

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Методические указания
к практическим занятиям
по дисциплине
«Физика»

**«Определение модуля
сдвига стали с помощью
пружинного маятника»**

Авторы
Павлов А.Н.,
Чебанова Е.В.

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Указания содержат краткую теорию по теме «Определение модуля сдвига стали с помощью пружинного маятника», описание рабочей установки и методику эксперимента.

Предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину «Физика» для выполнения лабораторной работы по программе курса общей физики.

Авторы

д.ф.-м.н., профессор А.Н. Павлов,
к.ф.-м.н, доцент Е.В. Чебанова





Оглавление

Лабораторная работа №15 Определение модуля сдвига стали с помощью пружинного маятника	4
Контрольные вопросы и тесты	12
Указания по технике безопасности	17

Лабораторная работа №15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Цель работы: изучение сдвиговых упругих деформаций на примере пружинного маятника.

Приборы и принадлежности: универсальный штатив для крепления пружины с отсчетной линейкой, пружина, грузы (3 шт.), штангенциркуль, микрометр.

Краткая теория и описание методики измерения

Сдвигом называется такая деформация твердого тела, при которой все его плоские слои, параллельные некоторой неподвижной плоскости, называемой плоскостью сдвига, не искривляясь и не изменяясь в размерах, смещаются параллельно друг другу. При сдвиге объем деформируемого тела не меняется.

Если подействовать на элементарный объем упругого тела с одной зафиксированной поверхностью внешней тангенциальной силой $dF_{\text{вн}}$ (рис. 1), то возникает деформация dx и сила упругости dF :

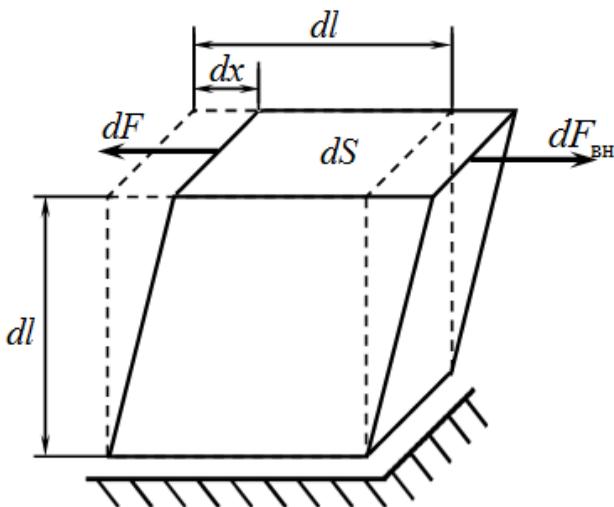


Рис. 1

$$dF = GdS \frac{dx}{dl} \quad (1),$$

где G – модуль сдвига,
 dS – площадь элементарной поверхности, вдоль которой действует сила $dF_{\text{вн}}$.

В данной работе определяется модуль сдвига материала (пружинной стали), из которого изготовлена винтовая пружина. На рис. 2 а, б изображена нижняя часть пружины, к которой приложена внешняя растягивающая сила $F_{\text{вн}}$, а также поперечное сечение проволоки пружины. Удлинение пружины при подвешивании груза происходит из-за скручивания проволоки пружины вокруг своей оси (стрелка T , рис. 2, а), связанного с деформациями сдвига в плоскости сечения проволоки пружины. Выделим в плоскости сечения проволоки элементарную площадку в виде кольца радиусом r и шириной dr . При упругих деформациях в плоскости сечения проволоки возникает упругая сила dF (рис. 2, б), определяемая формулой (1).

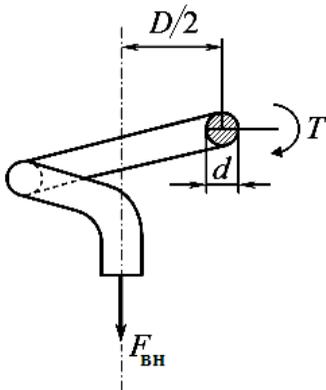


Рис. 2, а

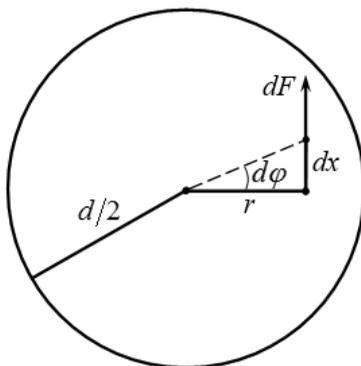


Рис. 2, б

В данном случае:

$$dS = 2\pi r dr. \quad (2)$$

Элементарное смещение участка кольца в плоскости сече-

ния под действием внешней тангенциальной силы: $dx = rd\varphi$,

где $d\varphi$ – элементарный угол поворота проволоки на элементе длины dl .

Подставив в формулу (1) выражения (2) и (3), получим соотношение для силы упругости dF , действующей в плоскости сечения проволоки:

$$dF = 2\pi r^2 dr G \frac{d\varphi}{dl}. \quad (4)$$

Учитывая соотношение (4), найдем элементарный момент dM упругих сил в плоскости сечения проволоки:

$$dM = rdF = 2\pi r^3 dr G \frac{d\varphi}{dl} \quad (5)$$

Тогда полный момент M упругих сил, который во всех сечениях проволоки является одинаковым, можно получить с помощью интегрирования выражения (5):

$$M = \int_0^{r_{\text{пр}}} 2\pi r^3 dr G \frac{d\varphi}{dl} = 2\pi G \frac{d\varphi}{dl} \int_0^{r_{\text{пр}}} r^3 dr = \frac{1}{2} \pi r_{\text{пр}}^4 G \frac{d\varphi}{dl}, \quad (6)$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус сечения проволоки.

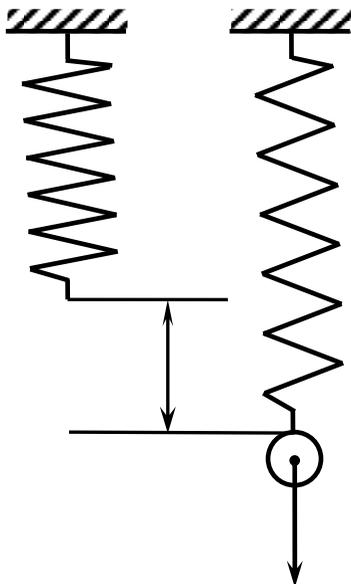
Момент M упругих сил в состоянии равновесия компенсируется моментом $M_{\text{вн}}$ внешних сил в плоскости сечения проволоки, который является везде одинаковым и равным:

$$M_{\text{вн}} = F_{\text{вн}} R, \quad (7)$$

где $F_{\text{вн}}$ – внешняя сила, растягивающая пружину,

$$F_{\text{вн}} = mg \quad (\text{рис. 3}),$$

R – радиус пружины.



$$F_{\text{вн}} = mg$$

Рис. 3

Приравнявая соотношения (6) и (7), получим:

$$F_{\text{вн}} R = \frac{1}{2} \pi r_{\text{пр}}^4 G \frac{d\varphi}{dl} \quad (8)$$

Умножим обе части выражения (8) на dl :

$$F_{\text{вн}} R dl = \frac{1}{2} \pi r_{\text{пр}}^4 G d\varphi \quad (9)$$

Элементарное удлинение dy пружины вследствие элементарного угла поворота $d\varphi$ определяется соотношением:

$$dy = R d\varphi .$$

Тогда

$$d\varphi = \frac{1}{R} dy . \quad (10)$$

Подставим выражение (10) в (9) и получим:

$$F_{\text{вн}} R dl = \frac{1}{2} \pi r_{\text{пр}}^4 G \frac{1}{R} dy. \quad (11)$$

Проинтегрируем левую и правую части выражения (11) по всей длине l проволоки и полному удлинению y пружины, соответственно:

$$F_{\text{вн}} R l = \frac{1}{2} \pi r_{\text{пр}}^4 G \frac{1}{R} y,$$

где $l = 2\pi R n$ (n – число витков пружины).

Следовательно, $4F_{\text{вн}} R^3 n = r_{\text{пр}}^4 G y$.

Откуда модуль сдвига G материала пружины:

$$G = \frac{4F_{\text{вн}} R^3 n}{y r_{\text{пр}}^4}.$$

Учитывая, что радиус проволоки $r_{\text{пр}} = \frac{d}{2}$ (d – диаметр проволоки),

радиус пружины $R = \frac{D}{2}$ (D – диаметр пружины),

получим:
$$G = \frac{8F_{\text{вн}} D^3 n}{y d^4}. \quad (12)$$

Подставляя в соотношение (12) величину внешней силы, растягивающей пружину в состоянии равновесия $F_{\text{вн}} = mg$, получим расчетную формулу для вычисления модуля сдвига G материала пружины:

$$G = \frac{8mgD^3 n}{y d^4}. \quad (13)$$

Таким образом, для определения модуля сдвига G материала исследуемой пружины (пружинной стали) необходимо провести измерения числа витков n пружины, диаметра d проволоки,

диаметра D пружины, а также определить удлинение y пружины под действием неподвижно висящего груза массой m .

Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицы для результатов измерений и вычислений (табл. 1, 2):

Таблица 1

n	D , м	ΔD , м	δD	d , м	Δd , м	δd	$\langle y \rangle$, м	Δy , м	δy

Таблица 2

№	m , кг	y , м	G , $\frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	$\langle G \rangle$, $\frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	δG	$\frac{\Delta G}{\text{М}^2}$
1	0,1					
2	0,2					
3	0,3					

2. Определите число витков n пружины. Занесите значение n в табл. 1.

3. Штангенциркулем измерьте диаметр D пружины. Занесите значение D в табл. 1.

4. Микрометром измерьте диаметр d проволоки. Занесите значение d в табл. 1.

5. Подвесьте к пружине груз массой $m_1 = 0,1$ кг и линейкой определите статическое удлинение y_1 пружины. Проделайте то же самое, подвешивая последовательно дополнительные грузы так, чтобы общая масса груза была равна $m_2 = 0,2$

кг и $m_3 = 0,3$ кг. Результаты измерений y_1, y_2, y_3 занесите в табл. 2.

6. Найдите среднее значение статического удлинения пружины $\langle y \rangle$ как среднее арифметическое значение трех последовательных измерений:

$$\langle y \rangle = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}.$$

Результат вычислений $\langle y \rangle$ занесите в табл. 1.

7. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности измерения диаметра D пружины, диаметра d проволоки и статического удлинения y пружины. Абсолютные погрешности $\Delta D, \Delta d$ и Δy примите равными половине цены наименьшего деления измерительного инструмента (штангенциркуля, микрометра и линейки, соответственно): $\Delta D = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $\Delta d = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $\Delta y = 5 \cdot 10^{-4}$ м. Относительные погрешности $\delta D, \delta d$ и δy определите по формулам:

$$\delta D = \frac{\Delta D}{D}, \quad \delta d = \frac{\Delta d}{d}, \quad \delta y = \frac{\Delta y}{y}$$

и занесите значения $\Delta D, \Delta d, \Delta y, \delta D, \delta d, \delta y$ в табл. 1.

8. По найденным значениям y_1, y_2, y_3 удлинения пружины под действием неподвижно висящего груза массой m_1, m_2, m_3 вычислите в каждом из трех опытов соответствующие значения G_1, G_2, G_3 модуля сдвига материала

пружины, используя формулу:
$$G = \frac{8mgD^3n}{yd^4}.$$

Результаты вычислений запишите в табл. 2.

9. Вычислите среднее значение модуля сдвига материала, из которого изготовлена пружина, по формуле:

$$\langle G \rangle = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3}.$$

Полученное значение $\langle G \rangle$ занесите в табл. 2.

10. Вычислите относительную погрешность экспериментального определения модуля сдвига материала пружины:

$$\delta G = \delta y + 3\delta D + 4\delta d.$$

Результат вычисления δG запишите в табл. 2.

11. Найдите абсолютную погрешность определения модуля сдвига материала пружины:

$$\Delta G = \delta G \langle G \rangle.$$

Полученное значение ΔG занесите в табл. 2.

12. Окончательный результат запишите в виде:

$$G = \langle G \rangle \pm \Delta G.$$

Контрольные вопросы и тесты

1. Дайте определения упругой и пластической деформации тел.
2. Перечислите виды деформации тел по характеру изменения формы тела. Дайте определение деформации сдвига.
3. Дайте определения механического напряжения и двух его видов – нормального и тангенциального напряжений. Напишите формулы для величин нормального и тангенциального напряжений.
4. Перечислите модули упругости. Охарактеризуйте модуль сдвига материала.
5. Сформулируйте и запишите закон Гука для деформации растяжения (сжатия).
6. Сформулируйте и запишите закон Гука для деформации сдвига.
7. Сформулируйте и запишите закон Гука для деформации кручения.
8. Дайте определение пружинного маятника. Сформулируйте и запишите закон Гука для упруго деформированной пружины.
9. Выберите правильный вариант ответа в следующих тестовых заданиях:

ЗАДАНИЕ № 1

Деформация твёрдого тела всегда сопровождается изменением ...

- A. Положения его элементов друг относительно друга.
- B. Его формы.
- C. Его объёма.
- D. Положения его элементов в пространстве.

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) A и D ;
- 2) Только A ;
- 3) B и C ;
- 4) A и B ;
- 5) A, B и C ;
- 6) Только D .

ЗАДАНИЕ № 2

Относительное изменение длины тела – это ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) изменение длины одного тела относительно другого те-

ла;

- 2) просто изменение длины тела;
- 3) отношение длины деформированного тела к его длине в недеформированном состоянии;
- 4) отношение длины недеформированного тела к его длине в деформированном состоянии;
- 5) отношение абсолютного изменения длины к длине недеформированного тела;
- 6) отношение абсолютного изменения длины к длине деформированного тела.

ЗАДАНИЕ № 3

Нормальное напряжение – это ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) отношение силы, действующей на тело, к площади параллельной ей поверхности, по которой распределена эта сила;
- 2) напряжение, при котором наступает разрушение тела;
- 3) сила, приложенная перпендикулярно к поверхности тела;
- 4) сила, приложенная вдоль поверхности тела;
- 5) отношение силы, действующей на тело, к площади перпендикулярной ей поверхности, по которой распределена эта сила;
- 6) сила, сообщающая телу нормальное ускорение.

ЗАДАНИЕ № 4

Нормальное напряжение измеряется в ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) Н ;
- 2) $\text{Н} \cdot \text{м}^2$;
- 3) $\frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$;
- 4) $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$;
- 5) $\frac{\text{Н}^2}{\text{м}}$;
- 6) $\frac{\text{м}}{\text{Н}}$.

ЗАДАНИЕ № 5

Тангенциальное напряжение – это ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) отношение силы, действующей на тело, к площади параллельной ей поверхности, по которой распределена эта сила;
- 2) напряжение, при котором наступает разрушение тела;
- 3) сила, приложенная перпендикулярно к поверхности тела;
- 4) сила, приложенная вдоль поверхности тела;
- 5) отношение силы, действующей на тело, к площади перпендикулярной ей поверхности, по которой распределена эта сила;
- 6) сила, сообщающая телу тангенциальное ускорение.

ЗАДАНИЕ № 6

Тангенциальное напряжение измеряется в ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) Н ;
- 2) $\text{Н} \cdot \text{м}^2$;
- 3) $\frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$;
- 4) $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$;
- 5) $\frac{\text{Н}^2}{\text{м}}$;
- 6) $\frac{\text{м}}{\text{Н}}$.

ЗАДАНИЕ № 7

Модуль Юнга – это коэффициент пропорциональности между

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) тангенциальным напряжением и тангенсом угла сдвиговой деформации тела;
- 2) тангенциальным напряжением и относительной деформацией тела;
- 3) нормальным напряжением и тангенсом угла сдвиговой деформации.
- 4) приложенной силой и деформацией тела.
- 5) приложенной силой и тангенциальным напряжением;
- 6) нормальным напряжением и относительной деформацией

тела.

ЗАДАНИЕ № 8

Модуль Юнга зависит от...

- A.* Приложенной силы.
- B.* Формы тела.
- C.* Объёма тела.
- D.* Природы тела.
- E.* Параметров состояния тела (температура, давление).

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) *A* и *D*;
- 2) Только *A*;
- 3) *B* и *C*;
- 4) *A*, *C* и *E*;
- 5) *D* и *E*;
- 6) только *E*.

ЗАДАНИЕ № 9

Характеристикой сдвиговой деформации является ...

- A.* Относительная деформация.
- C.* Модуль сдвига.
- B.* Тангенциальное напряжение.
- D.* Тангенс угла сдвига.

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) *A* и *C*;
- 2) Только *A*;
- 3) *B* и *D*;
- 4) *A* и *B*;
- 5) *A*, *B* и *C*;
- 6) Только *D*.

ЗАДАНИЕ № 10

Модуль сдвига – это коэффициент пропорциональности между ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) нормальным напряжением и относительной деформацией тела;
- 2) тангенциальным напряжением и тангенсом угла сдвига;
- 3) приложенной силой и относительной деформацией тела;
- 4) тангенциальным напряжением и относительной деформацией тела;
- 5) нормальным напряжением и тангенсом угла сдвига;

б) приложенной силой и тангенциальным напряжением.

ЗАДАНИЕ № 11

Модуль сдвига зависит от...

- A. Приложенной силы.
- B. Формы тела.
- C. Объёма тела.
- D. Природы тела.
- E. Параметров состояния тела (температура, давление).

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) A и D ;
- 2) Только A ;
- 3) B и C ;
- 4) A, C и E ;
- 5) D и E ;
- 6) только E .

ЗАДАНИЕ № 12

Под действием силы 10 Н пружина жёсткостью $200 \frac{\text{Н}}{\text{М}}$ со-
кращается на ... см.

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) 10 ;
- 2) 20 ;
- 3) 5 ;
- 4) 2 ;
- 5) 15 ;
- 6) 25 .

ЗАДАНИЕ № 13

К металлическому стержню с площадью сечения 1 см² приложена растягивающая сила 10⁴ Н. Модуль Юнга материала стержня составляет $5 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$. Относительное удлинение стержня (в %) составит ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) 0,5 ;
- 2) 0,2 ;
- 3) 5 ;
- 4) 2 ;
- 5) 1,25 ;
- 6) 20 .

ЗАДАНИЕ № 14

Нормальное напряжение, создаваемое силой 20 Н, приложенной перпендикулярно поверхности площадью 5 см^2 , равно

$$\left(\text{В } \frac{\text{Н}}{\text{М}^2} \right) \dots$$

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) 10^2 ;
- 2) 4 ;
- 3) $4 \cdot 10^4$;
- 4) 100 ;
- 5) $25 \cdot 10^2$;
- 6) 10 .

ЗАДАНИЕ № 15

На резиновую прокладку толщиной 2 см действует сдвигающее напряжение $5 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$. Модуль сдвига резины $2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$.

При этом смещение плоскостей прокладки (в мм) составляет ...

ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:

- 1) 1,2 ;
- 2) 0,4 ;
- 3) 1 ;
- 4) 2 ;
- 5) 4 ;
- 6) 2,5 .

Указания по технике безопасности

1. **Внимание!** Лица, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к проведению лабораторной работы не допускаются.

Запрещается:

2. При работе с механическими установками будьте внимательны и находитесь от движущихся частей на безопасном расстоянии.

3. Не останавливайте руками вращающиеся и движущиеся части установок.

4. При обнаружении неисправного оборудования немедленно

ленно сообщайте об этом лаборанту или преподавателю. На неисправном оборудовании работать запрещается.