

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Строительная механика и теория сооружений»

Практикум по выполнению лабораторной работы

по дисциплинам
«Сопротивление материалов» и
«Специальные вопросы сопротивления
материалов»

«Испытание стержней круглого поперечного сечения на круче- ние» (Часть III)

Автор
Еремин В.Д.

Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

Практикум содержит описание экспериментальной установки и испытываемых образцов, изложены порядок проведения и обработки результатов испытаний, основные теоретические положения и контрольные вопросы, необходимые для проведения учебно-исследовательской лабораторной работы «Испытание стержней круглого поперечного сечения на кручение (Часть III)» по дисциплинам «Сопротивление материалов», «Специальные вопросы сопротивления материалов», «Основы сопротивления материалов с элементами теории упругости», «Механика» и «Строительная механика для архитекторов».

Настоящий практикум ставит своей задачей ознакомление студентов, изучающих общий курс сопротивления материалов, с вопросами экспериментального изучения зависимости деформации (угла закручивания) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки (крутящего момента).

Практикум предназначен для студентов всех форм обучения (очной, очно-заочной, заочной) технических направлений подготовки (специальностей), в частности, для студентов, обучающихся по направлениям 08.03.01 – Строительство; 07.03.01 – Архитектура; 07.03.02 – Реконструкция и реставрация архитектурного наследия; 07.03.04 – Градостроительство; 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 27.03.05 – Инноватика, 29.03.04 – Технология художественной обработки материалов и специальностям 08.05.01 – Строительство уникальных зданий и сооружений; 27.05.01 – Прикладная геодезия; 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства.

Автор

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»

Еремин В.Д.

Оглавление

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИСПЫТАНИЕ СТЕРЖНЕЙ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА КРУЧЕНИЕ».....	4
1. Цель работы.....	4
2. Описание испытательной установки WP100.....	4
3. Испытываемые образцы.....	9
4. Описание эксперимента на кручение.....	10
5. Основные теоретические положения.....	12
6. Порядок проведения испытаний.....	17
6.1. Определение собственной /внутренней/ деформации испытательной машины WR 100.....	17
6.2. Определение модуля упругости второго рода (G) для различных материалов. Исследование зависимости деформации стержня (угла закручивания) от типа его материала (модуля упругости второго рода).....	22
7. Основные правила техники безопасности.....	27
8. Контрольные вопросы.....	27
9. Перечень рекомендуемых информационных ресурсов.....	28
10. Рекомендуемая литература.....	29
Приложение А. Образец отчета по лабораторной работе.....	31
Приложение Б. Образец оформления титульного листа лабораторной работы.....	43

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИСПЫТАНИЕ СТЕРЖНЕЙ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА КРУЧЕНИЕ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление студентов, изучающих общий курс сопротивления материалов, с вопросами экспериментального изучения зависимости деформации (угла закручивания) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки (крутящего момента).

2. ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ WP 100

Лабораторная работа проводится на установке WR 100, предназначенной для проведения экспериментов, связанных с исследованием деформаций стержней круглого поперечного сечения при кручении.

Оборудование может быть использовано как для проведения экспериментов студентами, так и для демонстрации преподавателями на учебных занятиях явления кручения стержней круглого поперечного сечения.

Конструкция установки имеет жесткие магнитные опоры, которые могут быть установлены практически в любое положение, что дает возможность непосредственного наблюдения за ходом экспериментов.

Прибор используется для решения широкого диапазона задач, связанных с изучением темы «Кручение стержней круглого поперечного сечения» в

процессе обучения. Установка позволяет исследовать фундаментальные законы упругих деформаций, возникающих при кручении.

Полученные экспериментальные данные могут быть проанализированы как с помощью графиков, так и математически.

Обучающиеся учатся планировать, выполнять и оценивать результаты измерений. По результатам экспериментальных данных у них появляется база для дальнейшего обсуждения причин, приводящих к разрушению испытываемого образца.

Установка обладает большими возможностями, направленными на развитие психомоторики у обучающихся при проведении экспериментов.

У них при этом развивается чувство уверенности при работе с измерительным оборудованием.

Установка представляет машину для проведения испытаний стержней круглого поперечного сечения на кручение. При проведении эксперимента, нагрузка прикладывается к различным стержням, после чего измеряется деформация.

По сравнению с деформацией исследуемого объекта, деформация машины при проведении эксперимента пренебрежительно мала. Однако, в отдельных случаях, собственная (внутренняя) деформация испытательной установки предварительно измеряется и в дальнейшем принимается во внимание.

Настольное устройство состоит из направляющей штанги, на которой установлены две подвижные опоры для проведения экспериментов на кручение.

В экспериментах на кручение зажимы (захваты) на экспериментальном стенде состоят из фиксированных, жестко закрепленных патронов с одной стороны, и вращающихся патронов с другой стороны, с установочного механизма на основе рычага для создания крутящего момента.

Схема расположения оборудования приведена на рис. 1.

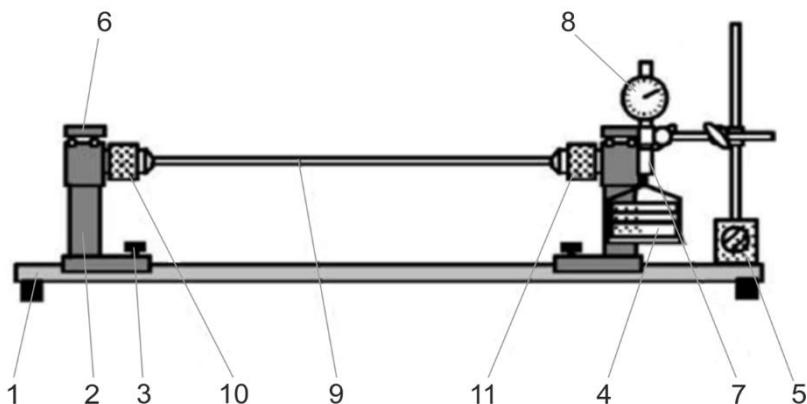


Рис. 1. Схема испытательной машины WP 100

На этом рисунке:

- 1 – направляющая балка;
- 2 – подвижные опоры;
- 3 – крепежные винты для опор;
- 4 – прикладываемая нагрузка;
- 5 – магнитный держатель для манометра;
- 6 – прижимная пластина и винт;
- 7 – рычаг для создания крутящего момента;
- 8 – стрелочный индикатор;
- 9 – испытываемый образец;

- 10 – жестко закрепленный зажим;
- 11 – вращающийся зажим.

Стрелочный индикатор (8) располагается на расстоянии $s = 57.3$ мм от оси вращения испытываемого стержня (рис. 2)

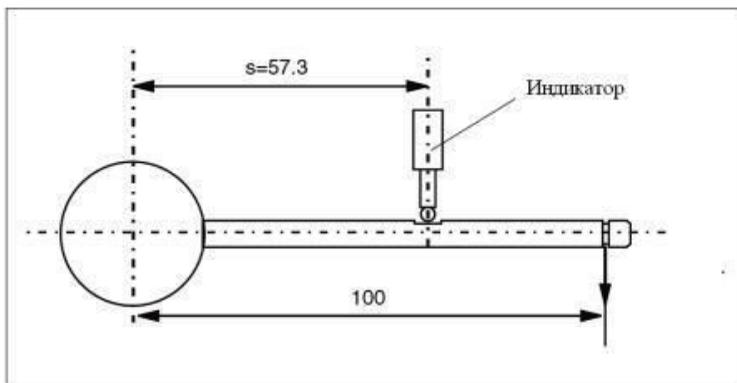
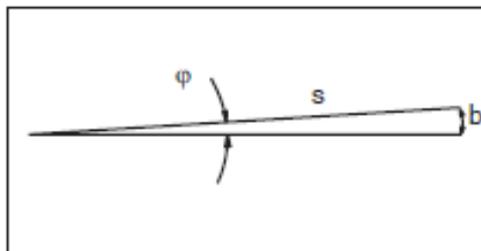


Рис. 2. Рычаг для создания крутящего момента

Для небольшого угла φ



формула для определения угла в радианах имеет вид:

$$\varphi = \frac{b}{s} \quad (1)$$

Для этого угла сектор b может быть очень точно определен по шкале стрелочного индикатора y (рис. 3)

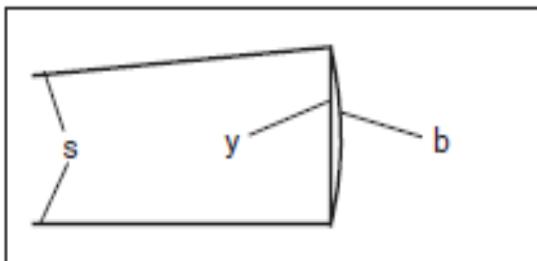


Рис. 3. Шкала стрелочного индикатора y

Здесь b – длина дуги;

s – расстояние от стрелочного индикатора до оси вращения испытываемого стержня (рис. 2).

Следовательно,

$$\varphi = \frac{b}{s} = \frac{y}{s} = \frac{y}{57,3}. \quad (2)$$

Так как

$$2 \cdot \pi \approx 360^\circ,$$

то

$$\frac{1}{57,3} \approx 1^\circ \quad (3)$$

Поэтому

1 мм шкалы стрелочного индикатора y соответствует углу закручивания стержня $\varphi = \mathbf{1 \text{ градус}}$.

В связи с этим, для более простого перевода радианов в градусы и было выбрано расстояние от стрелочного индикатора до оси вращения испытываемого стержня $s = \mathbf{57,3 \text{ мм}}$.

3. ИСПЫТЫВАЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для проведения экспериментов на кручение испытываемые образцы стержней, изготовленные из различных материалов, длиной L_0 , круглого поперечного сечения диаметром d (рис. 4), устанавливаются в испытательную машину.

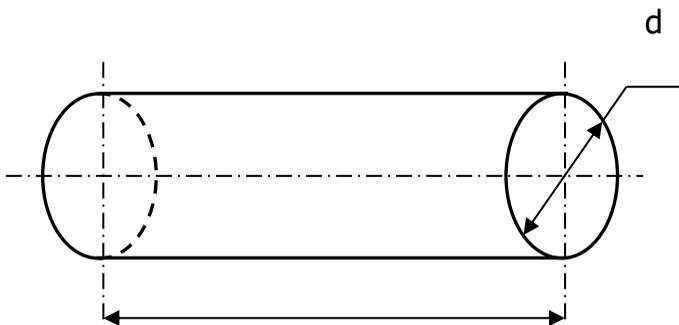


Рис. 4. Эскиз испытываемых образцов

Имеется следующий комплект стержней для проведения испытаний на кручение:

Материал стержня	Размеры сечения d , мм	Длина стержня L_0 , мм
1	2	3
Латунь /Ms/	10	340
Латунь /Ms/	10	50
Сталь /St/	5	340
Сталь /St/	5	50
Сталь /St/	6	340
Сталь /St/	6	50
Сталь /St/	7	340

1	2	3
Сталь /St/	7	50
Сталь /St/	8	340
Сталь /St/	10	340
Сталь /St/	10	50
Сталь /St/	12	340
Сталь /St/	12	50
Алюминий / Al/	10	50
Алюминий / Al/	10	240
Алюминий / Al/	10	340
Алюминий / Al/	10	440
Алюминий / Al/	10	540
Алюминий / Al/	10	640

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА НА КРУЧЕНИЕ

Испытывается стержень круглого поперечного сечения диаметром d , с расчетной длиной L , жестко заземленный одним концом (рис. 5).

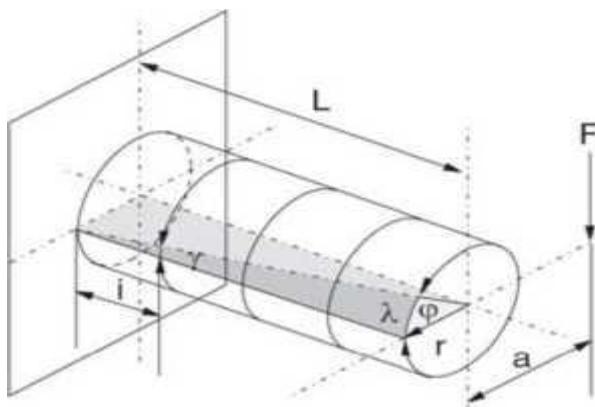


Рис. 5. Испытание стержня на кручение

На этом рисунке:

L – расчетная длина испытываемого стержня;

r – радиус поперечного сечения стержня;

λ – сектор;

φ – угол закручивания стержня;

γ – угол сдвига волокна, лежащего на поверхности стержня.

Так как сила P , действующая на рычаг, перпендикулярна к оси стержня, то в испытываемом образце возникает крутящий момент:

$$M_{кр} = P \cdot a, \quad (4)$$

где P – усилие в ньютонах;

a – длина рычага ($a = 100$ мм).

Данный вид нагрузки является основным для проводимых экспериментов. Левый патрон испытательной машины выступает в качестве неподвижного зажима /захвата/, в то время как правый патрон (свободный конец балки) закреплен на шаровом вращающемся подшипнике (вращающийся зажим).

Расчетная длина испытываемого образца L рассчитывается как расстояние между передними плоскостями жестко закрепленного и вращающегося зажимов /захватов/ испытательной установки.

В некоторых экспериментах собственная деформация испытательной установки /кручение патрона или конической оправки/ предельно мала по сравнению с деформацией испытываемого образца.

Однако в большинстве случаев

проводимых экспериментов на кручение собственная деформация испытательной установки должна быть предварительно определена и затем приниматься во внимание в дальнейших расчетах.

Деформация рычага настолько мала, что не влияет на результаты измерений.

Момент трения в подшипниках также практически не влияет на результаты измерений.

5. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Кручением называют такой вид деформации стержня, при котором в его поперечных сечениях возникают только одни крутящие моменты $M_{кр}$, а остальные внутренние усилия (N , Q , $M_{изг}$) равны нулю.

Сечения, которые расположены в плоскостях, перпендикулярных к геометрической оси стержня, называются поперечными сечениями. Размеры поперечного сечения стержня значительно меньше его длины.

Крутящий момент $M_{кр}$ в любом поперечном сечении стержня численно равен алгебраической сумме внешних моментов, приложенных по одну сторону от сечения.

Будем считать крутящий момент $M_{кр}$ положительным, если для наблюдателя, смотрящего на сечение, он представляется направленным против часовой стрелки.

При кручении происходит поворот одного поперечного сечения относительно другого на некоторый угол Φ , называемый углом закручивания.

Предположения (гипотезы), положенные в основу теории кручения круглых стержней:

1. Материал стержня подчиняется закону Гука, то есть напряжения в стержне не выходят за предел пропорциональности.

2. Размеры поперечных сечений стержня невелики по сравнению с его длиной.

3. Выполняется гипотеза Бернулли (гипотеза плоских сечений), то есть поперечные сечения стержня, плоские и нормальные к оси стержня до приложения к нему нагрузки, остаются плоскими и нормальными к его оси и при действии нагрузки.

4. Радиусы поперечных сечений при деформации не искривляются.

5. Прямолинейная ось стержня (ось кручения) до деформации, остается прямолинейной и после деформации, а все поперечные сечения поворачиваются вокруг этой оси по отношению друг к другу на угол закручивания φ .

6. Расстояния между поперечными сечениями стержня в процессе деформации не изменяются, следовательно, продольные волокна не удлиняются и не укорачиваются, то есть длина стержня остается прежней.

Справедливость этих принятых допущений (гипотез) подтверждается тем, что полученные на их основе формулы хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На основании принятых допущений кручение круглого стержня можно представить как результат сдвигов,

вызванных взаимным поворотом поперечных сечений относительно друг друга.

Вследствие этого в поперечных сечениях стержня при кручении возникают только касательные напряжения, которые определяются по формуле:

$$t = \frac{M_{кр}}{I_{\rho}} \cdot \rho \quad (5)$$

Эта формула позволяет определять касательные напряжения в любой точке круглого поперечного сечения.

Максимальные касательные напряжения при кручении, возникающие в крайних точках сечения, определяются по формуле:

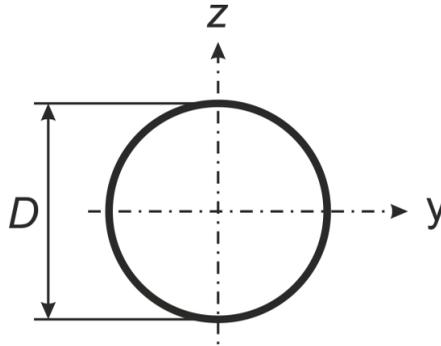
$$t_{max} = \frac{M_{кр}}{I_{\rho}} \cdot r = \frac{M_{кр}}{W_{\rho}} \quad (6)$$

Величина

$$W_{\rho} = \frac{I_{\rho}}{r}$$

называется полярным моментом сопротивления круглого сечения.

Полярный момент инерции и полярный момент сопротивления для сплошного круглого поперечного сечения стержня определяются по формулам:

Сопротивление материалов и
 Специальные вопросы сопротивления материалов


$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (7)$$

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} \quad (8)$$

Угол сдвига волокна, лежащего на поверхности стержня (рис. 5), определяется равенством:

$$\gamma = \frac{\lambda}{L} \quad (9)$$

Закон Гука при сдвиге имеет вид:

$$t = G \cdot \gamma \quad (10)$$

Угол закручивания стержня φ в радианах определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot L}{G \cdot I_p} \quad (11)$$

Переход к градусам делается по общеизвестной формуле:

$$\varphi^0 = \varphi \cdot \frac{180^\circ}{\pi},$$

следовательно

$$\varphi^0 = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{кр} \cdot L}{G \cdot I_p} \quad (12)$$

Для оценки жесткости стержня вводится другая величина – относительный угол закручивания. Относительный угол закручивания – это отношение значения угла закручивания φ к расчетной длине образца L :

$$\theta = \frac{M_{кр}}{G \cdot I_p} \quad (13)$$

В этих формулах (рис. 5):

t – касательные напряжения при кручении стержня;

$M_{кр}$ – крутящий момент;

I_p – полярный момент инерции поперечного сечения стержня;

W_p – полярный момент сопротивления поперечного сечения стержня;

ρ – координата произвольной точки поперечного сечения стержня;

r – радиус поперечного сечения стержня;

d – диаметр поперечного сечения стержня;

L – расчетная длина испытываемого стержня;

λ – сектор;

γ – угол сдвига волокна, лежащего на поверхности стержня;

φ – угол закручивания;
 θ – относительный угол закручивания стержня;
 G – модуль упругости второго рода (модуль упругости при сдвиге).

Величину $G \cdot I_{\rho}$ называют жесткостью стержня при кручении. Она характеризует сопротивление стержня закручиванию.

На практике для многих материалов первоначально экспериментально определяется модуль упругости первого рода (модуль продольной упругости) E , после чего определяется модуль упругости второго рода (модуль упругости при сдвиге) G .

Между величинами модуля упругости первого рода E и модулем упругости второго рода G для одного и того же материала существует зависимость:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (14)$$

Как видно, численное соотношение между G и E для данного материала зависит от значения коэффициента Пуассона μ . Для большинства материалов, в том числе и для стали, можно приближенно принимать $G \approx 0,385 E$.

6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1. Определение собственной /внутренней/ деформации испытательной установки WP 100

Этот предварительный эксперимент отвечает на вопрос о том, оказывает ли влияние величина внешней нагрузки, прикладываемая к испытываемому круглому

стержню, на собственную /внутреннюю/ деформацию испытательной установки.

Для стержня круглого поперечного сечения, жестко закрепленного одним концом, расчетная схема которого показана на рис. 6, опытным путем определяем величину его деформации (угол закручивания φ).

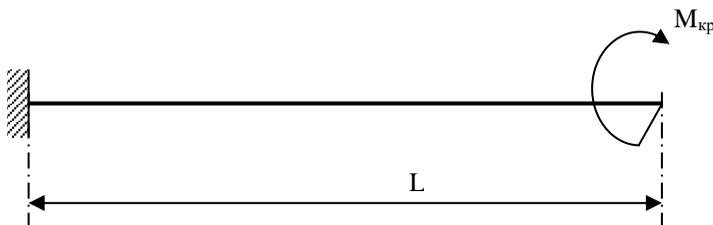


Рис. 6. Расчетная схема испытываемого стержня

Исходные данные:

Испытывается на кручение образец, изготовленный из алюминия (Al).

Испытываемый стержень имеет круглое поперечное сечение с нормативным диаметром $d = 10$ мм.

Нормативная длина испытываемого образца $L_0 = 50$ мм.

К испытываемому образцу поочередно прикладывается внешняя нагрузка массой $m = 0,1$ кг, $0,2$ кг, $0,5$ кг, $1,0$ кг, $1,5$ кг и $2,0$ кг, то есть сила $P = 0,981$ Н, $1,96$ Н, $4,91$ Н, $9,81$ Н, $14,7$ Н и $18,6$ Н.

Следовательно, в испытываемом образце соответственно возникает крутящий момент (4) $M_{кр} = 98,1$ Н·мм, 196 Н·мм, 491 Н·мм, 981 Н·мм, 1470 Н·мм и 1860 Н·мм (рис. 6).

Методика проведения эксперимента:

Определение собственной /внутренней/ деформации испытательной установки производится в следующей последовательности:

1. Измеряем фактические размеры поперечного сечения испытываемых стержней (**d**) и заносим их в журнал испытаний № 1 (табл. 1).

2. Устанавливаем испытываемый стержень в жестко закрепленный и вращающийся захваты /захваты/ испытательной установки.

3. Жестко закрепленный и вращающийся захваты /захваты/ испытательной установки сводим друг к другу, оставляя между ними зазор $\Delta \approx 1\text{ мм}$.

Данные условия означают проведение испытания на кручение стержня с расчетной длиной $L \approx 0\text{ мм}$ (рис. 7).

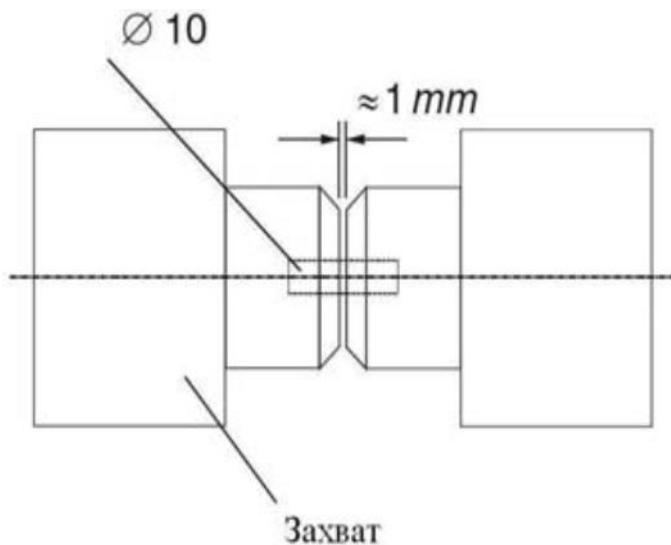


Рис. 7. Предварительное испытание стержня на кручение

4. Обнуляем показания стрелочного индикатора.

5. Осторожно нагружаем испытываемый стержень поочередно внешней нагрузкой массой **$m = 0,1\text{кг}, 0,2\text{кг}, 0,5\text{кг}, 1,0\text{кг}, 1,5\text{кг}$** и **$2,0\text{кг}$** .

6. Снимаем показания стрелочного индикатора y и заносим их в журнал испытаний № 1 (табл. 1).

7. По полученным в экспериментах значениям деформации стержня (показания стрелочного индикатора y) исследуем зависимость собственной (внутренней) деформации испытательной установки $y_{\text{соб}}$ от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$).

Для этого:

– по полученным значениям строим график 1, показывающий зависимость собственной (внутренней) деформации испытываемой установки $y_{\text{соб}}$ от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$), то есть $y_{\text{соб}} \sim m (M_{\text{кр}})$.

Для этого по оси абсцисс откладываем нагрузку m , которая определяет крутящий момент $M_{\text{кр}}$, а по оси ординат – соответствующие показания стрелочного индикатора y (собственная /внутренняя/ деформация испытываемой установки $y_{\text{соб}}$).

8. Анализируя полученные в результате данного эксперимента значения собственной /внутренней/ деформации испытательной установки $y_{\text{соб}}$ (показания стрелочного индикатора y) можно сделать следующий вывод:

– собственная /внутренняя/ деформация испытательной установки $y_{\text{соб}}$ возрастает пропорционально величине внешней нагрузки (крутящему моменту $M_{\text{кр}}$), действующей на испытываемый стержень.

Образец графика 1

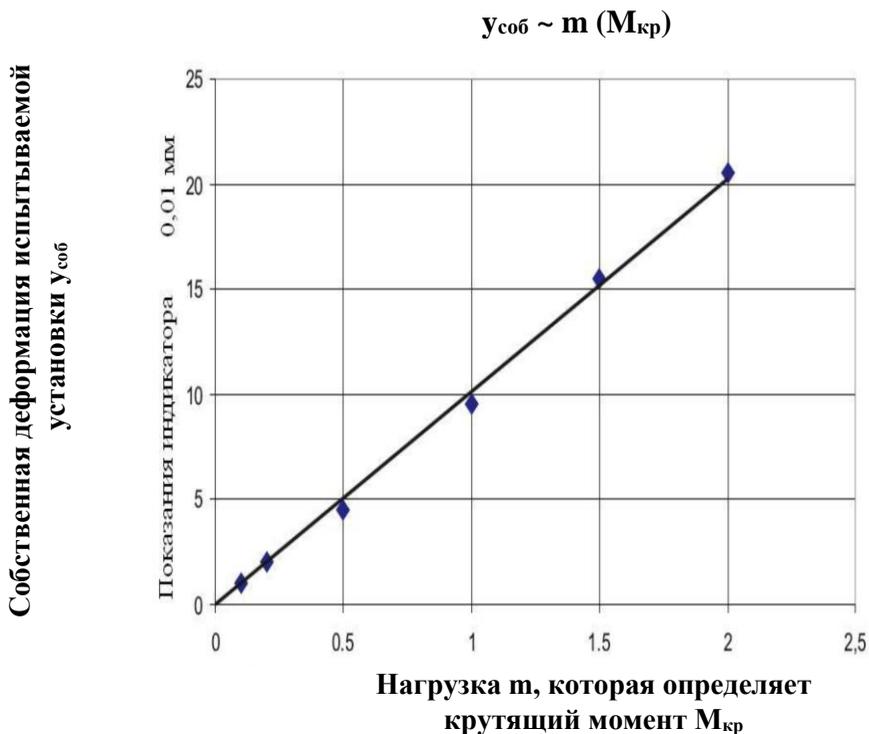


График 1. Зависимость собственной (внутренней) деформации испытательной установки от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$)

6.2. Исследование зависимости деформации (угла закручивания) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки (крутящего момента).

Для стержня круглого поперечного сечения, жестко закрепленного одним концом, расчетная схема которого показана на рис. 6, опытным путем определяем величину его деформации (угол закручивания φ).

На основании формулы (12), имеем

$$\varphi^0 = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{кр} \cdot L}{G \cdot I_\rho}$$

где

φ^0 – величина угла закручивания (в градусах);

$M_{кр}$ – величина внешней нагрузки (крутящего момента);

L – расчетная длина испытываемого стержня (расстояние между зажимами /захватами/ испытательной установки);

GI_ρ – жесткость испытываемого стержня при кручении.

Исходные данные

Испытывается на кручение образец (рис. 6), изготовленный из алюминия (Al).

Испытываемый стержень имеет круглое поперечное сечение с нормативным диаметром $d = 10$ мм.

Нормативная длина испытываемого образца равна $L_0 = 440$ мм.

Полярный момент инерции круглого поперечного сечения испытываемых образцов определяется по формуле (7):

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

К испытываемому образцу на правом свободном конце поочередно прикладывается внешняя нагрузка массой $m = 0,1\text{кг}, 0,2\text{кг}, 0,5\text{кг}, 1,0\text{кг}, 1,5\text{кг}$ и $2,0\text{кг}$, то есть сила $P = 0,981\text{Н}, 1,96\text{Н}, 4,91\text{Н}, 9,81\text{Н}, 14,7\text{Н}$ и $18,6\text{Н}$.

Следовательно, в испытываемом образце соответственно возникает крутящий момент (4) $M_{кр} = 98,1\text{Н}\cdot\text{мм}, 196\text{Н}\cdot\text{мм}, 491\text{Н}\cdot\text{мм}, 981\text{Н}\cdot\text{мм}, 1470\text{Н}\cdot\text{мм}$ и $1860\text{Н}\cdot\text{мм}$ (рис.6).

Методика проведения эксперимента

Исследование зависимости деформации (угла закручивания φ) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{кр}$) производится в следующей последовательности:

1. Измеряем фактический размер поперечного сечения испытываемого стержня (d) и заносим его в журнал испытаний № 2 (табл. 1).

2. Вычисляем по формуле (7) полярный момент инерции I_p круглого поперечного сечения испытываемого образца и заносим полученное значение в журнал испытаний № 2 (табл. 1).

3. Вычисляем жесткость стержня при кручении $G \cdot I_p$ и заносим его значение в журнал испытаний № 2 (табл. 1).

4. Расчетную длину испытываемого стержня, равную $L = 400\text{мм}$, предварительно отмечаем карандашом до проведения эксперимента (рис. 8).

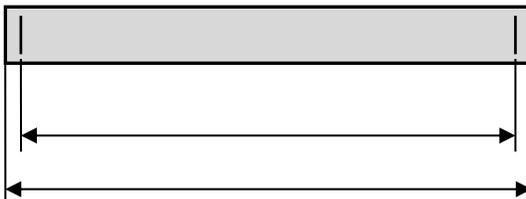


Рис.8. Образец для испытания с метками

5. Устанавливаем испытываемый стержень в зажимы /захваты/ испытательной установки.

6. Жестко закрепленный и вращающийся зажимы /захваты/ испытательной установки устанавливаем на расстоянии 400мм . Расчетная длина испытываемого стержня при этом составляет $L = 400\text{мм}$.

7. Обнуляем показания стрелочного индикатора.

8. Последовательно нагружаем испытываемый образец внешней нагрузкой массой $m = 0,1\text{кг}, 0,2\text{кг}, 0,5\text{кг}, 1,0\text{кг}, 1,5\text{кг}$ и $2,0\text{кг}$.

9. Снимаем показания стрелочного индикатора y и заносим их в журнал испытаний № 2 (табл. 2).

10. Вычисляем величины деформации испытываемого стержня y' с учетом поправок на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$ /журнал испытаний № 1 (табл. 1)/ и заносим полученные значения в журнал испытаний № 2 (табл. 2).

$$y' = y - y_{\text{соб}}$$

11. По формуле (12) вычисляем теоретические значения деформации испытываемого стержня (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) и заносим эти значения в журнал испытаний № 2 (табл. 2).

12. Определяем погрешность между опытными и теоретическими значениями деформации испытываемого стержня и заносим эти значения в журнал испытаний № 2 (табл. 2).

Для этого полученное опытным путем значение деформации испытываемого стержня y' (угла закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) сравниваем с соответствующим теоретическим значением ($\varphi^{\text{теор}}$), вычисленным по формуле (12), расхождение между ними не должно превышать 5 %, то есть:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi^{\text{опыт}} - \varphi^{\text{теор}}}{\varphi^{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% \leq 5\%.$$

13. По полученным в эксперименте значениям угла закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$ исследуем зависимость деформации (угла закручивания φ) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$).

Из формулы (12) видно, что можно построить зависимость φ от m ($M_{\text{кр}}$).

Для этого:

– по полученным значениям y' (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) и соответствующим им внешним нагрузкам m строим график 2, показывающий зависимость деформации круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$).

Для чего по оси абсцисс откладываем величины внешней нагрузки m , а по оси ординат – соответствующие значения измеренных деформаций y' (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемых стержней (показания индикатора с учетом поправок $y_{\text{соб}}$).

Образец графика 2

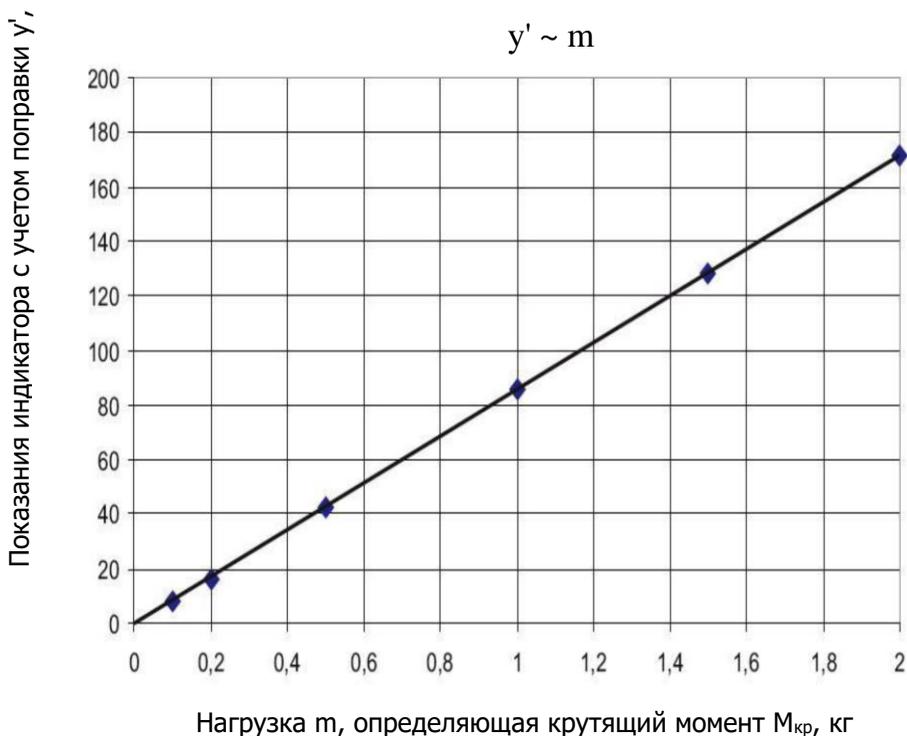


График 2. Зависимость деформации круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{кр}$)

7. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Нельзя допускать к испытательной установке лиц, не ознакомившихся с ее устройством.

2. Запрещается устанавливать образец и приводить в действие испытательную машину без разрешения преподавателя.

3. Лабораторную работу нужно выполнять в соответствии с выше приведенной инструкцией.

4. Нагружение испытываемого образца проводить аккуратно, при этом нельзя превышать максимальную допускаемую нагрузку на стержень. Грузы не бросать.

5. При перерывах в работе испытательная установка не должна находиться в нагруженном состоянии.

6. Во время испытания запрещается трогать образец руками.

7. Необходимо находиться от испытываемого образца на расстоянии не менее 0,5м.

8. Запрещается подходить к лабораторным установкам, не связанным с выполнением данной работы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель лабораторной работы?

2. Какое сечение стержня называется поперечным сечением?

3. Какой вид деформации стержня называется кручением?

4. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечном сечении стержня при кручении?

5. Чему равен крутящий момент в рассматриваемом сечении стержня?
6. Правило знаков для крутящего момента?
7. Какие деформации получают поперечные сечения стержня при кручении?
8. Что называется углом закручивания φ ?
9. Какие гипотезы положены в основу теории кручения круглых стержней?
10. По какой формуле вычисляются касательные напряжения при кручении?
11. В каких точках поперечного сечения возникают наибольшие касательные напряжения?
12. Какая величина называется полярным моментом инерции?
13. Какая величина называется полярным моментом сопротивления?
14. По какой формуле вычисляется угол закручивания φ ?
15. Что такое относительный угол закручивания θ ?
16. Что называется жесткостью поперечного сечения стержня при кручении?
17. Какая зависимость существует между E , G и μ ?

9. ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

1. ЭБС «Znanium.com».
2. НЭБ eLibrary.ru.
3. ЭБС НТБ ДГТУ.
4. СКИФ ДГТУ.
5. ЭБС «Университетская библиотека online».

6. ЭБС IPRbooks.
7. Справочный модуль «Энциклопедии ZNANIUM.com».
8. ЭБС «BOOK.ru».
9. БД «Электронная библиотека технического вуза. Консультант студента».
10. БД «Book on Lime».
11. ЭБС «ЮРАЙТ».

10. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.В. Сопротивление материалов /А.В. Александров, В.Д. Потапов. – Москва: Высшая школа, 2011.
2. Варданян Г.С. Сопротивление материалов (с основами строительной механики) /Г.С. Варданян, Н.М. Атаров. – Москва: ИНФРА-М, 2011.
3. Еремин В.Д. Сопротивление материалов и техническая механика (Часть I): методическая разработка по подготовке студентов к промежуточной (итоговой) аттестации /В.Д. Еремин. – Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2018.
4. Еремин В.Д. Сопротивление материалов и техническая механика (Часть II): методическая разработка по подготовке студентов к промежуточной (итоговой) аттестации /В.Д. Еремин. – Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2018.
5. Еремин В.Д. Специальные вопросы сопротивления материалов / В.Д. Еремин, С.В. Литвинов, А.И. При- тыкин. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023.
6. Степин П.А. Сопротивление материалов

/П.А. Степин. – Санкт-Петербург: Лань, 2010.

7. Копнов В.А. Сопротивление материалов: Руководство для решения задач и выполнения лабораторных и расчетно-графических работ /В.А. Копнов, С.Н. Кривошапка. – Москва: Высшая школа, 2003.

8. Тимофеев С.И. Сопротивление материалов /С.И. Тимофеев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2014.

Приложение А
Образец отчета по лабораторной работе

ОТЧЕТ

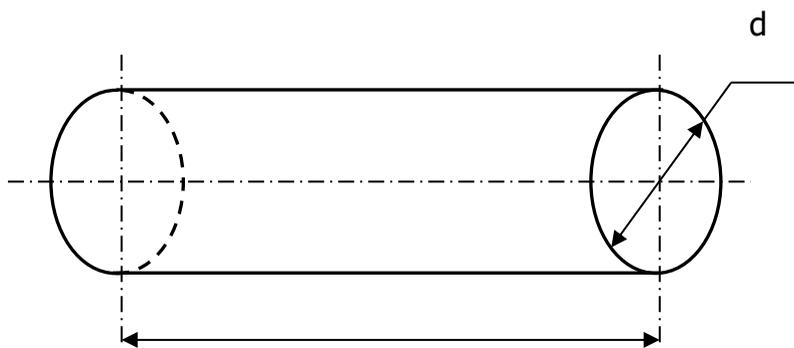
по лабораторной работе № _____

**«Испытание стержней
круглого поперечного сечения на кручение»**

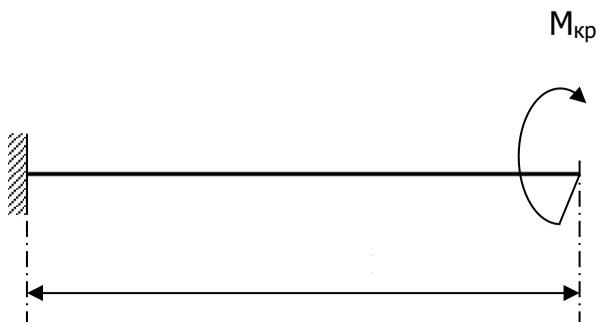
Дата проведения работы _____

1. Наименование машины – испытательная машина
WP 100

2. Эскиз испытываемых образцов:



3. Расчетная схема испытываемого стержня:



ЖУРНАЛ ИСПЫТАНИЙ №1

Определение собственной /внутренней/ деформации испытательной установки WP 100

1. Характеристика испытываемых образцов:
 - фактическая длина испытываемого образца $L_0 = 50\text{мм}$;
 - расчетная длина испытываемого образца $L \approx 0\text{мм}$;
 - фактический размер круглого поперечного сечения стержня $d = 10\text{мм}$.

2. К испытываемому образцу поочередно прикладывается внешняя нагрузка массой $m = 0,1\text{кг}, 0,2\text{кг}, 0,5\text{кг}, 1,0\text{кг}, 1,5\text{кг}$ и $2,0\text{кг}$, то есть сила $P = 0,981\text{Н}, 1,96\text{Н}, 4,91\text{Н}, 9,81\text{Н}, 14,7\text{Н}$ и $18,6\text{Н}$.

Следовательно, в испытываемом образце соответственно возникает крутящий момент (4) $M_{кр} = 98,1\text{Н}\cdot\text{мм}, 196\text{Н}\cdot\text{мм}, 491\text{Н}\cdot\text{мм}, 981\text{Н}\cdot\text{мм}, 1470\text{Н}\cdot\text{мм}$ и $1860\text{Н}\cdot\text{мм}$.

3. Обработка данных испытаний:

3.1. Снимаем показания индикатора y и заносим полученные значения в табл. 1.

3.2. По полученным значениям строим график 1, показывающий зависимость собственной (внутренней) деформации $y_{соб}$ испытательной установки от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{кр}$), то есть

$$y_{соб} \sim m (M_{кр}).$$

Таблица 1

Внешняя нагрузка, кг	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
Показания индикатора y , (собственная деформация испытательной машины $y_{\text{соб}}$), В ММ						
Показания индикатора y (собственная деформация испытательной машины $y_{\text{соб}}$), В 0,01 ММ						

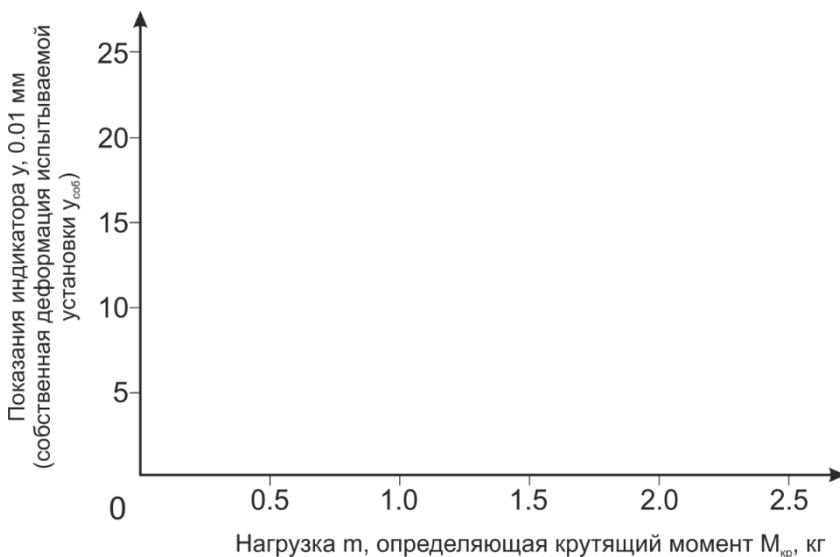


График 1. Зависимость собственной (внутренней) деформации испытываемой установки от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{\text{кр}}$)

ЖУРНАЛ ИСПЫТАНИЙ № 2

«Исследование зависимости деформации (угла закручивания) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки (крутящего момента)»

1. Характеристика испытываемых образцов:

- материал испытываемых образцов - алюминий (Al);
- модуль упругости второго рода $G = 0,269 \cdot 10^5$ Н/мм²;
- нормативная длина испытываемого образца $L_0 = 440$ мм;
- расчетная длина испытываемого образца $L = 400$ мм;
- фактические размеры круглого поперечного сечения стержня $d = 10,0$ мм;

2. К испытываемому образцу на правом свободном конце поочередно прикладывается внешняя нагрузка массой $m = 0,1$ кг, $0,2$ кг, $0,5$ кг, $1,0$ кг, $1,5$ кг и $2,0$ кг, то есть сила $P = 0,981$ Н, $1,96$ Н, $4,91$ Н, $9,81$ Н, $14,7$ Н и $18,6$ Н.

Следовательно, в испытываемом образце соответственно возникает крутящий момент (4) $M_{кр} = 98,1$ Н·мм, 196 Н·мм, 491 Н·мм, 981 Н·мм, 1470 Н·мм и 1860 Н·мм.

3. Обработка данных испытаний

Вычисляем по соответствующим формулам (7) значение полярного момента инерции поперечного сечения балки I_p , фактическую жесткость испытываемого

стержня при кручении $G \cdot I_p$, деформации испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, теоретические значения деформаций испытываемого стержня (угол закручивания $\varphi^{\text{теор}}$), погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого стержня и заносим полученные значения в табл. 1 и 2:

- полярный момент инерции поперечного сечения стержня:

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{3,14 \cdot 10,0^4}{32} = 981 \text{ мм}^4$$

- фактическая жесткость испытываемого стержня при кручении:

$$GI_p = 0,269 \cdot 10^5 \cdot 981 = 26,4 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2.$$

Эксперимент № 1 - внешняя нагрузка массой $m = 0,1 \text{ кг}$, то есть сила $P = 0,981 \text{ Н}$, следовательно, крутящий момент $M_{\text{кр}} = 98,1 \text{ Н} \cdot \text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi_{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{\text{кр}} \cdot L}{G \cdot I_\rho} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi_{\text{опыт}} - \varphi_{\text{теор}}}{\varphi_{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Эксперимент № 2 - внешняя нагрузка массой $m = 0,2 \text{ кг}$, то есть сила $P = 1,96 \text{ Н}$, следовательно крутящий момент $M_{\text{кр}} = 196 \text{ Н} \cdot \text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi_{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi_{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi_{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{\text{кр}} \cdot L}{G \cdot I_\rho} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi_{\text{опыт}} - \varphi_{\text{теор}}}{\varphi_{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Эксперимент № 3 - внешняя нагрузка массой $m = 0,5\text{кг}$, то есть сила $P = 4,91\text{Н}$, следовательно крутящий момент $M_{кр} = 491\text{Н}\cdot\text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi^{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{кр} \cdot L}{G \cdot I_p} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi^{\text{опыт}} - \varphi^{\text{теор}}}{\varphi^{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Эксперимент № 4: внешняя нагрузка массой $m = 1,0\text{кг}$, то есть сила $P = 9,81\text{Н}$, следовательно крутящий момент $M_{кр} = 981\text{Н}\cdot\text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi^{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{\text{кр}} \cdot L}{G \cdot I_\rho} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi^{\text{опыт}} - \varphi^{\text{теор}}}{\varphi^{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Эксперимент № 5 - внешняя нагрузка массой $m = 1,5 \text{ кг}$, то есть сила $P = 14,7 \text{ Н}$, следовательно крутящий момент $M_{\text{кр}} = 1470 \text{ Н} \cdot \text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi^{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{\text{кр}} \cdot L}{G \cdot I_\rho} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi^{\text{опыт}} - \varphi^{\text{теор}}}{\varphi^{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Эксперимент № 6 - внешняя нагрузка массой $m = 2,0\text{кг}$, то есть сила $P = 18,6\text{Н}$, следовательно крутящий момент $M_{кр} = 1860\text{Н}\cdot\text{мм}$:

– деформация (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$) испытываемого стержня y' с учетом поправки на значение собственной (внутренней) деформации испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм:

$$y' = y - y_{\text{соб}} =$$

– теоретическое значение деформации (угла закручивания $\varphi^{\text{теор}}$) испытываемого круглого стержня, в градусах:

$$\varphi^{\text{теор}} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{M_{кр} \cdot L}{G \cdot I_p} =$$

– погрешность между опытным и теоретическим значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi^{\text{опыт}} - \varphi^{\text{теор}}}{\varphi^{\text{опыт}}} \right| \cdot 100\% =$$

Таблица 1

Расчетная длина испытываемого стержня L , в мм	Фактические размеры сечения стержня d , в мм	Полярный момент инерции I_p сечения испытываемого стержня, в мм ⁴	Фактическая жесткость испытываемого стержня $G \cdot I_p$, в Н·мм ²
400	10	981	$26,4 \cdot 10^6$

Таблица 2

Внешняя нагрузка m , кг	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
Величина деформации y , полученная опытным путем (показания индикатора), в мм						
Собственная деформация испытательной машины $y_{\text{соб}}$, в мм						
Величина деформации y' (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$), полученная опытным путем, с учетом поправки $y_{\text{соб}}$, в мм						

Продолжение табл. 2

Внешняя нагрузка m , кг	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
Величина деформации (угол закручивания $\varphi^{\text{теор}}$), вычисленная по формуле, в мм						
Погрешность между опытным $\varphi^{\text{опыт}}$ и теоретическим $\varphi^{\text{теор}}$ значениями деформации испытываемого круглого стержня, в %						
Величина деформации y' (угол закручивания $\varphi^{\text{опыт}}$), полученная опытным путем, с учетом поправки $y_{\text{соб}}$, в 0,01мм						

4. По полученным значениям строим график 2, показывающий зависимость деформации y' (угла закручивания φ) круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{кр}$), то есть $\varphi \sim m (M_{кр})$.

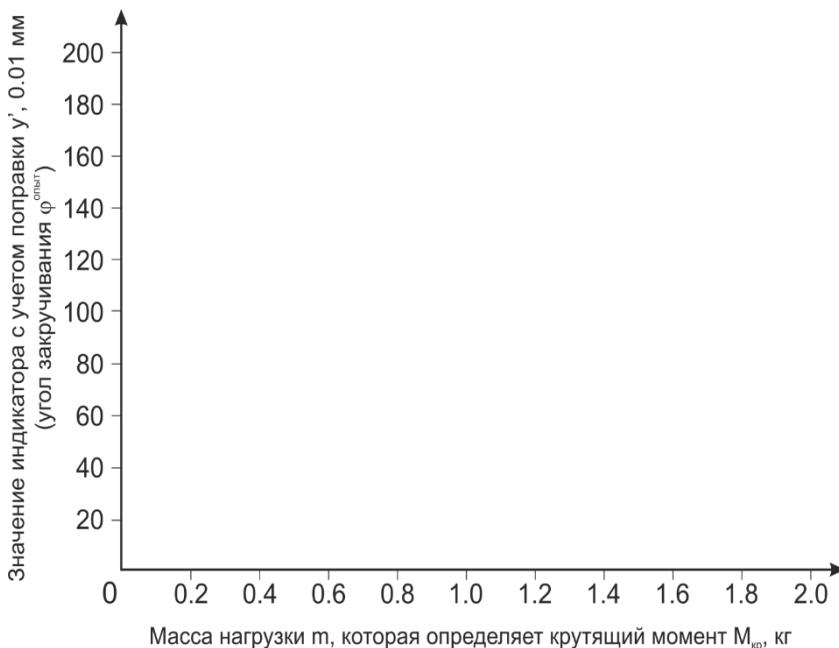


График 2. Зависимость деформации круглого стержня постоянного поперечного сечения от величины внешней нагрузки m (крутящего момента $M_{кр}$).



Приложение Б

Образец оформления титульного листа лабораторной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (ДГТУ)**

**Кафедра «Строительная механика
и теория сооружений»**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

на тему:

**«Испытание стержней круглого поперечного
сечения на кручение»**

Выполнил студент группы _____

(Ф.И.О.)

Принял _____

(Ф.И.О.)

Ростов-на-Дону

20 _____