 делений по отношению к черте на экране и снять отсчет b. Тогда цена одного деления шкалы окуляра n определится из соотношения $n = \dfrac{a-b}{10}$. Измерение провести не менее трех раз. Результаты записать в табл. 5.

Таблица 5

№ опыта	a, мм	b, мм	n, м/дел	$n_{ср}$, м/дел
1				
2				
3				

6. Измерить на технических весах массу каждого груза.

7. Совместить метки окуляра и экрана, поместить груз на подвес и измерить по шкале катетометра смещение черты подвеса, т. е. значение стрелы прогиба λ.

8. Поместить на подвес второй груз, не снимая первый, и измерить общее значение стрелы прогиба λ. Рассчитать суммарную нагрузку

$$F = mg,$$

где m – суммарная масса; g – ускорение свободного падения.

Записать результаты в табл. 6.

9. Повторить п. 8, добавляя каждый раз по одному грузу.

10. Построить график зависимости стрелы прогиба λ от нагрузки F и по графику убедиться в том, что деформация в исследуемой области является упругой.

11. Вычислить модуль Юнга по формулам (8) или (9). Результаты занести в табл. 6.

Таблица 6

<table>
<tr><th>№ опыта</th><th>m, кг</th><th>F, Н</th><th>ΔF, Н</th><th>λ, дел</th><th>λ, м</th><th>$\Delta\lambda$, м</th><th>E, Н/м^2</th><th>$E_{ср}$, Н/м^2</th><th>$|\Delta E|$, Н/м^2</th><th>$|\Delta E_{ср}|$, Н/м^2</th></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3"></td><td></td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3"></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

12. Относительную погрешность метода измерений рассчитать по формуле:

$$\delta = \left(\frac{\Delta F}{F} + 3\frac{\Delta \ell}{\ell} + 4\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) \cdot 100\% ,$$

где ΔF, $\Delta\ell$, ΔR и $\Delta\lambda$ определяются точностью измерительных приборов (0,5 наименьшего деления шкалы).

13. По полученному значению относительной погрешности метода δ найти абсолютную погрешность $\Delta E = \delta \cdot E_{ср}/100\%$, сравнить ее значение с величиной погрешности измерения $\Delta E_{ср}$ (табл. 6).

14. Результат записать в виде:

$$E = E_{ср} \pm \Delta E,$$

где ΔE – абсолютная погрешность метода измерений.

15. Определить материал стержня (см. Приложение), при этом найденное значение модуля Юнга с учетом абсолютной погрешности ΔE должно попадать в интервал табличных значений.

Контрольные вопросы

1. Что происходит с кристаллической структурой твердого тела при упругой и пластической деформациях?
2. Назовите виды деформации.
3. Сформулируйте закон Гука для деформации изгиба.
4. Каков физический смысл модуля Юнга?
5. Какие факторы ограничивают точность эксперимента?
6. Как проверить, что все деформации соответствуют области упругости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА ИЗ КРУЧЕНИЯ

Вывод рабочей формулы

Рассмотрим участок проволоки (рис. 7). Пусть отложенный вдоль одного из радиусов нижнего сечения отрезок $0A = \rho$.

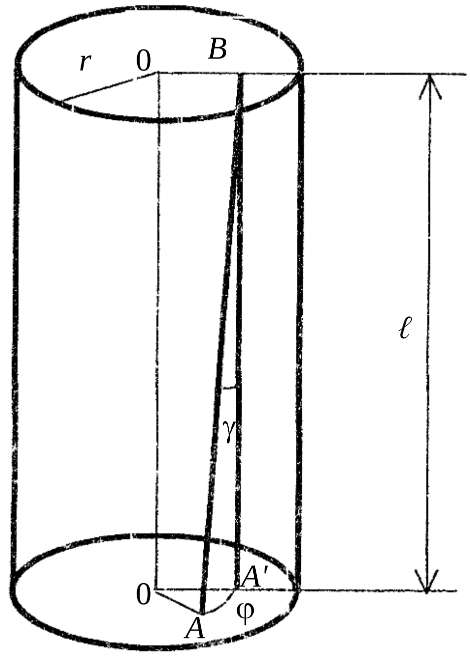

Рис. 7

Под влиянием закручивающего момента отрезок $0A$ повернется на угол φ и займет положение $0A'$. При закручивании стержня его нижний торец испытывает сдвиг относительно верхнего; прямая BA поворачивается, принимая положение BA', угол ABA', обозначенный γ (см. рис. 7), является углом сдвига.

Из рис. 7 следует:

$$AA' = \varphi\rho,$$

$$\gamma = \frac{AA'}{\ell} = \frac{\varphi\rho}{\ell},$$

откуда в соответствии с законом Гука (5):

$$\tau = G\gamma = G\frac{\varphi\rho}{\ell}. \qquad (10)$$

На рис. 8 изображен элемент поверхности dS нижнего сечения цилиндра, где τ – касательное усилие, приложенное к элементу dS.

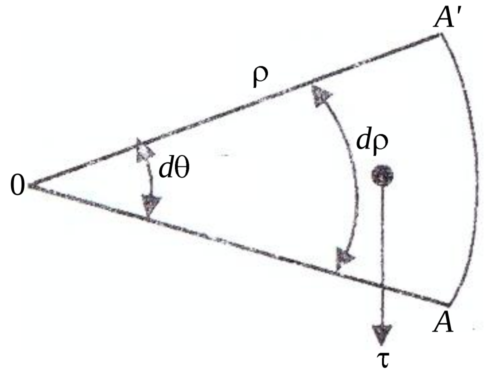

Рис. 8

Сила, приложенная к элементу поверхности dS, равна $\tau \cdot dS$, а ее момент

$$dM = \rho \cdot \tau \cdot dS = G\varphi\rho^2 dS. \tag{11}$$

Для подсчета суммарного момента внутренних сил, приложенных к нижнему торцу стержня при его повороте на угол φ, необходимо проинтегрировать выражение (11) по площади торца, радиус которого r. Опуская подробности, запишем результат интегрирования:

$$M = \frac{G\varphi}{\ell}\int_S \rho^2 dS = \frac{\pi d\varphi \cdot r^4}{2\ell}\ . \tag{12}$$

При выполнении работы вращающий момент внешних сил создается грузами, помещенными на кронштейны 5 (рис. 9):

$$M' = 2FR = FD. \tag{13}$$

где R – радиус, а D – диаметр шкива.

При равновесии модули моментов M и M' равны. Тогда, приравнивая правые части выражений (12) и (13), найдем модуль сдвига G:

$$G = \frac{2F\ell D}{\pi \cdot \varphi \cdot r^4}. \tag{14}$$

Оборудование

Установка (рис. 9), микрометр, штангенциркуль, метровая металлическая линейка, набор разновесов, набор грузов.

Описание установки

Установка состоит из укрепленного на кронштейне зажима *1*, несущего испытуемый цилиндр *2* в виде проволоки из того или иного материала (рис. 9).

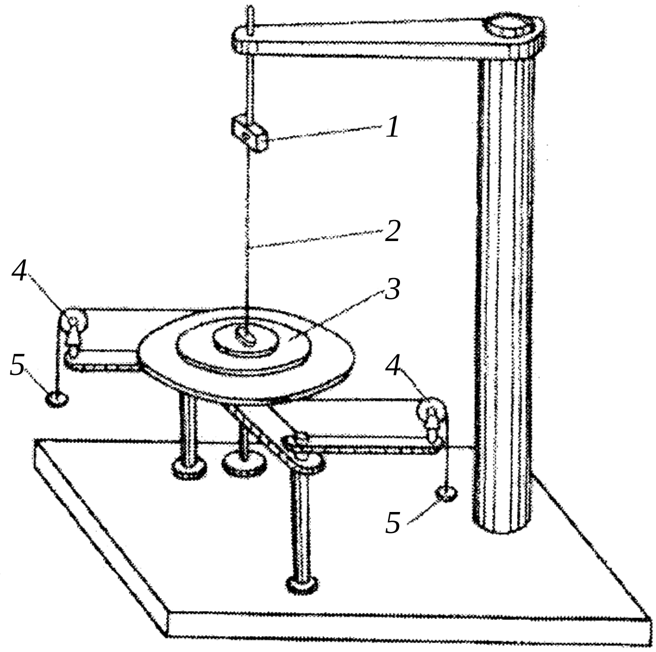

Рис. 9

На нижнем конце цилиндра закрепляется трехступенчатый шкив *3* с проточенными на его ступеньках канавками, служащими для помещения нитей, которые через блоки *4* нагружаются грузами *5*.

Грузы, навешиваемые на нити, создают вращающий момент, под действием которого шкив и жестко связанное с ним нижнее сечение стержня поворачиваются на некоторый угол.

Порядок выполнения работы

1. Измерить линейкой длину ℓ испытуемого стержня от верхнего до нижнего зажимов цилиндра.
2. Измерить микрометром диаметр d стержня в 3–4 местах и найти среднее значение его радиуса r.
3. Измерить штангенциркулем диаметры D шкивов, учитывая при этом глубину канавок.
4. Результаты измерений записать в табл. 7.

Таблица 7

№ опыта	r, м	Δr, м	ℓ, м	$\Delta\ell$, м	D, м			ΔD, м		
					I	II	III	I	II	III
1										
2										
3										

5. Взвесить грузы на технических весах.

6. Начать опыт с большого шкива *3*.

7. Пропустить нити по желобу шкива, перекинуть через блоки и установить указатель у нулевого деления круга, причем пластинка указателя продолжает радиус круга.

8. Поместить грузы на подвесы и отсчитать угол поворота шкива. Нити при этом должны быть направлены по касательной к окружности шкива, а плоскости блоков должны проходить через эти касательные.

9. Измерить общий угол поворота шкива под действием суммарного груза, увеличивая нагрузку на каждый из подвесов,

10. Повторить пп.7–9 со вторым и третьим шкивами.

11. Построить графики зависимости угла поворота шкива φ от нагрузки F для каждого шкива и убедиться, что исследуемая область находится в пределах упругой деформации.

12. Вычислить значение модуля сдвига по формуле (14).

13. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 8 (таблица заполняется для каждого шкива в отдельности).

Таблица 8

№ опыта	D, м	m, кг	F, Н	φ, град	φ, рад	G, Н/м^2	$G_{ср}$, Н/м^2	$\lvert\Delta G\rvert$, Н/м^2	$\lvert\Delta G_{ср}\rvert$, Н/м^2

14. Подсчитать максимальную относительную погрешность метода измерений по формуле:

$$\delta = \left(\frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta \varphi}{\varphi} + 4\frac{\Delta r}{r} \right) \cdot 100\% \,.$$

Здесь погрешности ΔF, $\Delta \ell$, ΔD, $\Delta\varphi$ и Δr определяются точностью соответствующих приборов (каждую из них можно считать равной 0,5 дел. шкалы измерительного прибора). Погрешность измерения радиуса увеличивается в четыре раза, поэтому измерять его следует особенно тщательно.

15. Определить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta G = \delta \cdot G_{ср}/100\%. \tag{15}$$

16. Сравнить абсолютную погрешность ΔG, определенную по формуле (15), и $\lvert\Delta G_{ср}\rvert$ (см. табл. 8). Сделать вывод о качестве измерений.

17. Записать результат в виде:

$$G = G_{ср} \pm \Delta G,$$

где ΔG – максимальное значение погрешности метода измерений.

18. Определить материал стержня (см. Приложение), при этом найденное значение модуля сдвига с учетом погрешности должно попадать в интервал табличных значений:

Контрольные вопросы

1. Что происходит с кристаллической структурой твердого тела при упругой и пластической деформациях?
2. Назовите виды деформации.
3. Сформулируйте закон Гука для деформации кручения и проведите вывод рабочей формулы.
4. Каков физический смысл понятий «модуль сдвига» и «модуль кручения»? Какая связь существует между этими величинами?
5. На каком шкиве установка работает с наибольшей чувствительностью?

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. *Сивухин Д. В*. Общий курс физики : учеб. пособие : в 5 т. Т. 1. Механика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 560 с.
2. Обработка результатов измерений в физическом практикуме : учеб.-метод. пособие для студентов физического и других естественных факультетов / сост. : В. А. Костяков, А. А. Игнатьев, Т. Н. Тихонова, А. В. Ляшенко ; под ред. проф. А. А. Игнатьева. 3-е изд., перераб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. 40 с.

Дополнительная литература

Савельев И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для втузов : в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2008. 432 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Упругие постоянные некоторых твердых тел

Вещество	Модуль Юнга $E{\cdot}10^{-9}$ Н/м^2	Модуль сдвига $G{\cdot}10^{-8}$ Н/м^2
Алюминий	62–74	22–26
Сталь	196–218	78–82
Латунь	78–98	26–36
Медь	98–127	38–47

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Учебное издание

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
Упругие деформации

Учебно-методическое пособие
для студентов физического
и других естественных факультетов

Составители :

Игнатьев Александр Анатольевич,
Малярчук Владимир Алексеевич,
Романченко Лариса Александровна

Под редакцией профессора *А. А. Игнатьева*

Технический редактор *В. В. Володина*
Корректор *Ю. И. Астахова*
Оригинал-макет подготовили *О. Г. Данке, Т. Н. Сиротинина*

Подписано в печать 05.06.2012. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 100. Заказ 25.

Издательство Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.
Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.