

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра основ конструирования машин**

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Выполнение лабораторных работ

Методические указания для студентов
всех форм обучения по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составитель
П. В. Кауров

Санкт-Петербург
2024

Утверждено
на заседании кафедры ОКМ
28.11.2023 г., протокол № 4

Рецензент А. Н. Евдокимов

Методические указания соответствуют программе и учебному плану дисциплины «Сопротивление материалов» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

Методические указания составлены в соответствии с лекциями по указанной дисциплине и охватывают следующие разделы: «Продольная деформация», «Кручение» и «Изгиб». Выполнение лабораторных работ, представленных в методических указаниях, способствуют формированию умений и навыков по определению основных параметров при расчетах стержней на прочность и жесткость, экспериментальном исследовании основных характеристик материалов.

Методические указания по выполнению лабораторных работ предназначены для бакалавров всех форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 24.09.2024 г. Рег.№ 5330/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Определение модуля нормальной упругости при растяжении	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Определение модуля нормальной упругости при сжатии	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Определение модуля сдвига при кручении.....	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Определение перемещений в балке при чистом изгибе	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Определение перемещений в балке при поперечном изгибе	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Определение перемещений при изгибе консольной балки	23
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	26

ПРЕДИСЛОВИЕ

В методических указаниях изложена методика проведения лабораторных работ по сопротивлению материалов путем деформирования стержней при статических нагрузках.

В науке о сопротивлении материалов используются экспериментальные и теоретические методы исследования изучаемых явлений, где базой является эксперимент. Поэтому изучающим дисциплину «Сопротивления материалов» необходимо освоить методику основных опытов, производимых в лаборатории.

Лабораторные работы способствуют усвоению основ предмета в наглядной и запоминающейся форме, знакомят студентов с важнейшими механическими свойствами материалов, учат постановке и проведению экспериментов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение модуля нормальной упругости при растяжении

Цель работы: экспериментальное определение модуля нормальной (продольной) упругости при растяжении.

Краткие теоретические сведения

Модуль нормальной (продольной) упругости E – константа, характеризующая жесткость материала при линейной деформации [1, 2]. В определенных пределах деформаций, зависящих от свойств материалов, между относительной продольной деформацией ε и соответствующим нормальным напряжением σ , существует прямо пропорциональная зависимость (закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon .$$

Для стержня длиной L относительная продольная деформация ε будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} ,$$

где ΔL – абсолютная продольная деформация.

Для стержня с площадью поперечного сечения A нормальное напряжение σ будет равно:

$$\sigma = \frac{F}{A} ,$$

где F – величина продольной силы.

Тогда модуль продольной упругости E можно найти, как тангенс угла наклона зависимости σ (ε), то есть по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} .$$

Оборудование и принадлежности

Для выполнения лабораторной работы необходимы: универсальный испытательный комплекс КСИМ-40 (рис. 1); испытуемый образец; штангенциркуль.

В универсальный испытательный комплекс КСИМ-40 входят: нагрузочное устройство **1** с приводом, датчиками усилия и перемещения

верхней траверсы; блок управления **2** и ПЭВМ **3**.

Управление работой комплекса и связь с ПЭВМ производится с помощью блока управления (рис. 2).

На передней панели блока размещены следующие кнопки управления и символьной индикации:

- двухстрочный символьный индикатор:
в верхней строке – ПЕРЕМЕЩЕНИЕ траверсы (мм) и СКОРОСТЬ перемещения траверсы (мм/мин);
- в нижней – текущее усилие $F_{\text{тек}}$ и предельное $F_{\text{пред}}$, (кН);
- кнопки СКОРОСТЬ «+» и «-» для установки необходимой скорости перемещения верхней траверсы (захвата);
- кнопка ПЕРЕМЕЩЕНИЕ «СБРОС» для установки нулевого значения перемещения в начале опыта;
- кнопки $F_{\text{пред}}$ «+» и «-» для установки предельного усилия при проведении испытания.

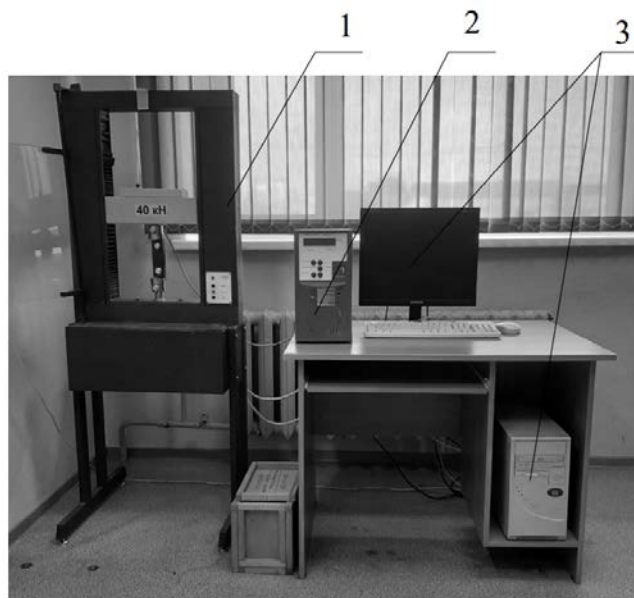


Рисунок 1 – Общий вид комплекса КСИМ-40:

1 – нагрузочное устройство; 2 – блок управления; 3 – ПЭВМ



Рисунок 2 – Панель блока управления

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы испытательной машины КСИМ-40.
2. Получить образец из стали 3 для исследования (рис. 3).
3. Произвести обмер образца с помощью штангенциркуля.
4. По результатам испытаний построить график зависимости нормального напряжения σ от относительной продольной деформации ε , по которому определить модуль продольной упругости E при растяжении.

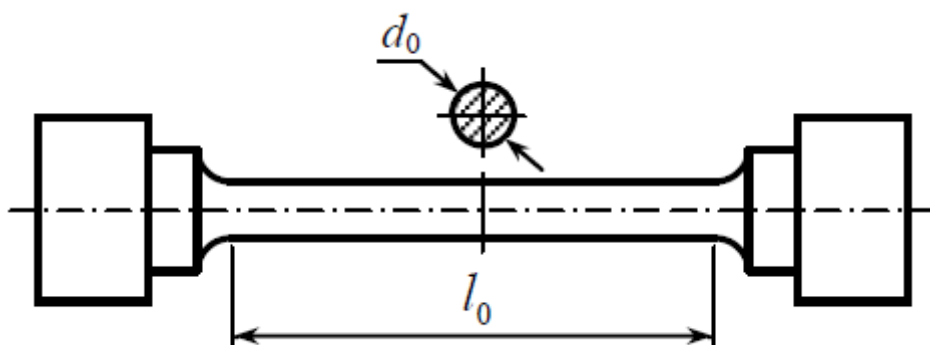


Рисунок 3 – Образец для исследования

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 1).

Таблица 1

ΔL , мм	F , Н	ε , %	σ , МПа	E , МПа

Контрольные вопросы

1. Что называется растяжением образца?
2. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях образца при растяжении?
3. Какие деформации возникают в поперечных сечениях образца при растяжении?
4. Как определяется величина напряжения при растяжении?
5. Что такое относительная продольная деформация?
6. Как определяется модуль продольной упругости при растяжении?
7. Какое влияние оказывает изменение площади поперечного сечения образца на величину относительной продольной деформации?
8. Как производится испытание образца на растяжение?
9. Какое влияние оказывает изменение модуля продольной упругости образца на величину относительной продольной деформации?
10. Какое влияние оказывает изменение продольной силы на величину напряжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение модуля нормальной упругости при сжатии

Цель работы: экспериментальное определение модуля нормальной (продольной) упругости при сжатии.

Краткие теоретические сведения

При достаточно коротких образцах сжатие от растяжения отличается только знаком нормального напряжения. При сжатии образца из пластичного материала (стали), как и при растяжении, сначала имеет место линейная зависимость нормального напряжения σ от относительной продольной деформации ε , затем – площадка текучести и зона упрочнения. Но, в отличие от растяжения, площадка текучести едва намечается, и далее нагрузка возрастает до самого разрушения. Последнее объясняется тем, что при сжатии значительно увеличивается поперечное сечение – образец сплющивается в тонкий диск, в связи с чем предела прочности на сжатие для пластичных материалов не существует. Для пластичных материалов характерно малое отличие пределов текучести при растяжении и сжатии, такие материалы называются одинаково работающими на растяжение и сжатие.

Оборудование и принадлежности

Для выполнения лабораторной работы необходимы: универсальный испытательный комплекс КСИМ-40 (рис. 1); испытуемый образец; штангенциркуль.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы испытательной машины КСИМ-40.
2. Получить стальной образец для исследования (рис. 4).
3. Произвести обмер образца с помощью штангенциркуля.
4. По результатам испытаний построить график зависимости нормального напряжения σ от относительной продольной деформации ε , по которому определить модуль продольной упругости E при сжатии.

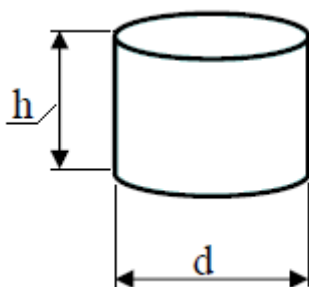


Рисунок 4 – Образец для исследования

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 2).

Таблица 2

ΔL , мм	F , Н	ε , %	σ , МПа	E , МПа

Контрольные вопросы

1. Что называется сжатием образца?
2. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях образца при сжатии?
3. Какие деформации возникают в поперечных сечениях образца при сжатии?
4. Что такое модуль продольной упругости?
5. Как определяется величина напряжения при сжатии?
6. Какое влияние оказывает изменение длины образца на величину относительной продольной деформации?
7. Как определяется модуль продольной упругости при сжатии?
8. Какое влияние оказывает изменение продольной силы на величину относительной продольной деформации?
9. Как производится испытание образца на сжатие?
10. Какое влияние оказывает изменение площади поперечного сечения образца на величину напряжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение модуля сдвига при кручении

Цель работы: экспериментальное определение величины модуля сдвига при кручении и сопоставление с теоретическими значениями.

Краткие теоретические сведения

При кручении круглого сплошного или кольцевого стержня в пределах упругих деформаций угол закручивания φ связан с крутящим моментом M_K следующей зависимостью:

$$\varphi = \frac{M_K \cdot L}{G \cdot I_P},$$

где L – длина участка стержня, m ;

I_P – полярный момент инерции сечения, $см^4$;

G – модуль сдвига (модуль упругости второго рода), $МПа$.

Отсюда

$$G = \frac{M_K \cdot L}{\varphi \cdot I_P}.$$

На практике модули сдвига определяют по приращению взаимного угла поворота сечений $\Delta\varphi$ на участке стержня длиной L , вызванного действием крутящего момента ΔM_K , величина которого соответствует

$$\Delta M_K = \Delta F \cdot a,$$

где ΔF – степень приращения силы;

a – плечо рычага **3** (рис. 5).

Таким образом:

$$G = \frac{\Delta F \cdot a \cdot L}{\varphi \cdot I_P}.$$

Оборудование и принадлежности

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5 и рис. 6. Конец стального стержня кольцевого сечения **1** закреплен в стойке **2**.

Внутренний диаметр $d = 16$ мм, наружный диаметр $D = 20$ мм. К свободному концу образца прикреплен рычаг 3. Длина рычага $a = 0,2$ м. Нагружение образца крутящим моментом осуществляется грузом 4.

На образце 9 расположены два установочных кольца 5 и 6, расстояние между которыми (база механического угломера) $L = 80$ мм. При кручении одно кольцо поворачивается относительно другого, вследствие чего планка, жестко закрепленная на кольце 5, переместит шток индикатора 7, установленного на втором кольце 6.

Перемещение стрелки индикатора пропорционально углу закручивания образца. Для определения угла закручивания $\Delta\varphi$ необходимо разность показаний индикатора Δn умножить на цену деления индикатора $\alpha = 0,01$ мм и разделить на базу угломера L .

Таким образом:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n \cdot \alpha}{L}.$$

Порядок проведения испытаний

1. Произвести предварительное нагружение образца для устранения зазоров в системе силой $F = 10$ Н.

2. Снять показания индикатора 7.

3. Последовательно нагрузить образец силами 20 Н, 30 Н, 40 Н.

4. На каждом уровне нагружения снять показания индикатора угломера.

5. Подсчитать среднюю разность показаний индикатора угломера Δn , соответствующую приращению силы $\Delta F = 10$ Н.

6. Вычислить угол закручивания, соответствующий приращению силы $\Delta F = 10$ Н по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n \cdot \alpha}{L},$$

где L – база механического угломера или длина вылета кронштейна крепления индикаторной головки, $L = 80$ мм.

7. Вычислить модуль сдвига G и подсчитать процент расхождения по формуле:

$$\Delta G = 100\% \frac{G_{\text{эксп}} - G_{\text{расч}}}{G_{\text{эксп}}}.$$

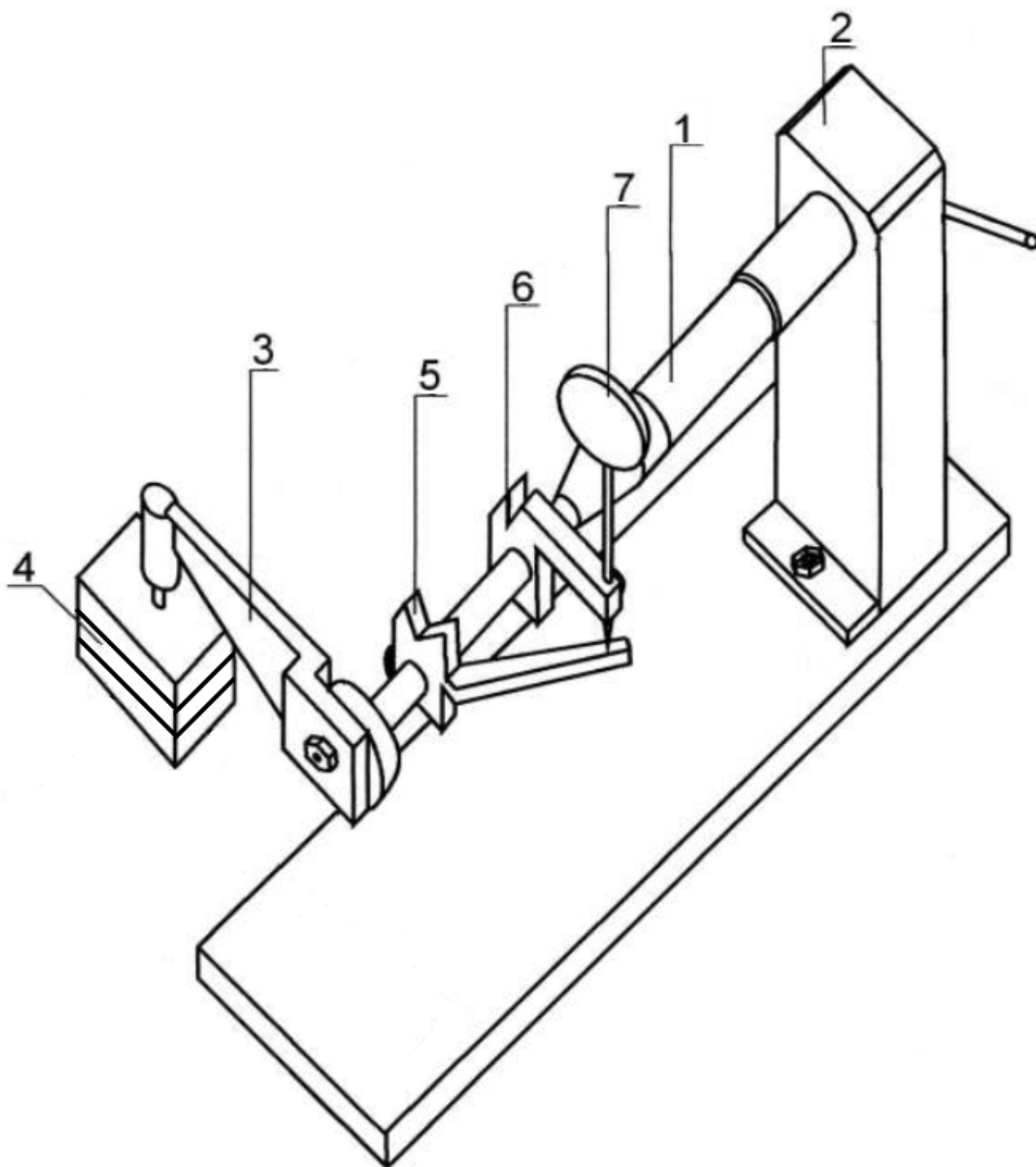


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:
1 – стержень; 2 – стойка; 3 – рычаг; 4 – грузы; 5, 6 – кольца; 7 – индикатор

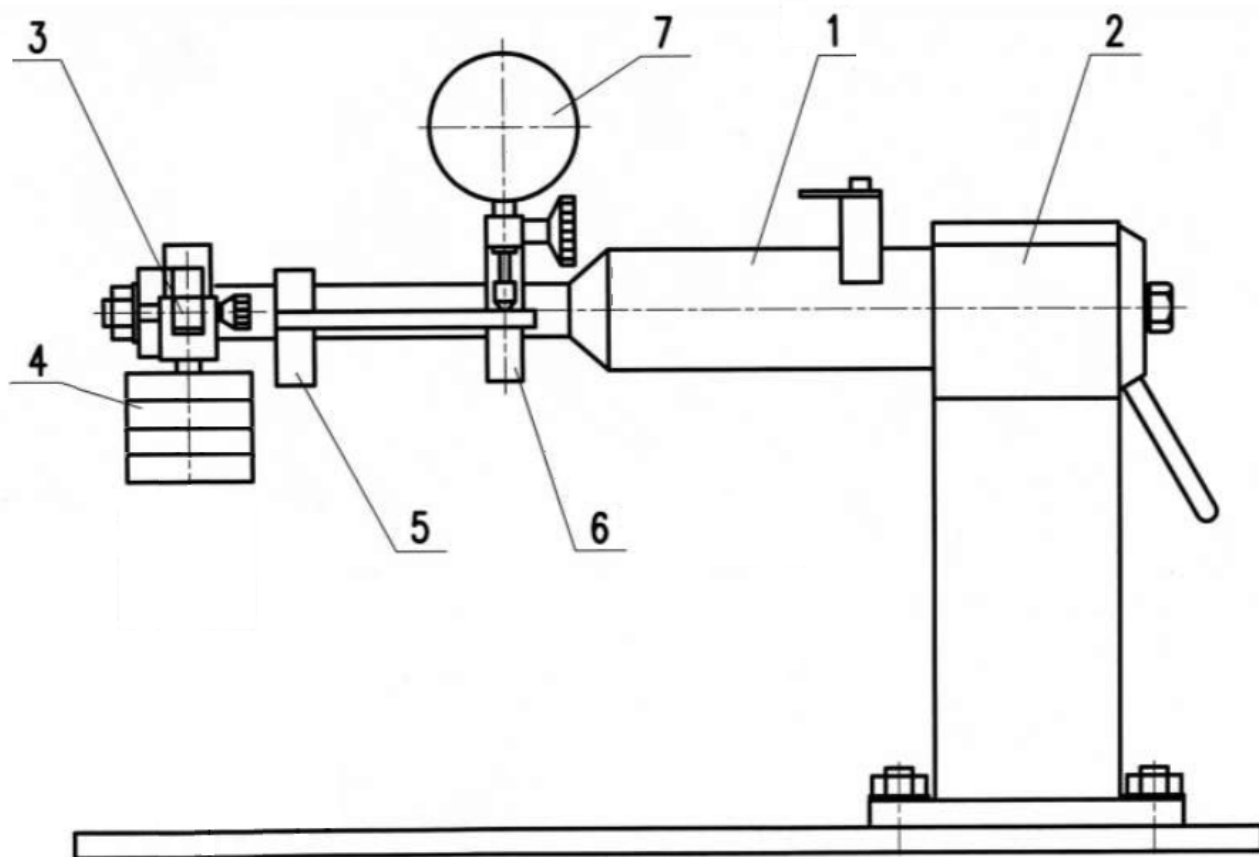


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки:

1 – стержень; 2 – стойка; 3 – рычаг; 4 – грузы; 5, 6 – кольца; 7 – индикатор

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 3).

Таблица 3

$F, \text{ Н}$	Показания индикатора угломера	Δl	$G, \text{ МПа}$	$\Delta G, \%$
10				
20				
30				
40				

Контрольные вопросы

1. Что называется кручением стержня?
2. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях стержня при кручении?
3. Какие деформации возникают в поперечных сечениях стержня при кручении?
4. Что такое модуль сдвига?
5. Как определяется величина напряжения при кручении?
6. Какое влияние оказывает изменение длины стержня на величину угла закручивания?
7. Как определяется модуль сдвига при кручении?
8. Какое влияние оказывает изменение крутящего момента на величину угла закручивания?
9. Как производится испытание стержня на кручение?
10. Какое влияние оказывает изменение диаметра поперечного сечения стержня на величину напряжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение перемещений в балке при чистом изгибе

Цель работы: экспериментальное определение значений прогибов в балке при чистом изгибе и сравнение их с теоретическим значением.

Краткие теоретические сведения

При чистом изгибе на участке балки действует только постоянный изгибающий момент.

Используя изложенный в теоретической части курса «Сопротивление материалов» метод определения деформаций балок [1, 3], согласно рис. 7, для шарнирно опертой по краям балки, нагруженной двумя сосредоточенными силами P на расстояниях L_0 от опор в пролете длиной L , для величины перемещения y на участке $L_0 \leq x \leq L/2$, имеем:

$$y = \frac{P \cdot L_0}{6 \cdot E \cdot I} (3 \cdot L \cdot x - 3 \cdot x^2 - L_0^2),$$

где E – модуль продольной упругости, МПа;
 I – осевой момент инерции, см⁴.

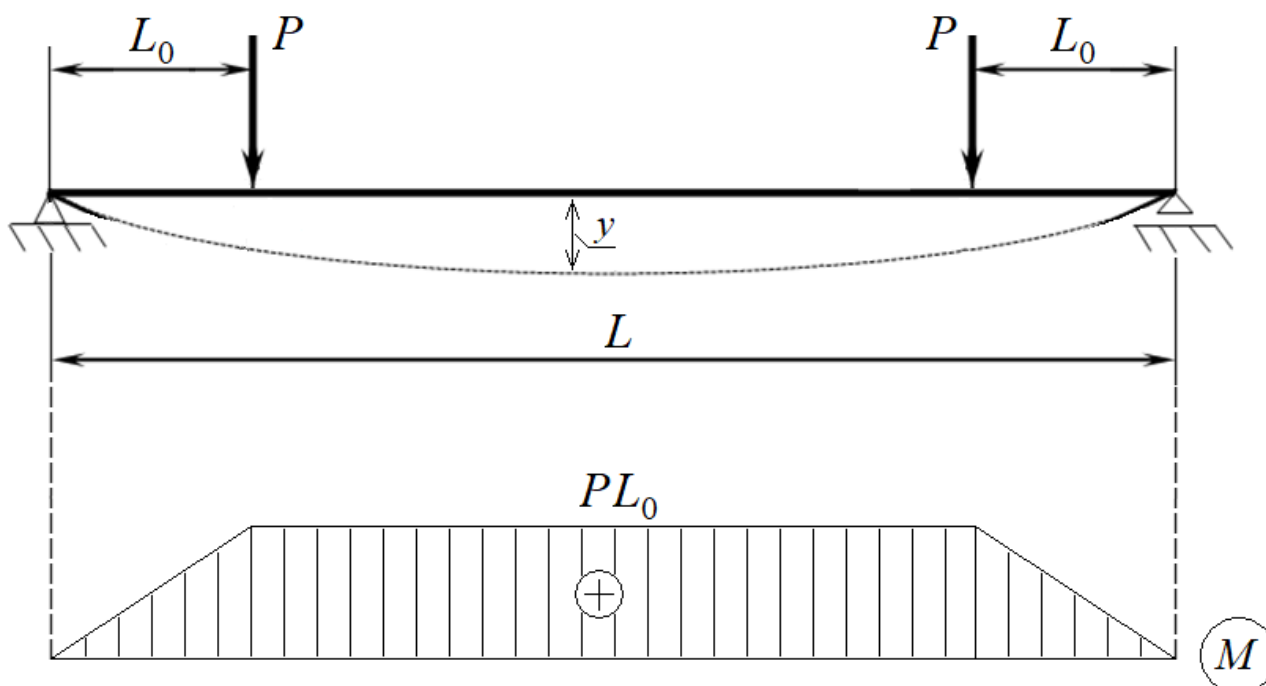


Рисунок 7 – Схема деформации балки под нагрузкой

Оборудование и принадлежности

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 8. Испытания производятся на балке **3** прямоугольного $b \times h = 30 \times 5$ мм сечения длиной $L = 666$ мм, расположенной на двух шарнирных опорах. Балка загружается симметрично сосредоточенными грузами **4** на расстояниях L_0 от опор. Вследствие симметрии системы максимальный прогиб имеет место посередине пролета. Для определения перемещений используются индикаторы часового типа **1** и **2**, расположенные на расстояниях L_1 и $L/2$ от левой опоры.

Величины перемещений $y_{1,2}$ определяются следующим образом:

$$y_{1,2} = \Delta n \cdot \alpha,$$

где Δn – разность показаний индикатора;
 $\alpha = 0,01$ мм – цена деления индикатора.

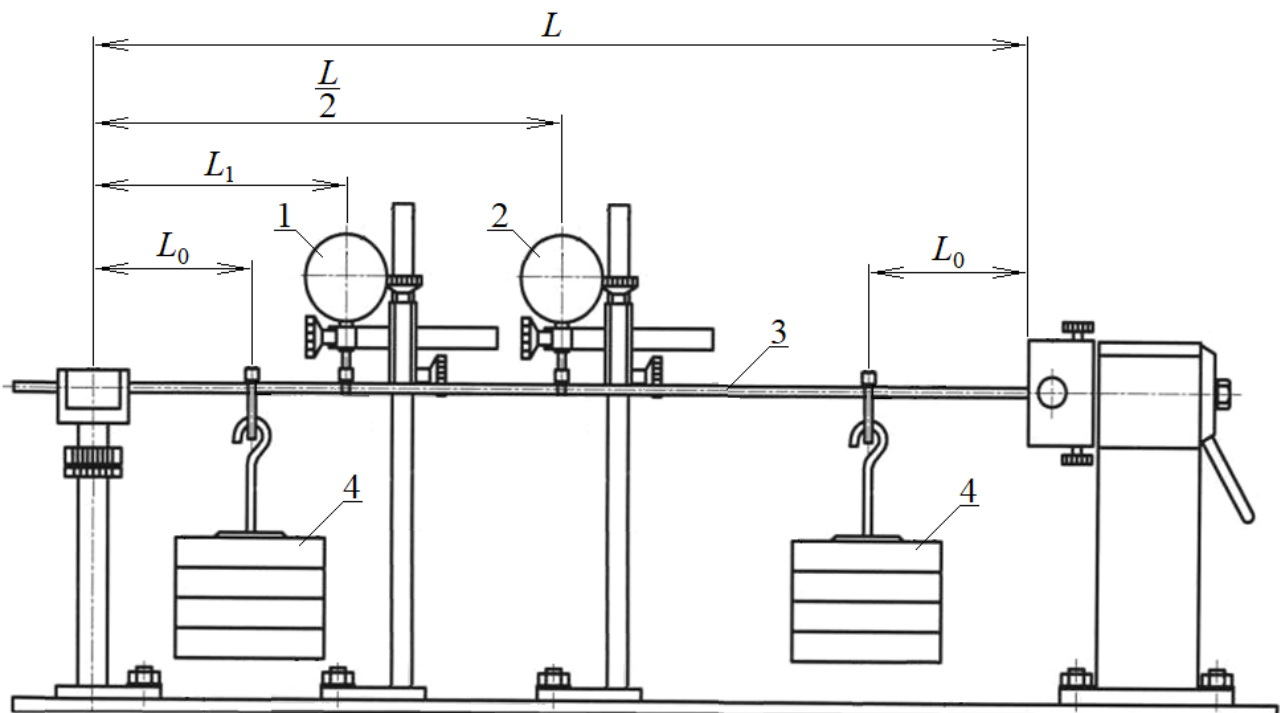


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки:
1, 2 – индикаторы; 3 – балка; 4 – грузы

Порядок проведения испытаний

1. Последовательно нагрузить балку силами $P = 10 \text{ Н}, 20 \text{ Н}, 30 \text{ Н}$.
2. Снять показания индикаторов **1** и **2**.
3. Определить разность показаний индикатора Δl .
4. Определить прогибы $y_{1,2}$.
5. Сравнить экспериментальные и теоретические результаты.
6. Подсчитать процент расхождения.

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 4).

Таблица 4

$P, \text{ Н}$	Показания индикатора	Δl	$y_1, \text{ мм}$	$\Delta y_1, \%$	$y_2, \text{ мм}$	$\Delta y_2, \%$
10						
20						
30						

Контрольные вопросы

1. Что называется изгибом стержня?
2. Что называется балкой?
3. Какой изгиб называется чистым?
4. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях стержня при чистом изгибе?
5. Что такое изгибающий момент при чистом изгибе?
6. Как определяется перемещение при чистом изгибе?
7. Что такое индикатор часового типа?
8. От чего зависит величина перемещения при чистом изгибе?
9. Что такое максимальный прогиб при чистом изгибе?
10. Какие деформации возникают в поперечных сечениях стержня при чистом изгибе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Определение перемещений в балке при поперечном изгибе

Цель работы: экспериментальное определение значений прогиба балки при поперечном изгибе и сравнение его с теоретическим значением.

Краткие теоретические сведения

При плоском поперечном изгибе плоскость изогнутой оси балки совпадает с плоскостью действия нагрузок.

Используя изложенный в теоретической части курса «Сопротивление материалов» метод определения деформаций балок [1, 3], согласно рис. 9, для шарнирно опертой по концам балки, нагруженной сосредоточенной силой P по середине пролета длиной L , для величины максимального перемещения y_{max} имеем:

$$y_{max} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}.$$

где E – модуль продольной упругости, МПа;
 I – осевой момент инерции, см⁴.

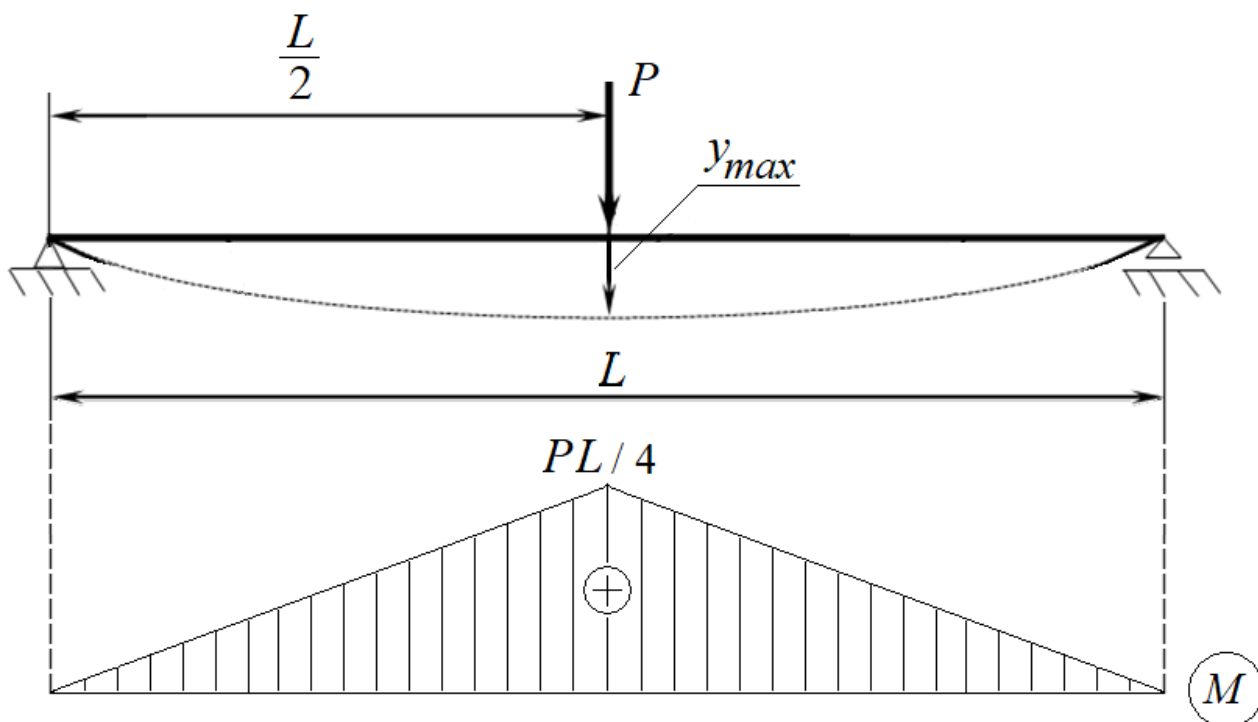


Рисунок 9 – Схема деформации балки под нагрузкой

Оборудование и принадлежности

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 10 и рис. 11. Испытания производятся на балке **1** прямоугольного $b \times h = 30 \times 5$ мм сечения, расположенной на двух шарнирных опорах. Балка загружается сосредоточенной силой P посередине пролета $L = 666$ мм.

Вследствие симметрии системы максимальный прогиб y_{max} имеет место посередине пролета. Для определения перемещений используется индикатор часового типа **2**. Величина максимального перемещения y_{max} определяется следующим образом:

$$y_{max} = \Delta n \cdot \alpha,$$

где Δn – разность показаний индикатора;

$\alpha = 0,01$ мм – цена деления индикатора.

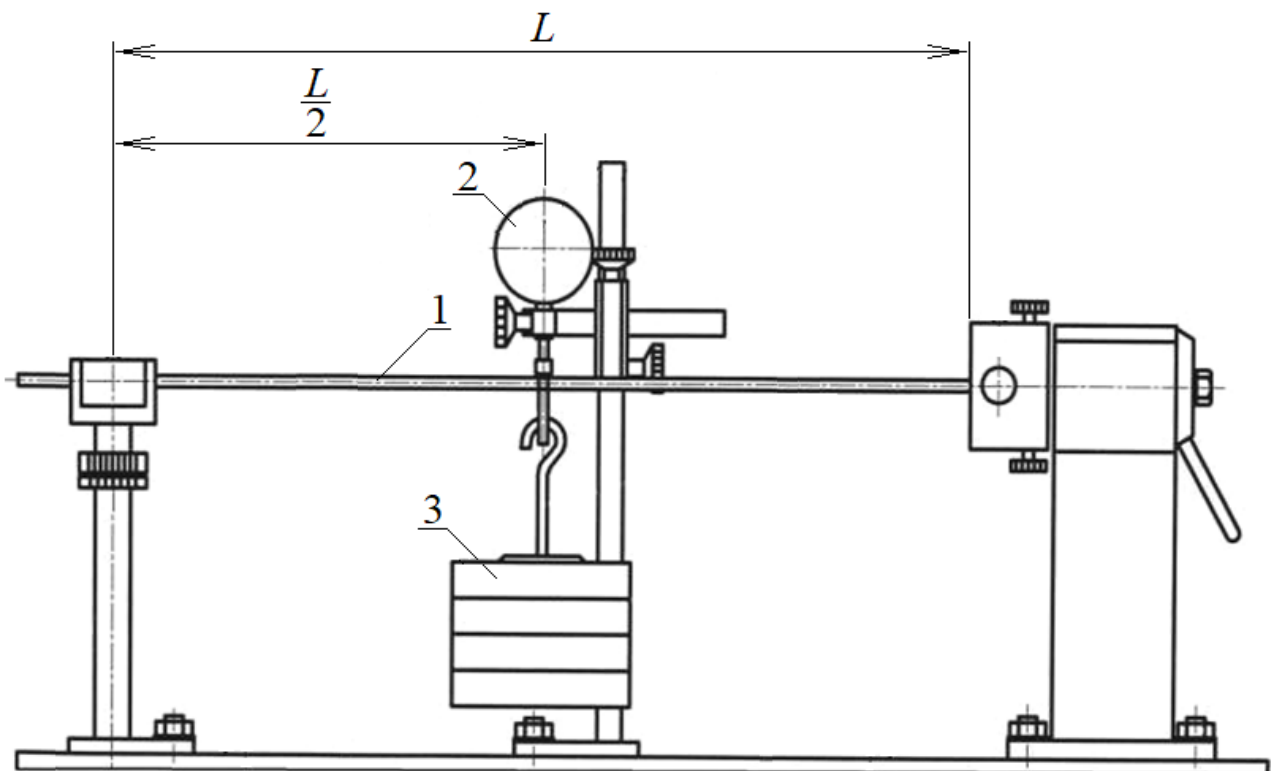


Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки:

1 – балка; 2 – индикатор; 3 – грузы

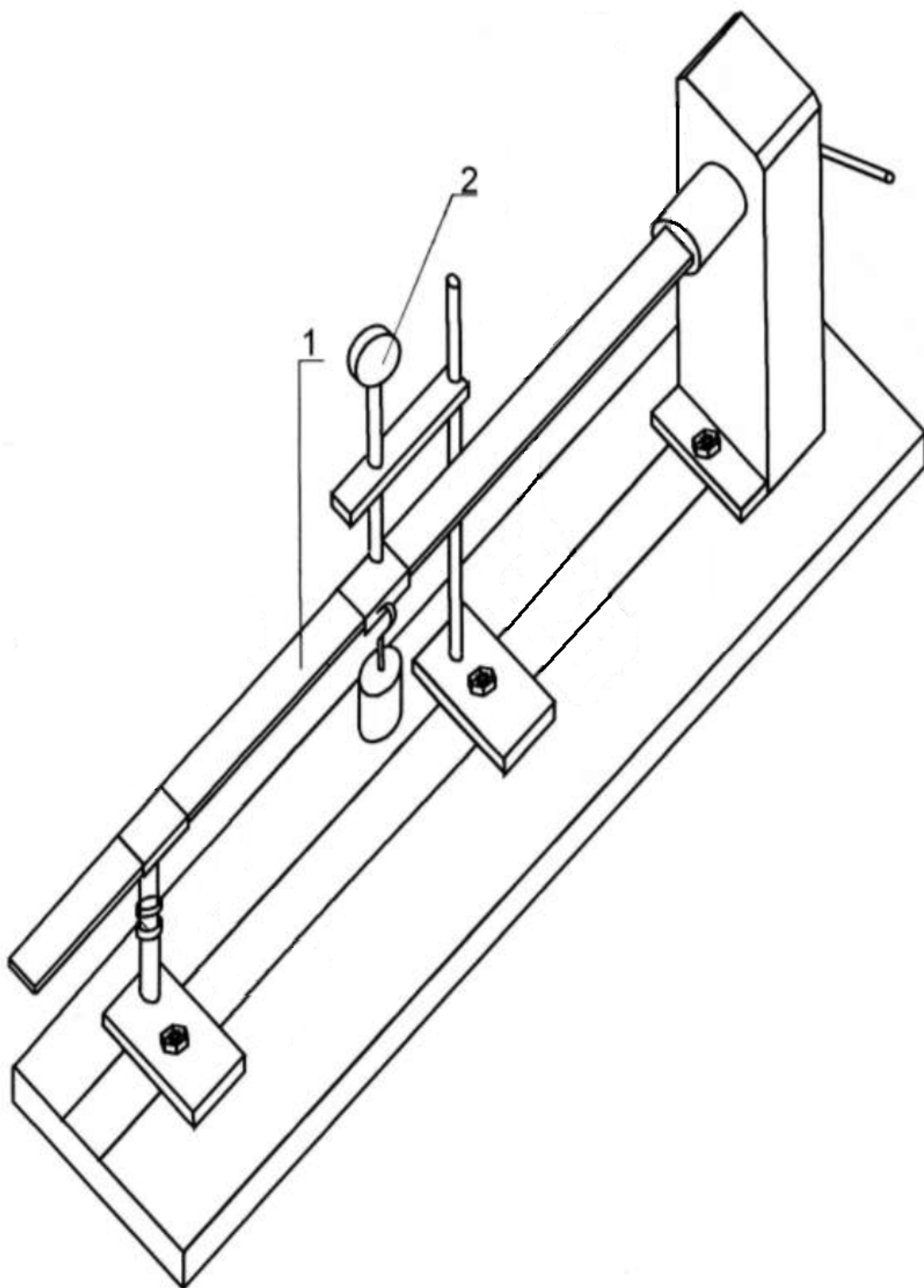


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки:
1 – балка; 2 – индикатор

Порядок проведения испытаний

1. Последовательно нагрузить балку посередине пролета силой $P = 10 \text{ Н}, 20 \text{ Н}, 30 \text{ Н}, 40 \text{ Н}$.
2. Снять показания индикатора Δn .
3. Определить разность показаний индикатора Δn .
4. Определить прогиб y_{max} .
5. Сравнить экспериментальные и теоретические результаты.
6. Подсчитать процент расхождения.

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 5).

Таблица 5

$P, \text{ Н}$	Показания индикатора	Δn	$y_1, \text{ мм}$	$\Delta y_1, \%$
10				
20				
30				
40				

Контрольные вопросы

1. Какая балка называется шарнирной?
2. Какой изгиб называется поперечным?
3. Какие напряжения возникают в стержне при поперечном изгибе?
4. Какие деформации возникают в стержне при поперечном изгибе?
5. Как определяется перемещение при поперечном изгибе?
6. Что такое максимальный прогиб при поперечном изгибе?
7. Как определяется осевой момент инерции для прямоугольного сечения?
8. Что такое изгибающий момент при поперечном изгибе?
9. От чего зависит величина перемещения при поперечном изгибе?
10. Как определяется изгибающий момент?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение перемещений при изгибе консольной балки

Цель работы: экспериментальное определение значений прогибов при изгибе консольной балки и сравнение их с теоретическим значением.

Краткие теоретические сведения

При плоском поперечном изгибе плоскость изогнутой оси балки совпадает с плоскостью действия нагрузок.

Используя изложенный в теоретической части курса «Сопротивление материалов» метод определения деформаций балок [1, 3], согласно рис. 12, для консольно заделанной балки, нагруженной сосредоточенной силой P на свободном крае длиной L , для величины перемещения y имеем:

$$y = \frac{P}{6 \cdot E \cdot I} (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot x + x^3).$$

где E – модуль продольной упругости, $МПа$;
 I – осевой момент инерции, $см^4$.

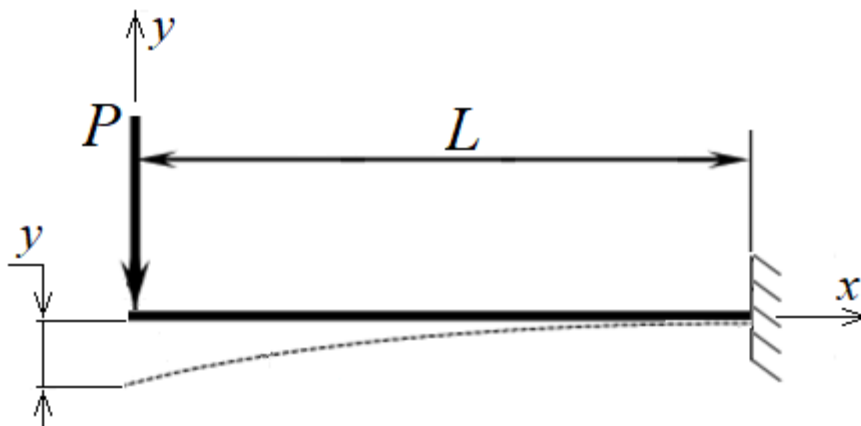


Рисунок 12 – Схема деформации балки под нагрузкой

Оборудование и принадлежности

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 13. Испытания производятся на балке **3** прямоугольного $b \times h = 24 \times 12$ мм сечения длиной $L = 650$ мм, консольно заделанной одним краем. Балка загружается грузами **4** на свободном крае. Для определения перемещений используются индикаторы часового типа **1** и **2**, расположенные на расстояниях L_1 и L_2 от

свободного края консоли.

Величины перемещений $y_{1,2}$ определяются следующим образом:

$$y_{1,2} = \Delta n \cdot \alpha,$$

где Δn – разность показаний индикатора;

$\alpha = 0,01$ мм – цена деления индикатора.

Порядок проведения испытаний

1. Последовательно нагрузить балку силой $P = 10$ Н, 20 Н, 30 Н, 40 Н.
2. Снять показания индикаторов **1** и **2**.
3. Определить разность показаний индикатора Δn .
4. Определить прогибы $y_{1,2}$.
5. Сравнить экспериментальные и теоретические результаты.
6. Подсчитать процент расхождения.

Запись результатов наблюдений ведется в лабораторном журнале (табл. 6).

Таблица 6

P , Н	Показания индикатора	Δn	y_1 , мм	Δy_1 , %	y_2 , мм	Δy_2 , %
10						
20						
30						

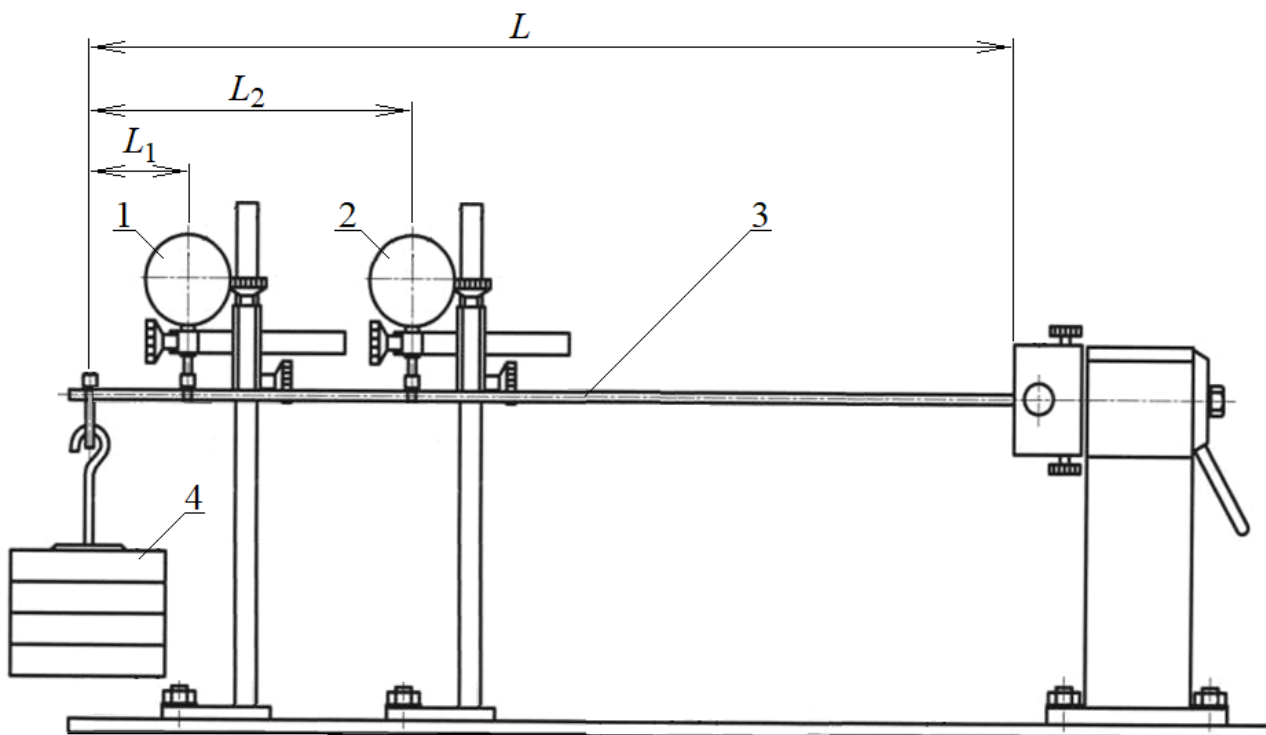


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки
 1, 2 – индикаторы; 3 – балка; 4 – грузы

Контрольные вопросы

1. Что такое заделка?
2. Как найти максимальный изгибающий момент?
3. Какие деформации возникают в поперечных сечениях стержня при изгибе?
4. Какая балка называется консольной?
5. Что показывает индикатор часового типа?
6. Какое влияние оказывает изменение длины стержня на величину прогиба?
7. Как определяется модуль Юнга при изгибе консольной балки?
8. Какое влияние оказывает изменение изгибающего момента на величину прогиба?
9. Как производится испытания консольной балки на изгиб?
10. От чего зависит величина перемещения при изгибе консольной балки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников, Б. Е. Сопротивление материалов / Б. Е. Мельников, Л. К. Паршин, А. С. Семенов, В. А. Шерстнев. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 576 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/341261> (дата обращения: 29.01.2024). – Текст : электронный.
2. Степин, П. А. Сопротивление материалов : учебник / П. А. Степин. – 13-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 320 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/210815> (дата обращения: 29.01.2024). – Текст : электронный.
3. Лабораторные работы по сопротивлению материалов: методические указания / сост. В. В. Чумичев, Э. В. Шемякин; М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП, 2010. – 54 с. – Текст: непосредственный.