

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
«КОЛЛЕДЖ КУЛЬТУРЫ И СПОРТА»

**ПРАКТИКУМ  
И  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**ОП.02 Техническая механика**

Специальность: 08.02.02 Строительство и эксплуатация  
инженерных сооружений

Москва, 2024

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование лабораторных работ</b>	<b>стр.</b>
<b>РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА</b>		
<b>Тема 1.2. Плоская система сходящихся сил.</b>		
1	Определение равнодействующей плоской системы сходящихся сил	4
<b>Тема 1.4. Плоская система произвольно расположенных сил.</b>		
2	Изучение произвольной плоской системы сил	6
3	Определение опорных реакций балки.	13
<b>РАЗДЕЛ 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ</b>		
<b>Тема 2.2. Растяжение и сжатие</b>		
4	Испытание стального образца на растяжение	20
<b>Тема 2.3. Практические расчеты на срез и смятие.</b>		
5	Испытание образца на срез.	20
<b>Тема 2.5. Кручение</b>		
6	Опытная проверка закона Гука при кручении	33
<b>Тема 2.6. Изгиб</b>		
7	Определение линейных и угловых перемещений балки при прямом изгибе.	40
<b>Тема 2.7. Устойчивость сжатых стержней</b>		
8	Определение критической силы сжатого стержня.	44

## Лабораторная работа №1

### Определение равнодействующей плоской системы сходящихся сил.

#### Цель работы:

произвести графическое и аналитическое исследование плоской системы сходящихся сил и выявить, уравновешена ли заданная система сил.

#### Теоретическое обоснование.

Главный вопрос, который решают, исследуя плоскую систему сходящихся сил, - является ли данная система сил уравновешенной, или не уравновешенной. Необходимым и достаточным признаком уравновешенности системы сходящихся сил является равенство нулю их равнодействующей силы. Определение равнодействующей можно производить двумя способами: графическим (построение силового многоугольника) и аналитическим (метод проекций).

#### Порядок выполнения работы

1. Задать плоскую систему сходящихся сил:  $F_1, F_2, F_3$
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки и работой на ней.
3. Поместить установку на ровной горизонтальной поверхности стола.
4. Произвести настройку устройства визуального контроля до совпадения рисок на подвижном диске с рисками транспорта посредством натяжения пружин регулировочными гайками.
5. Надеть на палец устройства визуального контроля петли с капроновыми тросиками и привязанными подвесами.
6. Установить подвижные блоки в выбранные положения и перебросить через ролики блоков тросики с подвесами.
7. Нагрузить подвесы заданными наборами гирь (не превышающими 10 Н) и определить углы наклона натянутых тросиков к осям X и Y.
8. Проверить, уравновешена ли система сил, приложенная к подвижному диску. Если нет, то смещение пальца на подвижном диске совпадает с направлением равнодействующей данной системы сил.
9. Установить один из капроновых тросиков в направлении, обратном смещению пальца неподвижного диска, и нагружать прикрепленный к нему подвес до тех пор, пока риски подвижного диска не совпадут с рисками шкалы транспорта. Сумма весов грузов на этом подвесе будет равна модулю уравновешивающей силы. Равнодействующая  $R$  (полученная экспериментально) по величине равна  $F_{ув}$  и противоположна ей по направлению
10. Графическим способом построить в масштабе силовой многоугольник и определить модуль и направление ( $\varphi_{гр}$ ) равнодействующей силы  $R_{гр}$
11. Вычислить проекции равнодействующей, суммируя проекции заданных

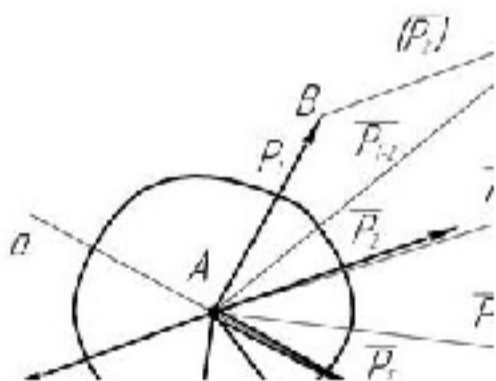
$$\text{сил. } R_x = \sum_{i=1}^n F_{ix} = 0; \quad R_y =$$

Определить модуль равнодействующей  $R_{анал}$  (аналитическое определение) по

$$\text{формуле } R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2},$$

Определить направление равнодействующей угол  $\varphi$

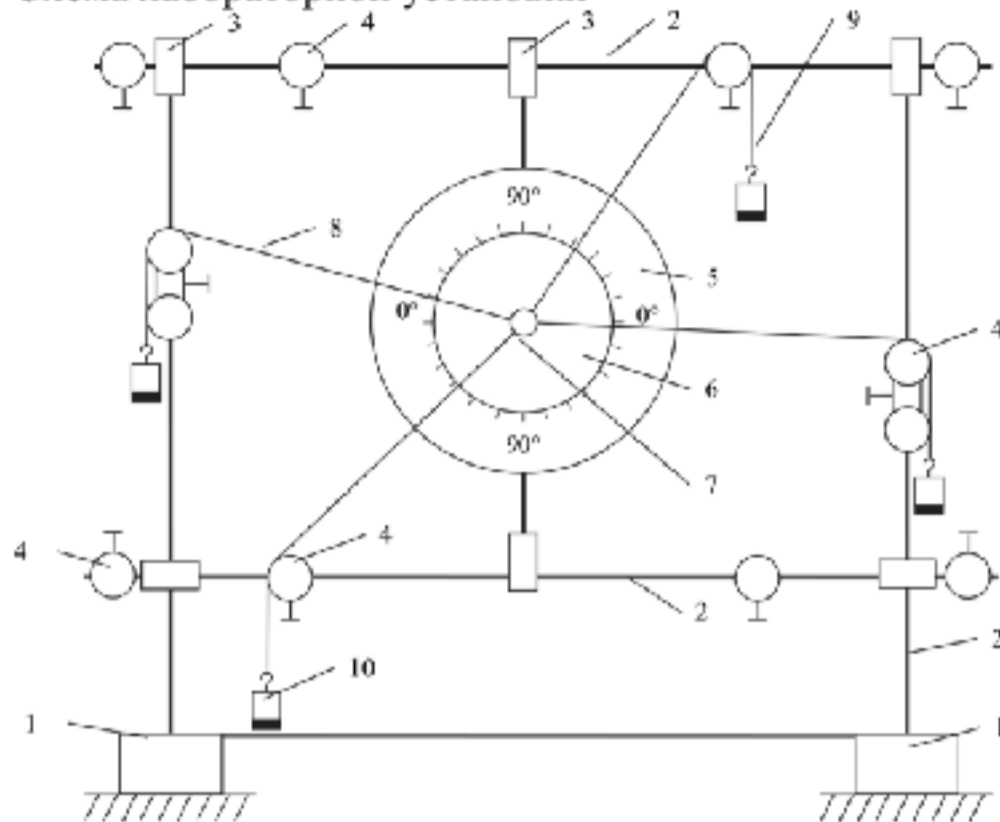
$$\varphi = \arctg R_x / R_y$$



12. Определить погрешности

$$\Delta R = \frac{R_{\text{граф}} - R_{\text{анал}}}{R_{\text{анал}}}$$

Схема лабораторной установки



Она состоит из двух оснований 1 с рамой, собранной из стальных цилиндрических стержней 2 с помощью втулок 3. На раме закреплены десять подвижных блоков с роликами 4. В центральной части установки крепится устройство визуального контроля 5, представляющее собой чашку с неподвижным транспортом и подвижным диском на пружинах 6, в центре которого установлен палец 7 для крепления капроновых тросиков 8. К тросикам привязываются подвесы 9 с тарированными грузами 10.

**Контрольные вопросы и задания**

1. Какая система называется плоской системой сходящихся сил?
2. Какая система сил называется эквивалентной данной?
3. Какая сила называется равнодействующей?
4. Какая сила называется уравновешивающей?
5. Назовите геометрическое условие равновесия плоской системы сходящихся сил.
6. Назовите аналитическое условие равновесия плоской системы сходящихся сил.
7. Как определить равнодействующую графическим способом?
8. Как определить равнодействующую аналитическим способом?
9. Как определить модуль равнодействующей аналитическим способом?
10. Как определить направление равнодействующей аналитическим способом?
11. Назовите аксиомы статики, которые использовались в данной лабораторной работе.

## Лабораторная работа №2

### Изучение произвольной плоской системы сил.

#### Цель работы:

провести графическое и аналитическое приведение (упрощение) плоской системы произвольно расположенных сил к данной точке. Провести экспериментальное подтверждение возможности замены произвольной плоской системы сил одной главной силой и одним главным моментом сил. Выявить признаки уравновешенной системы сил.

#### Краткие теоретические сведения.

**Основная теорема статики:** любую систему сил, действующих на твердое тело, можно привести к силе, равной главному вектору системы сил и паре сил, векторный момент которой равен главному моменту системы сил относительно точки, выбранной за центр приведения.

Под *плоской системой произвольно расположенных сил* понимают совокупность сил, расположенных в одной плоскости, линии действия которых не пересекаются в одной точке. Плоскую систему произвольно расположенных сил можно значительно упростить, приведя силы к одному центру  $O$ .

В результате чего в этом центре будет приложена сила  $R$ , называемая *главным вектором*, и к телу в целом будет приложена пара сил с моментом  $M_O$ , называемым *главным моментом относительно этого центра*.

Главный вектор  $R$  равен геометрической сумме сил, входящих в данную систему, а главный момент  $M_{гл}$  – алгебраической сумме моментов сил относительно центра приведения, включая и алгебраическую сумму моментов пар сил:

$$R = \sum F_k, \quad M_{гл} = \sum m_O(F_k).$$

Численное значение главного вектора определяют по его проекциям на координатные оси:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2},$$

где  $R_x = \sum F_{kx}$  и  $R_y = \sum F_{ky}$ .

Направление главного вектора находят по косинусам направляющих углов:

$$\cos(R, i) = R_x/R,$$

$$\cos(R, j) = R_y/R,$$

где  $i, j$  – направление осей  $Ox$  и  $Oy$ .

Условиями равновесия тела под действием произвольной плоской системы сил являются равенство нулю главного вектора и главного момента относительно любого центра  $O$ :

$$R_{гл} = 0 \quad \text{и} \quad M_{гл} = 0.$$

Эти условия выполняются, если

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_{kx} = 0 \\ \sum F_{ky} = 0 \\ \sum m_O(F_k) = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

Эти условия можно сформулировать следующим образом: для равновесия плоской системы сил, действующих на твердое тело, необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций сил на каждую из двух взаимно перпендикулярных осей координат, лежащих в плоскости действия сил, равнялись нулю и сумма алгебраических моментов этих сил относительно любой точки, лежащей в плоскости действия сил, также равнялась нулю.

Уравнения (2.1) называются основными уравнениями равновесия.

Существуют еще две формы уравнений равновесия:

Одно из уравнений проекций заменяется еще одним уравнением моментов.



$$\left. \begin{aligned} \Sigma m_A (F_k) &= 0 \\ \Sigma m_B (F_k) &= 0 \\ \Sigma F_{kx} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

Оба уравнения проекций заменяются уравнениями моментов.

$$\left. \begin{aligned} \Sigma m_A (F_k) &= 0 \\ \Sigma m_B (F_k) &= 0 \\ \Sigma m_C (F_k) &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

В системе уравнений (2) ось  $x$  не должна быть перпендикулярной к прямой, проходящей через центры  $A$  и  $B$ , а центры  $A$ ,  $B$  и  $C$  в системе (3) не должны лежать на одной прямой.

При приведении к какой-либо точки могут встретиться следующие случаи:

а) система сил приводится к главному вектору и главному моменту;

$$R_{\text{гл}} \neq 0; \quad M_{\text{гл}} \neq 0$$

б) система сил приводится к одной равнодействующей-главному вектору системы:

$$R_{\text{гл}} \neq 0; \quad M_{\text{гл}} = 0$$

в) система приводится к паре сил, момент которой равен главному моменту:  $M_{\text{гл}} \neq 0$ ;

$$R_{\text{гл}} = 0$$

$$M_{\text{гл}}$$



Рис.1.

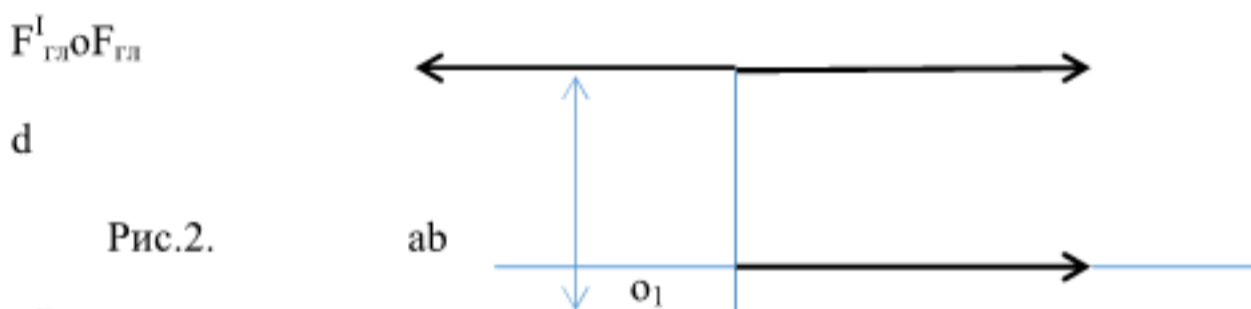


Рис.2.

$$F_{\text{гл}}^{\text{II}}$$

На рисунке 1 показан  $F_{\text{гл}} \neq 0$  и главный момент  $M_{\text{гл}} \neq 0$ . Проведем эквивалентное преобразование главного момента таким образом, чтобы модуль сил, образующих пару, был равен модулю главного вектора. При этом плечо пары  $d = M_{\text{гл}} / F_{\text{гл}}$

Разложим пару сил  $F_{\text{гл}}^{\text{I}}$  и  $F_{\text{гл}}^{\text{II}}$  так, чтобы сила  $F_{\text{гл}}^{\text{II}}$  была направлена в сторону противоположную главному вектору  $F_{\text{гл}}$  (Рис.2). При этом в точке  $O$  окажутся две силы  $F_{\text{гл}}$  и  $F_{\text{гл}}^{\text{II}}$  взаимно противоположные, равные по модулю и направленные по одной прямой. Так как эти силы уравновешены, их можно отбросить. Следовательно, относительно точки  $O_1$  система сил приведена к одной равнодействующей  $F_{\text{гл}}$ .

Таким образом, когда главный вектор и главный момент не равны нулю, можно найти такую линию  $ab$  (Рис.2), вдоль которой вся система сил может быть уравновешена одной силой.

Геометрическое сложение сил  $F_1, F_2, \dots, F_n$  основывается на построении в масштабе векторного многоугольника, замыкающая сторона которого представляет эту сумму и называется главным вектором  $R$  (рис.3.):

$$F_2$$

$$F_1$$

$$F_3$$

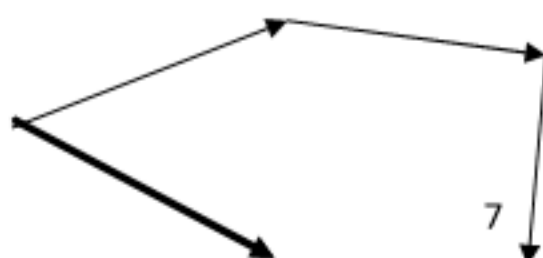


Рис.3.  
R



$$R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum F_k (k=1, 2, \dots, n).$$

Аналитическое сложение сил основано на известной теореме векторной алгебры: проекция вектора суммы на ось равна алгебраической сумме проекций слагаемых векторов на ту же ось, т. е.

$$R_x = F_1x + F_2x + \dots + F_nx = \sum F_kx,$$

$$R_y = F_1y + F_2y + \dots + F_ny = \sum F_ky$$

$$R_z = F_1z + F_2z + \dots + F_nz = \sum F_kz$$

Модуль (численное значение) главного вектора

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

Действие силы на твердое тело может вызвать вращательный эффект, который для плоской системы сил оценивается моментом силы относительно какой-либо точки  $O$  на плоскости (рис. 2.2):

$$m_O(F_1) = F_1 \cdot h_1; \quad m_O(F_2) = -F_2 \cdot h_2,$$

где  $h_1, h_2$  – плечи сил  $F_1$  и  $F_2$  относительно точки  $O$ .

Алгебраический момент силы относительно центра  $O$  равен взятому с соответствующим знаком произведению модуля силы на её плечо.

Плечом называется длина перпендикуляра, опущенного из точки  $O$  на линию действия соответствующей силы.

Момент считается положительным, когда сила стремится повернуть тело вокруг центра  $O$  против хода часовой стрелки, и отрицательным – когда по ходу часовой стрелки.

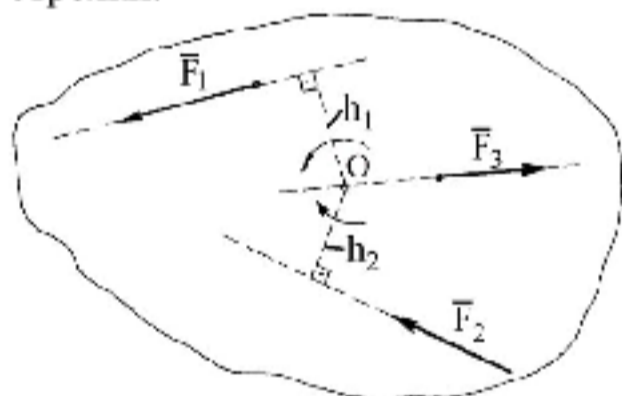
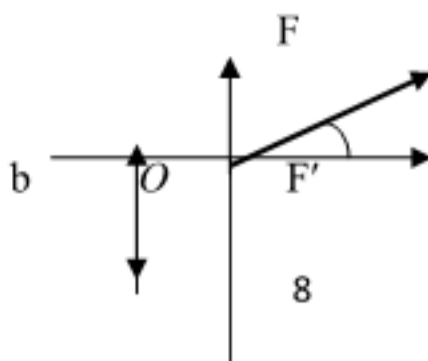


Рис 4.

Момент силы относительно точки равен нулю, если линия действия силы проходит через эту точку, так как при этом плечо равно нулю (например,  $m_O(F_3) = 0$ )

Вычисление момента силы относительно какой-либо точки во многих случаях упрощается, если эту силу разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие и применить теорему Вариньона, согласно которой момент равнодействующей сходящихся сил относительно любого центра равен сумме моментов составляющих сил относительно того же центра. Например, для равнодействующей силы  $F$  и ее составляющих  $F'$  и  $F''$  (рис. 5.) имеем  $m_O(F) = m_O(F') + m_O(F'')$ ,

$F''$   
 $\alpha$



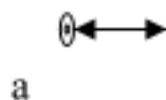


Рис.5.

где  $|F'| = F' = F \cos \alpha$ ,  $|F''| = F'' = F \sin \alpha$ .

Таким образом,  $m_O(F) = -F \cos \alpha(b) + F \sin \alpha(a)$ .

Вращательный эффект вызывает также пара сил.

*Парой сил* называется система двух равных по модулю, параллельных и направленных в противоположные стороны сил, действующих на абсолютно твёрдое тело. Кратчайшее расстояние между линиями действия сил пары называется плечом пары. ( $h$ )

*Момент пары* равен по модулю произведению модуля одной из сил на плечо пары. (рис.6).

$$m(F_1 F_2) = F \cdot h F_1 = F_2$$

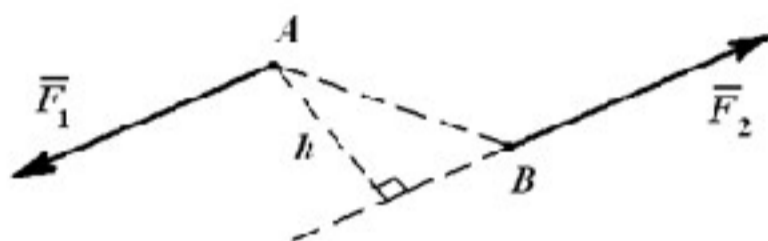


Рис.6.

Пара сил, стремящаяся вращать тело против хода часовой стрелки, считается положительной, а по ходу часовой стрелки – отрицательной.

Две пары сил, имеющие одинаковые моменты, эквивалентны друг другу. Систему пар сил, расположенных в одной плоскости, можно заменить одной эквивалентной парой, момент которой  $M$  равен алгебраической сумме моментов пар:

$$M = m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum m_k (k=1, 2, \dots, n).$$

#### Назначение лабораторной установки.

Установка для изучения плоской системы произвольно расположенных сил ТМт02 применяется для проведения лабораторных работ при изучении раздела «Теоретическая механика» курса технической механики.

#### Устройство и принцип работы.

Установка (см. рис.7) выполнена в настольном исполнении и состоит из 2-х оснований 1 с рамой, собранной из стальных цилиндрических стержней 2 с помощью втулок 3. На раме закреплены шесть подвижных блоков с роликами 4. В центральной части установки закреплена шкала 5 и подвижный диск 6 с отверстиями для штырей с капроновыми тросиками. К тросикам привязываются подвесы 7 с тарированными грузами и перекидываются через ролики.



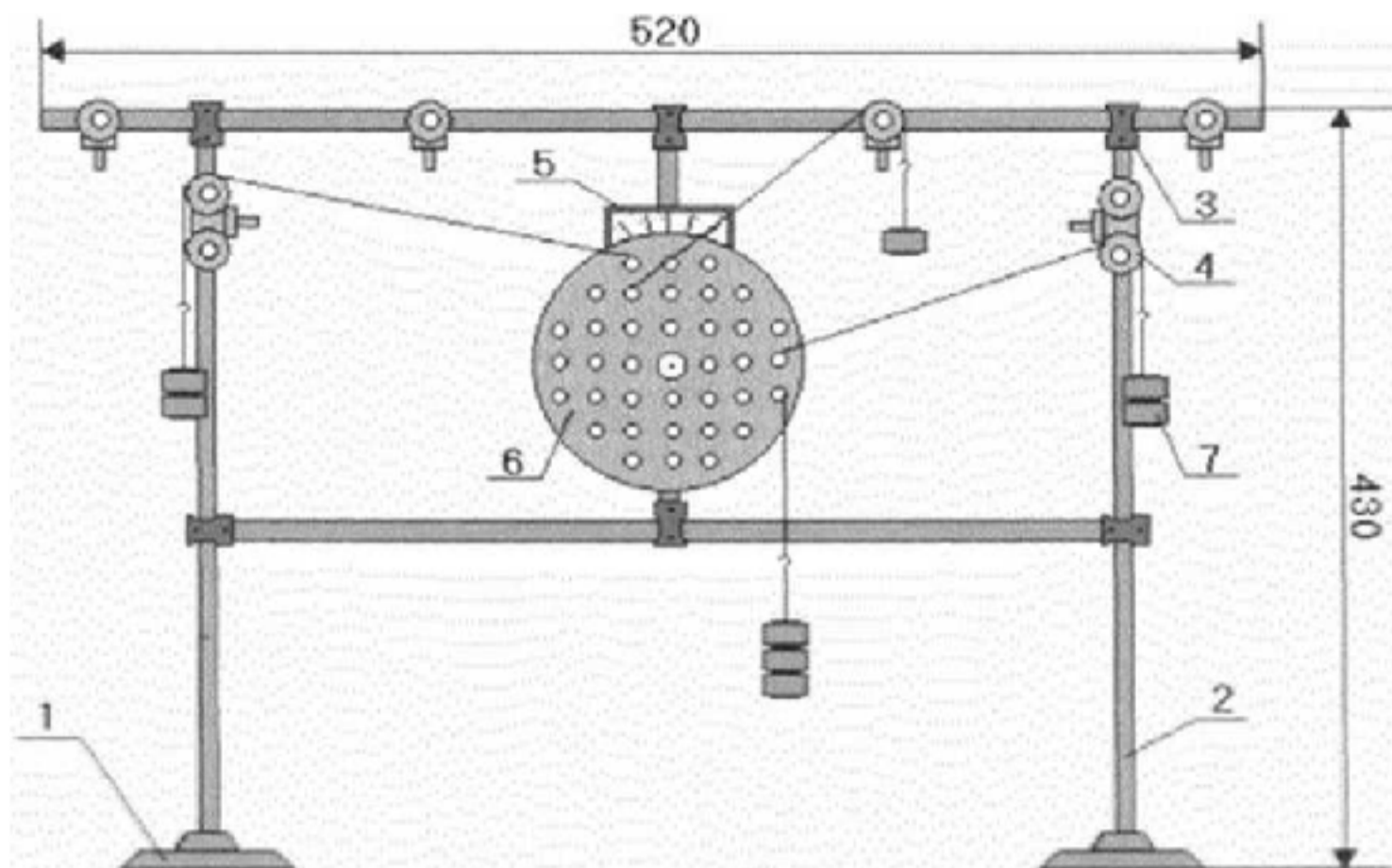


Рис.2. Установка ТМт-02: 1 - основание, 2 - цилиндрические стержни, 3 - втулка, 4 - блок с роликами, 5 - шкала, 6 - подвижный диск, 7 - подвес с тарированным грузом

Работа установки основана на принципе определения величины и направления равнодействующей силы посредством уравнивающей силы. Установка позволяет произвести экспериментальное подтверждение правила сложения плоской системы произвольно расположенных сил. Заданные силы должны быть кратными 1Н и не превышать 10Н. Углы между линиями действия устанавливаются от 0 до 360° и кратные 10°. Перемещая блоки с роликами по стержням рамы, требуется закрепить их согласно заданной схеме действия сил.

При выполнении лабораторной работы необходимо установить на 3 подвеса грузы заданной величины, при этом палец устройства визуального контроля под действием прикрепленных к нему тросиков с грузами переместится в направлении равнодействующей силы. Для создания уравнивающей силы нужно натянуть тросик на 4-м блоке в направлении, противоположном направлению равнодействующей силы, и нагружать 4-й подвес грузами до тех пор, пока не совпадут риски подвижного диска и транспортира. Величина силы определяется массой грузов на уравнивающем подвесе, а направление – углом силы и горизонтальной осью установки.

#### **Порядок выполнения работы**

Ознакомиться с устройством установки для экспериментального исследования плоской системы произвольно расположенных сил.

#### **Задание 1.**

Определить величину и направление момента, уравнивающего сумму моментов сил, действующего на твердое тело, имеющего неподвижную ось вращения.

#### **Ход работы**

1. Для плоской системы произвольно расположенных сил следует графическим способом построить в масштабе силовой многоугольник. Определить графически модуль и угол наклона главного вектора, числовое значение и направление главного момента.

2. Вычислить модуль и направление главного вектора и главного момента аналитически. Сравнить результаты, полученные графическим и аналитическим способом. Расхождение между результатами, полученными двумя различными способами не должно превышать 10%, в противном случае нужно проверить построения и вычисления и выявить ошибку.

Для сравнения результатов использовать формулы:

$$\Delta F_{\text{гр}} = \frac{F_{\text{гр. гр.}} - F_{\text{гр. анал.}}}{F_{\text{гр. анал.}}} \cdot 100\%$$

$$\Delta \varphi = \frac{\varphi_{\text{гр.}} - \varphi_{\text{анал.}}}{\varphi_{\text{анал.}}} \cdot 100\%$$

$$\Delta l = \frac{M_{\text{гр. граф.}} - M_{\text{гр. анал.}}}{M_{\text{гр. анал.}}} \cdot 100\%$$

3. Разместить установку на ровной горизонтальной поверхности стола.
4. Произвести совмещение рисок подвижного диска и неподвижной шкалы.
5. К диску, удерживаемому рукой от вращения, прилагают силы  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  с помощью тросиков, на которые подвешиваются грузы, соответствующие величине силы. При этом необходимо соблюдать величину углов, под которыми действуют силы.
6. Затем к диску крепят еще один тросик и нагружают его силой. Величина силы и угол, под которым он крепится, берутся из произведенных ранее расчетов, то есть натяжение этого тросика оказывается равным по величине и противоположно направленным по отношению к результирующему моменту сил, первоначально приложенных к диску.
7. Отпустив руку, диск должен находиться в состоянии равновесия, то есть риски диска и шкалы должны находиться в совмещенном положении.
8. Если это условие выполняется, то расчет, проведенный в практической части, оказался верным.

### Задание 2.

Демонстрация закона: момент сил, образующих пару относительно оси, равен моменту пары сил, независимо от расположения этой пары в плоскости действия, перпендикулярно этой оси.

#### Экспериментальная часть.

1. Произведите совмещение рисок подвижного диска и неподвижной шкалы.
2. К диску прилагается пара сил с помощью двух параллельно расположенных и противоположно направленных тросиков, натягиваемых одинаковыми грузами (линии действия не проходят через ось диска).
3. Путем подбора момент пары уравнивается моментом, который создается грузом, подвешенным на конце третьего троса.
4. Система находится в положении равновесия
5. Штырьки первых двух тросиков переставляются в другие отверстия таким образом, чтобы расстояния между линиями действия этих двух сил не изменилось.
6. Диск при этом остается в равновесии.

#### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Приборы и инструменты, необходимые для проведения лабораторной работы.
3. Система произвольно расположенных сил.
4. Силовой многоугольник (построенный в масштабном коэффициенте сил) для определения модуля и направления равнодействующей  $R$ .
5. Модуль равнодействующей  $R$  и направление, а также модуль и направление уравнивающей силы  $R_{\text{ур}}$ , полученное аналитическим путем по формулам.
6. Значение  $R$  и его направление, полученное практическим путем.
7. Выводы по выполненной работе.

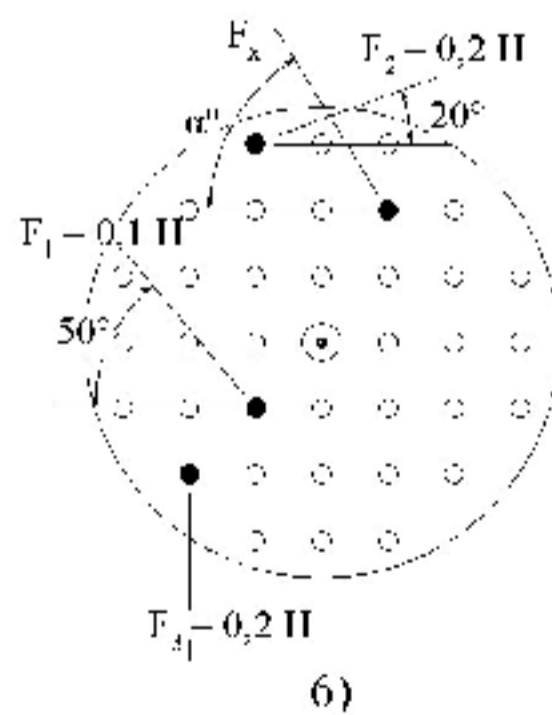
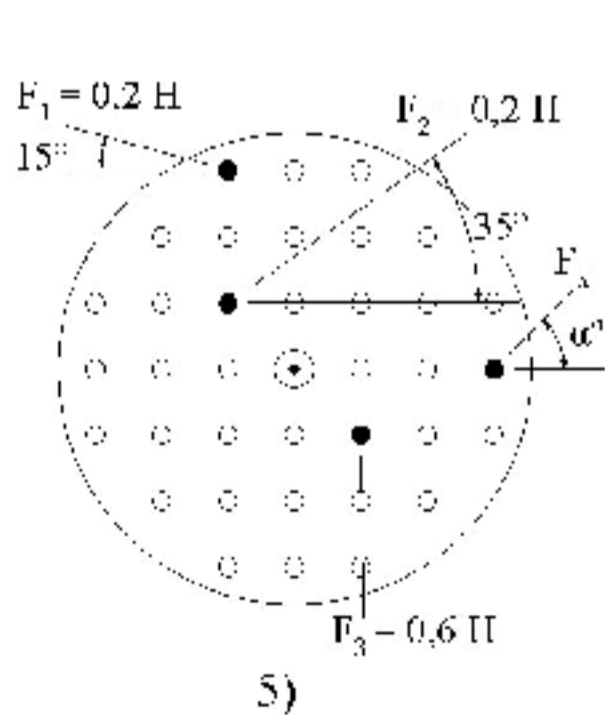
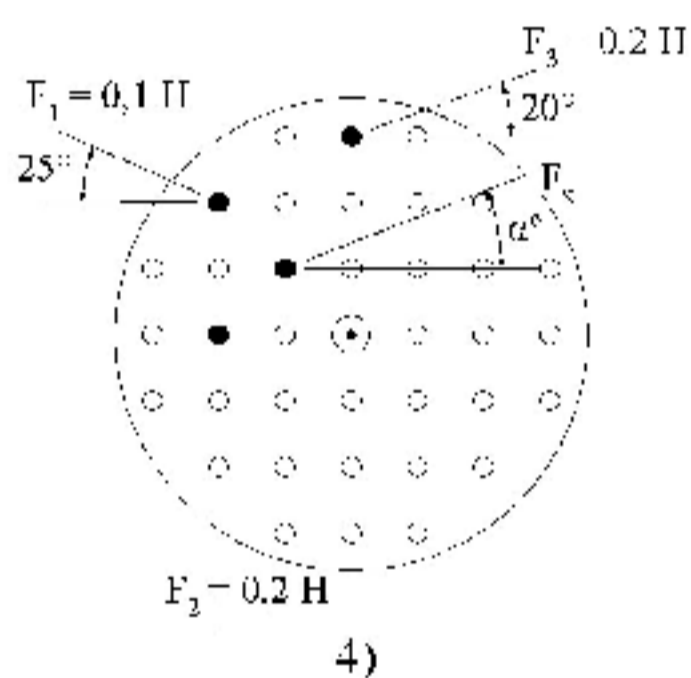
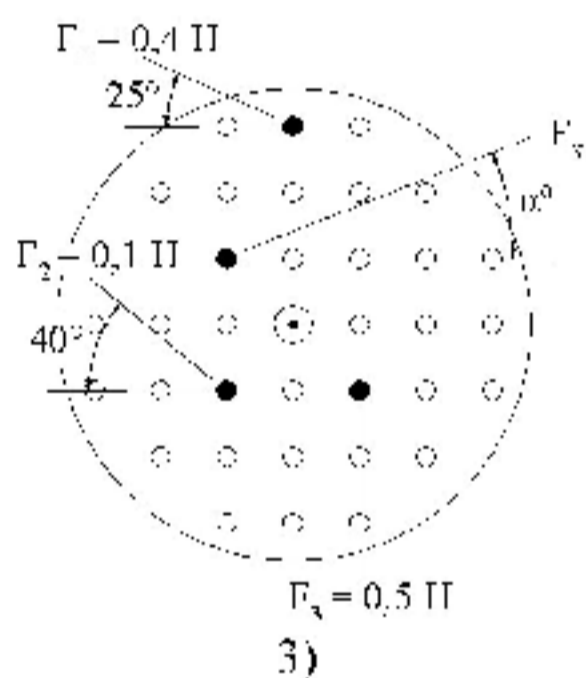
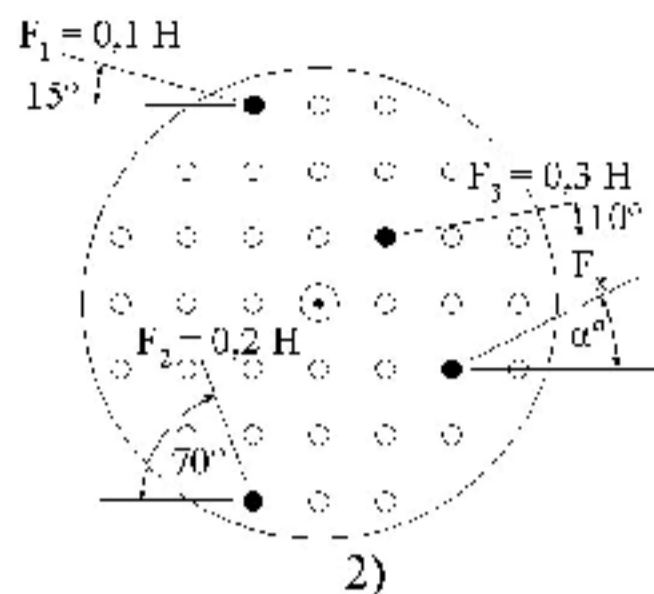
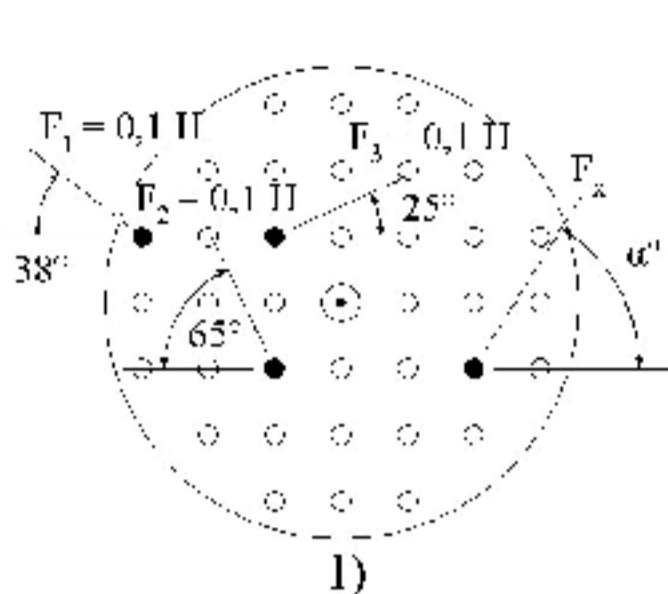
#### Контрольные вопросы.

1. Как определяется направление равнодействующей системы произвольно расположенных сил при построении векторного силового многоугольника?
2. Сформулируйте теорему Пуансо о приведении силы к точке.
3. Каковы условия и уравнения равновесия системы произвольно рас-

положенных сил в плоскости?

4. Сформулируйте теорему Вариньона о моменте равнодействующей.
5. Каковы условия и уравнения равновесия системы произвольно расположенных сил в пространстве?
6. Как формулируется план решения задач статики на равновесие сил?

## Варианты задания



## Лабораторная работа №3 Определение опорных реакций балок

### Цель работы:

Исследование балки находящейся на двух опорах. Ознакомиться с устройством опор балок, составить расчетные схемы балок и определить реакции их опор.

Теоретически определить реакции опор и проверить опытным путем.

### Теоретическое обоснование:

Балки встречаются во многих машинах и сооружениях и служат для восприятия сил, направленных перпендикулярно их продольной оси. Балки имеют специальные опорные устройства для сопряжения их с другими элементами конструкции и передачи на них усилий. Опоры балок можно разделить на следующие три типа:

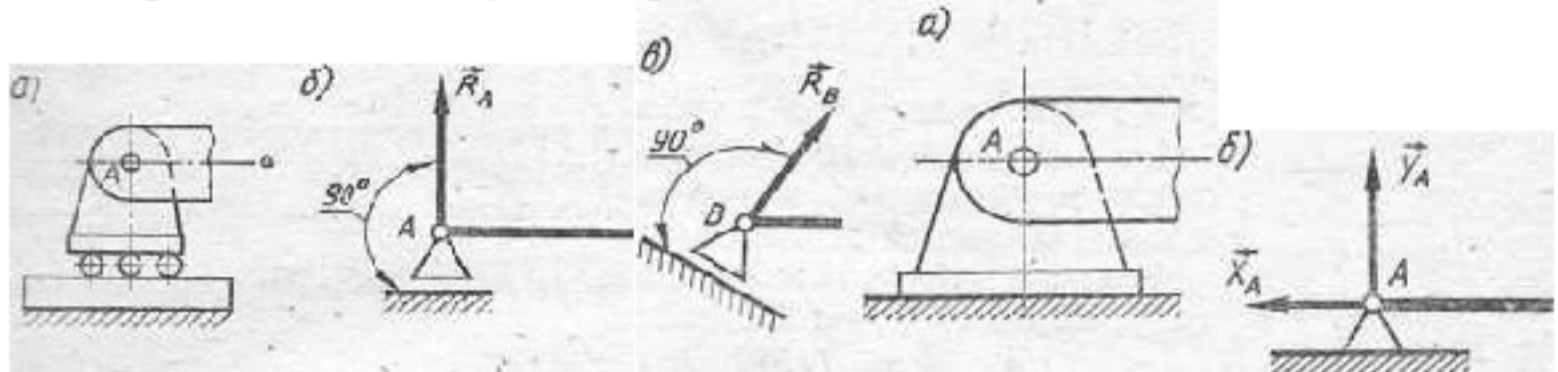


Рис. 1

Рис. 2

**Подвижная опора** (рис. 1 а). Соединение стержня с подвижной опорой допускает поворот стержня вокруг оси шарнира и линейное перемещение параллельно опорной плоскости. Здесь известны точка приложения опорной реакции

$R_A$ —центр шарнира и ее направление — перпендикуляр к опорной поверхности (трением катков об опорную поверхность пренебрегают). Схематическое изображение подвижной опоры показано на (рис. 1. б) в соответствии с ЕСКД ГОСТ 2-770—68 «Обозначения условные графические в схемах». ..

Необходимо иметь в виду, что опорная поверхность подвижной опоры может быть не параллельна оси балки (рис.2 в). Реакция опоры в этом случае с осью балки не образует прямой угол.

**Неподвижная опора** (рис. 2, а). Соединение стержня с неподвижной опорой допускает только поворот, стержня вокруг оси шарнира. В этом случае известна только точка приложения опорной реакции — центр шарнира, направление реакции неизвестно, так как оно зависит от нагрузки, приложенной к балке. Поэтому вместо полной реакции неподвижной опоры находят ее две взаимно перпендикулярные составляющие  $Y_A$  и  $X_A$ .

Схематическое изображение неподвижной опоры показано на рис.2, б в соответствии с ЕСКД ГОСТ 2.770—68.

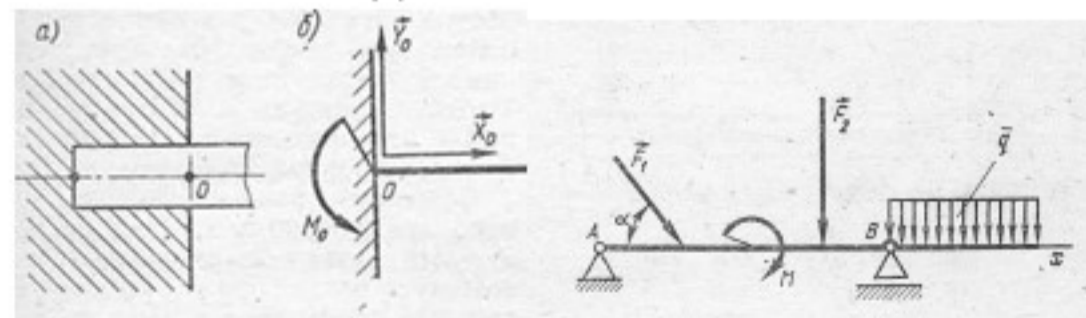


Рис.3

Рис. 4

**Жесткая заделка** (защемление) (рис. 3, а) не допускает ни линейных перемещений, ни поворота сечений закрепленного конца балки. Неизвестными для жесткой заделки являются не только направление реакций, но и точки их приложения, поэтому для определения опорной реакции следует найти две взаимно перпендикулярные составляющие  $Y_O$  и  $X_O$  и реактивный момент  $M_O$  относительно центра тяжести опорного сечения балки. На рис. 3, б показано схематическое изображение жесткой заделки.

Равновесие балки под действием любой системы внешних сил, расположенных в одной плоскости, может быть обеспечено одной жесткой заделкой или двумя опорами: подвижной и неподвижной.

На рис.4 показана балка, нагруженная сосредоточенными силами  $F_1$  и  $F_2$ , равномерно распределенной силой интенсивностью  $q$  и парой сил, момент которой равен  $M$ .

Для равновесия плоской произвольной системы сил необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух (непараллельных) координатных осей равнялась нулю и суммы их моментов относительно любого центра, лежащего в плоскости действия сил, равнялась нулю. Реакции опор балок определяются с помощью трех уравнений равновесия:

$$\sum M_a(F_i) = 0; \sum M_b(F_i) = 0;$$

$$\sum M_b F(i) = 0; \quad (1) \quad \sum X_i = 0; \quad (2)$$

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0;$$

Приведенные здесь формы уравнений равновесия представляет собой равенство нулю алгебраических сумм моментов относительно двух точек  $A$  и  $B$  — центров шарниров опор балок и равенство нулю алгебраической суммы проекций на ось  $x$  и  $y$ . Ось  $x$  совпадает с продольной осью балки, ось  $y$  направлена вертикально вверх.

При определении реакций опор двухопорной балки лучше использовать первую систему уравнений. Для проверки правильности решения используют уравнение суммы проекций сил на ось  $Y$ .

$$\sum Y_i = 0;$$

Экспериментально опорные реакции балок можно определить на специальной установке, позволяющей воспроизводить заданную систему сил, приложенную к балке, а реакции опор фиксировать силоизмерительными приборами.

#### Устройство и принцип работы

Установка ТМт 03М для определения опорных реакций балок (рис 5) состоит из основания 1 с двумя опорными стойками 2, на которых установлена стальная балка 3 трубчатого сечения. Закрепленные на пружинящих корпусах 4 головки измерительные 5 позволяют определить модули и направление горизонтальных и вертикальных составляющих опорных реакций с погрешностью не более 5%.

Равномерно распределенная нагрузка на балку создается посредством набора стальных брусков 10, свободно устанавливаемых сверху. Нагружение балки сосредоточенными силами осуществляется при помощи грузов 6 и 8, подвешиваемых на тросиках, концы которых прикреплены к подвижным ползунам 9, которые можно передвигать вдоль балки. Один из тросов 9 (на котором подвешивается груз 8) может отклоняться от вертикали роликом 11, установленным на конце штанги штатива 12, закрепленного на основании 1. Штанга с роликом может передвигаться по вертикали и фиксируется винтом.

Для приложения к балке пары сил служит поперечина 7, на концах которой также установлены ролики, охватываемые тросом 13. Один коней этого троса крепится к стойке 12, а к другому концу подвешивается груз 14, сила тяжести которого равна каждой из двух сил пары, нагружающей балку. Серьги 15 служат для подвешивания грузов и регулировки длин тросов.

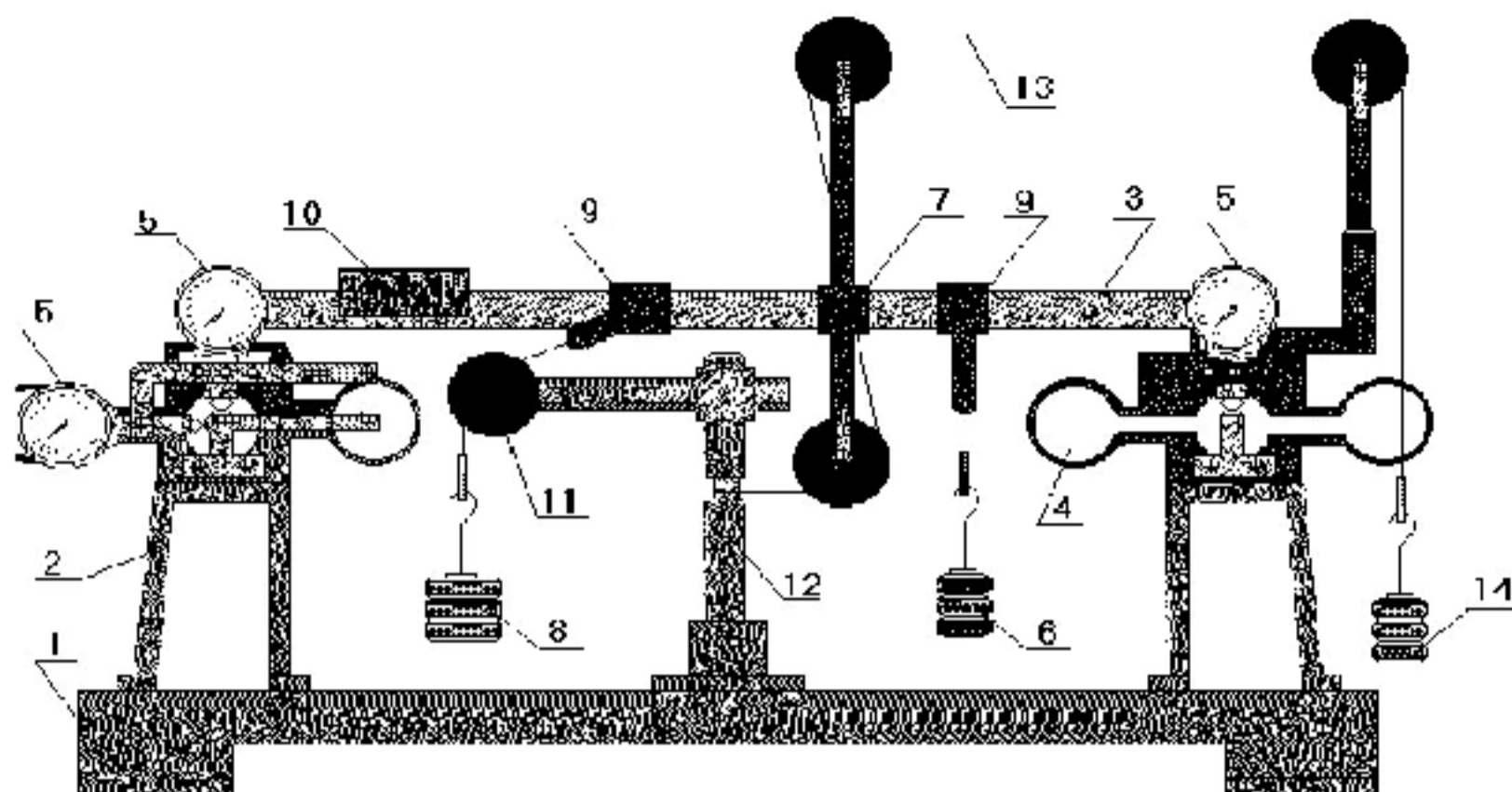


Рис. 5

Рис.5. Установка ТМт 03М; 1- основание (станина); 2-опрные стойки; 3- стальная балка; 4- пружинящие опоры; 5- измерительные головки; 6- груз сосредоточенной силы; 7- поперечина; 8- груз сосредоточенной силы; 9- подвижный блок; 10- набор стальных брусков; 11- ролик; 12- штанга штатива; 13- трос; 14- груз момента.

#### Ход работы.

1. Освободить балку от каких либо нагрузок (снимите все нагрузки).
2. Выставьте приборы на «0», если это необходимо.
3. Внимательно изучите конструкцию установки.
4. Изучите задание.
5. Нагрузите балку в соответствии с заданием ( в соответствии с Вашим вариантом).
6. Запишите показания приборов в таблицу. Обратите внимание на градуировку шкал  $1 \text{ дел.} = 2 \text{ Н}$ .
7. Произведите теоретический расчет  $R_{Ax}$ ,  $R_{Ay}$ ,  $R_{By}$ .
8. Сравните результаты, полученные в эксперименте с результатами расчета, определите погрешность. Погрешность определяют по

$$\frac{(R_{\text{эксп}} - R_{\text{теор}})}{R_{\text{эксп}}} \cdot 100\%$$

Таблица

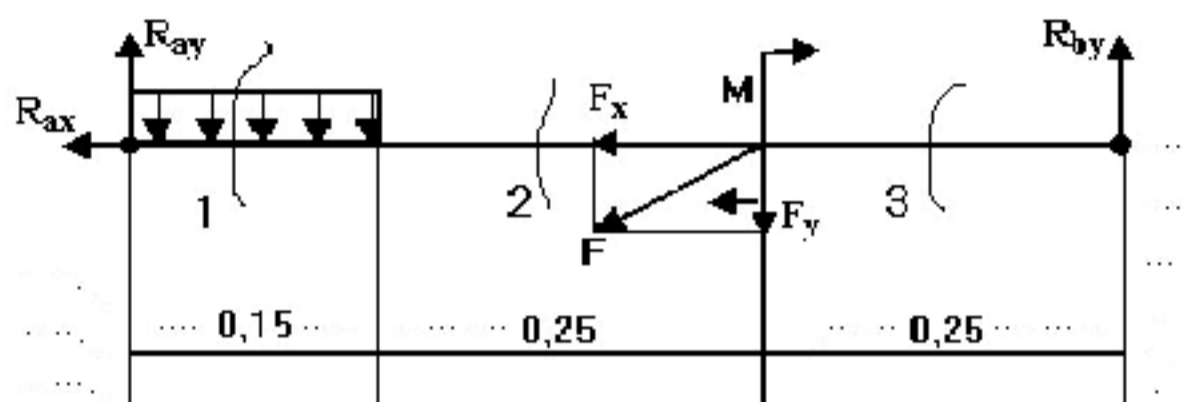
	Расчетные данные (Н)	Экспериментальные данные (Н)	Погрешность(%)
$R_{Ax}$			
$R_{Ay}$			
$R_{By}$			

#### Контрольные вопросы

1. Сколько независимых уравнений равновесия можно составить для плоской системы параллельных сил?
2. Сколько независимых уравнений равновесия можно составить для произвольной системы сил?
3. Укажите, какие составляющие реакций опор балок возникают в подвижной опоре?
4. Укажите, какие составляющие реакций опор балок возникают в неподвижной опоре?
5. Укажите, какие составляющие реакций опор балок возникают в жесткой заделке?
6. Какую точку целесообразно применять за центр моментов при определении реакций опор балок?



Пример выполнения теоретической части задания



$$F = 5 \text{ Н}; q = 3 \text{ Н/м};$$

$$M = 8 \text{ П·м};$$

$$F_x = F \cos 45^\circ;$$

$$F_y = F \sin 45^\circ;$$

$$Q = 0,15q$$

Определений реакций.

$$1) \sum F_{kx} = 0;$$

$$2) \sum m_a(F_k) = 0;$$

$$-R_{ax} - F_x = 0;$$

$$-Q \cdot 0,15/2 - F_y \cdot 0,4 - M + R_{by} \cdot 0,65 = 0;$$

$$R_{ax} = -F_x, \quad R_{ax} = -5 \frac{\sqrt{2}}{2} = -3,5 \text{ (Н)};$$

$$R_{by} = \frac{3 \cdot 0,15 \cdot 0,075 + 5 \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 0,4 + 8}{0,65} = 14,45 \text{ (Н)};$$

$$3) \sum m_b(F_k) = 0;$$

$$4) \sum F_{ky} = 0;$$

$$R_{ay} \cdot 0,65 - M + q \cdot 0,585 + F_y \cdot 0,25 = 0;$$

$$R_{ay} - Q - F_y + R_{by} = 0;$$

$$R_{ay} = \frac{3 \cdot 0,585 \cdot 0,15 + 5 \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 0,25 + 8}{0,65} = -10,5 \text{ (Н)};$$

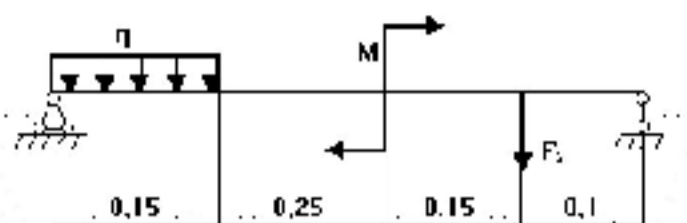
$$10,5 - 0,45 - 5 \frac{\sqrt{2}}{2} + 14,45 = 0;$$

$$0 = 0.$$

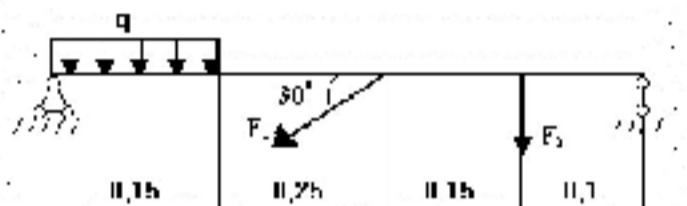
## Варианты заданий

Варианты нагружения для всех вариантов:  $F_1 = 4 \text{ Н}$ ;  $F_2 = 6 \text{ Н}$ ;  
 $q = 3,75 \text{ Н/м}$ ;  $M = 5 \text{ Н·м}$ .

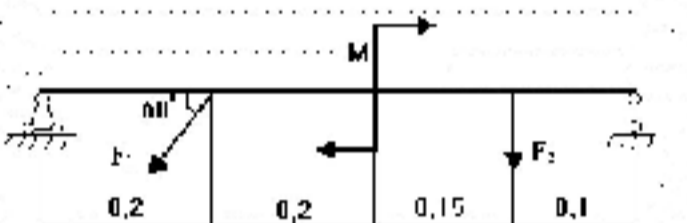
1



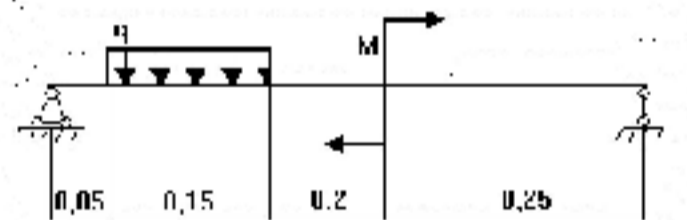
2



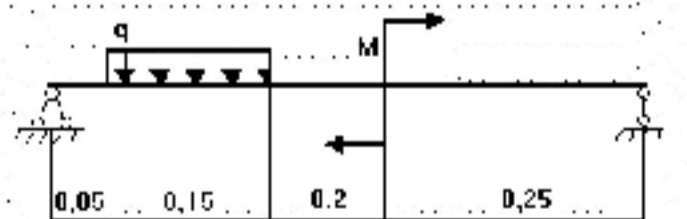
3



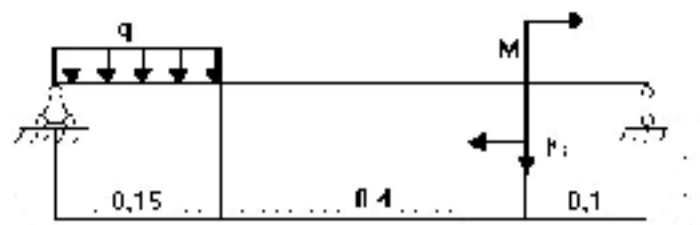
4



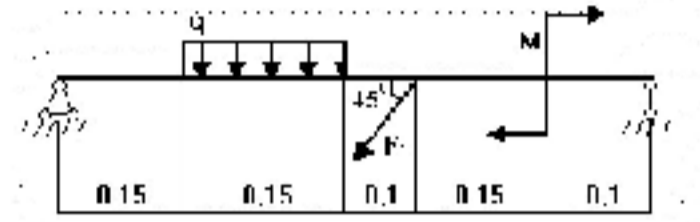
5



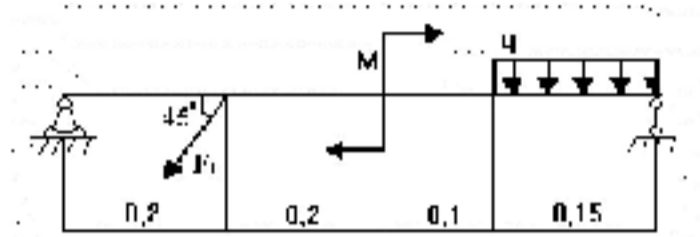
6



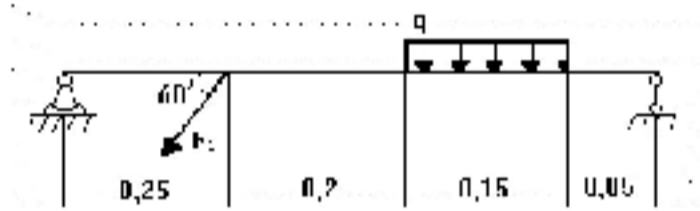
7



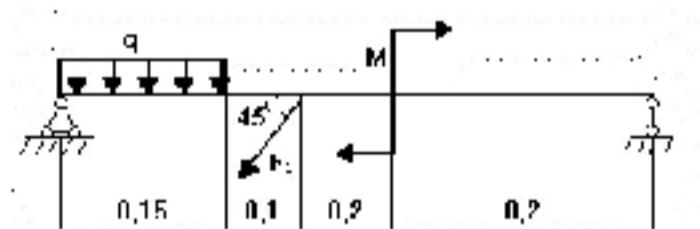
8



9



10



**Лабораторная работа №4**  
**Испытание материалов на растяжение**  
**Механические характеристики материалов**

Механические характеристики материалов, получаемые в результате испытаний, являются основой для расчёта на прочность и жесткость реальных деталей, поэтому студенты должны ознакомиться с методами испытаний и используемой испытательной аппаратурой.

Для проведения лабораторных работ применяются сложное оборудование и точные чувствительные приборы, которые для успешного проведения работ должны быть тщательно подготовлены и проверены. При проведении лабораторных работ по определению механических характеристик материалов студенты сами измеряют размеры образцов и устанавливают их в испытательные машины. При тщательной подготовленной работе точность полученных результатов будет зависеть от внимательного отношения студентов к проведению измерений: измерение поперечных размеров образца, отчёты по шкалам измерительных приборов и т.д., поэтому в каждой конкретной работе следует добиваться той точности, которая может быть достигнута на применяемом оборудовании и приборах. Ввиду ограниченного времени для проведения лабораторных работ студенты должны предварительно ознакомиться с предстоящей работой, а также с устройством испытательных машин и приборов измерения, применяемых в данной работе. К проведению следующей лабораторной работы студент допускается только после предоставления им отчёта по предыдущей работе. До проведения лабораторных работ, прежде чем допустить студентов к испытательным машинам, их следует предупредить о строгом соблюдении всех правил техники безопасности во избежание несчастных случаев.

**Требования техники безопасности.**

При проведении испытаний на разрывной машине ИМ-4Р необходимо выполнять следующие требования безопасности:

1. Любые действия на неработающей машине производить только под наблюдением преподавателя.
2. Во время испытания закрывать образец щитком во избежание попадания в лицо осколков металла при его разрыве.
3. Испытания проводить под непосредственным наблюдением преподавателя.

**Цель работы:**

1. Провести испытание металлического образца на растяжение до разрушения.
2. Получить диаграмму растяжения
3. Изучить поведение материала при растяжении, установить механические характеристики материала
4. Определить характеристики пластичности материала образца; предел прочности, предел текучести, остаточное относительное удлинение при разрыве.

**Оборудование:**

1. Разрывная машина
2. Набор образцов
3. Штангенциркуль
4. Калькулятор

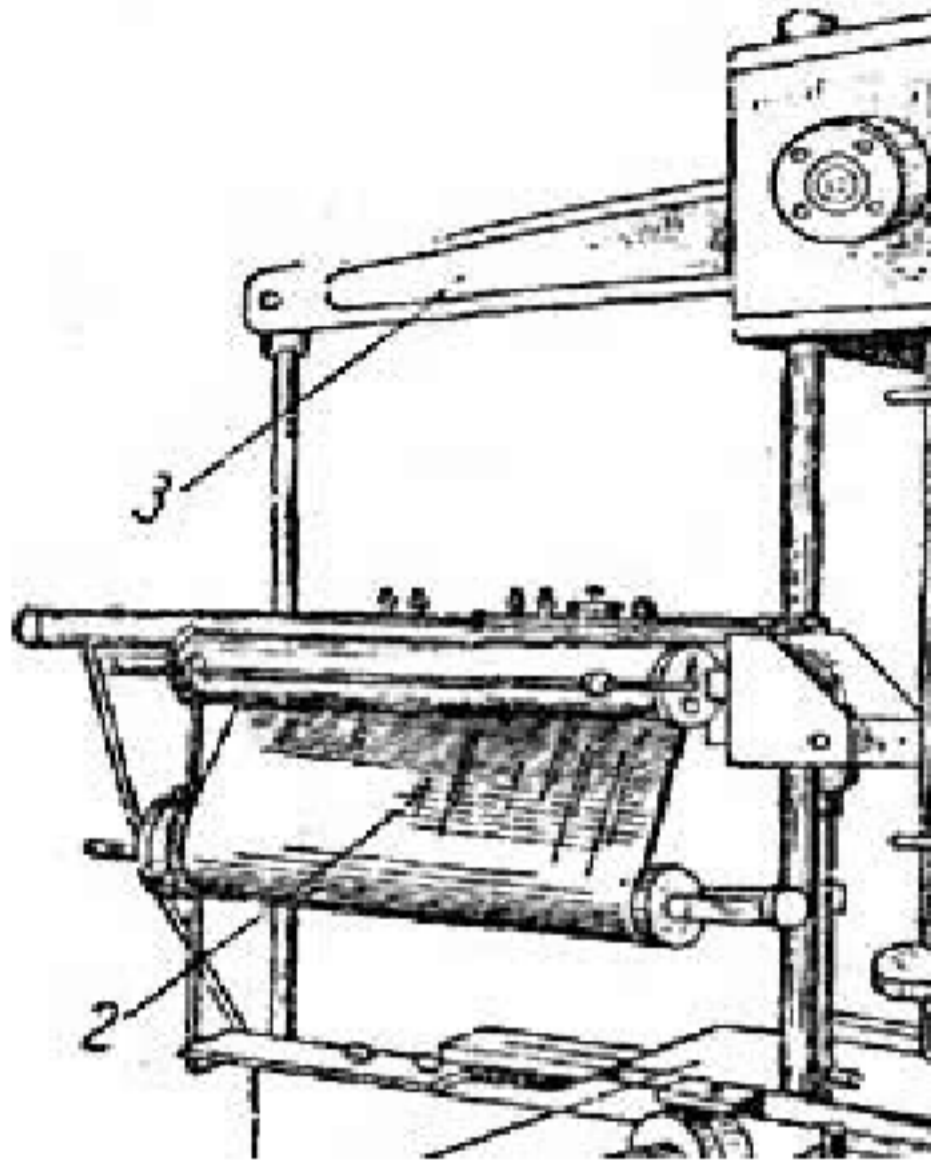
**МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ.**

Для проведения испытаний на растяжение используем машину ИМ-4Р с механическим приводом (рис.1 )

На рисунке показан общий вид *разрывной* 4-тонной машины. Схема ее работы такова:

1. Образец 5 зажимается в захваты машины 4.
2. Нижний захват опускается с помощью механического привода 1, смонтированного в нижней части машины.
3. Верхний захват связан с маятником 3, который, отклоняясь на определенный угол, уравнивает силу, тянущую образец вниз.

4. Угол отклонения маятника соответствует нагрузке, прикладываемой к образцу
5. Эта нагрузка, а также растяжение образца отмечаются на диаграммном аппарате<sup>2</sup> в виде *диаграммы деформации*



Испытательная машина ИМ-4Р относится к типу испытательных машин-прессов для испытаний на растяжение-сжатие образцов малых размеров при нагрузках, не превышающих 40 кН. При помощи специальных приспособлений на этой же машине можно производить испытания на срез и изгиб.

Кинематическая схема испытательной машины ИМ-4Р показана на рис. 2. Она содержит следующие основные узлы.

1. Нагружающий механизм (рис. 2) включает в себя электродвигатель 1, трехступенчатый редуктор 2 (две первые ступени червячные, третья - зубчатая), винтовую пару, состоящую из гайки с зубчатым колесом 3 и ходового винта 4.

Для ручного нагружения служит рукоятка 5.

2. Силоизмерительный механизм состоит из рычага первого рода 6 с отношением плеч 1:40 и маятника 7 с противовесами 8. Измеряемое усилие регистрируется на шкале 9 указателем 10.

3. Диаграммный аппарат содержит барабан 11 для протяжки бумаги, подвижную каретку 12 с пером (фломастером), валик для рулонной бумаги 13 и коническую пару 14.

Нижняя опора 15 установлена на торце ходового винта 4, верхняя опора 16 связана с рычагом 6 силоизмерительного механизма. Между опорами устанавливается приспособление для закрепления образца 17 с испытуемым образцом.

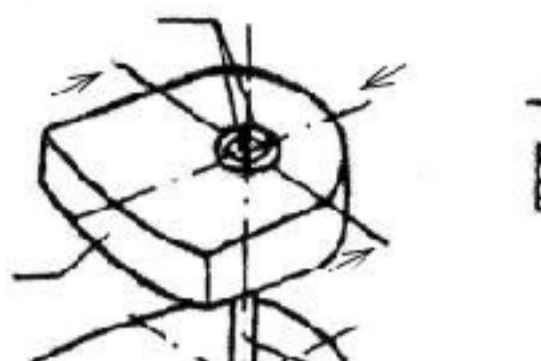
При включении машины вращение вала электродвигателя передается через редуктор силовой гайке 3 и одновременно конической паре 14 вращения барабана 11. Ходовой винт 4 перемещается вниз (вверх) и деформирует образец со скоростью  $V = 1$  мм/мин. При этом барабан 11 протягивает бумагу со скоростью  $V_6 \approx 100$  мм/мин.

Угол отклонения маятника и перемещение каретки прямо пропорционально усилию  $F$ , действующему на образец.

Масштаб диаграммы по нагрузке: 1 мм соответствует 100 Н.

Масштаб записи по оси удлинений 100/1.

При испытании на растяжение образец должен быть закреплен в захватах машины таким образом, чтобы не возникали перекосы и прилагаемая нагрузка действовала по продольной оси образца.



Приспособление для закрепления образца  
**Теоретическая часть**

Испытание на растяжение является наиболее распространенным видом испытания материалов, т.к. при нем наиболее ярко выявляются характеристики прочности и пластичности материалов, а так же определяется качество материала, выпускаемого металлургической промышленностью..

При выборе материала для тех или иных элементов конструкции, при расчете их на прочность большое значение имеют такие характеристики, как предел текучести, предел прочности, относительное удлинение. Возможность определить их дает диаграмма растяжения.

Результаты испытания образца на растяжение наиболее наглядно можно представить диаграммой, выражающей зависимость удлинения от нагрузки.

Проводят статические испытания на специальных разрывных машинах, при которых нагрузка плавно повышается от нулевого значения до разрушающей нагрузки. В результате испытания устанавливаются важнейшие механические характеристики материала, образцы которого прошли испытания. К ним относятся прочностные характеристики и характеристики пластических свойств материала.



Вид пластического разрушения

**Пластичное  
разрушение**



**Хрупкое  
разрушение**

Вид хрупкого разрушения

На рисунках показано, как выглядит пластичное и хрупкое разрушения. Первое происходит в виде скольжения кристаллографических плоскостей металлической структуры под действием касательных напряжений, второе – в результате отрыва под действием нормальных напряжений.

## Механические характеристики материала

1. предел текучести -  $\sigma_T$ ;
2. предел прочности -  $\sigma_B$ ;
3. напряжение при разрыве -  $SK$ ;
4. относительное остаточное удлинение при разрыве -  $\delta$ ;
5. удельная работа -  $U$ , затрачиваемая на разрыв образца;
6. относительное сужение в шейке -  $\psi$ .

**Целью испытания является определение механических характеристик материалов.**

К ним относятся:

1.  $\sigma_{пц}$  - предел пропорциональности - наибольшее напряжение до которого справедлив закон Гука

$$\sigma_{пц} = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

где  $F_{пц}$  – нагрузка соответствующая пределу пропорциональности;

$A_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца.

2.  $\sigma_y$  - предел упругости - наибольшее напряжение, при котором в образце не возникнет остаточных деформаций

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}, \quad (2)$$

где  $F_y$  – нагрузка соответствующая пределу упругости.

3.  $\sigma_T$  - предел текучести - напряжение, при котором происходит рост пластических деформаций без заметного увеличения нагрузки.

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}, \quad (3)$$

где  $F_T$  – нагрузка соответствующая пределу упругости.

4.  $\sigma_{пч}$  - предел прочности – наибольшее условное напряжение, которое может выдержать до разрушения,

$$\sigma_{пч} = \frac{F_{\max}}{A_0}, \quad (4)$$

где  $F_{\max}$  – наибольшая нагрузка которую может выдержать образец.

5. относительное остаточное удлинение при разрыве  $\varepsilon$  - величина, характеризующая пластичность материала

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}, \quad (5)$$

где  $\Delta \ell$  – относительное остаточное удлинение;

$\ell_0$  – абсолютное удлинение образца.

6. относительное остаточное сужение  $\psi$  характеризует пластичность материала

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0}, \quad (6)$$

где  $\Delta A$  – относительное остаточное уменьшение площади поперечного сечения;

$A_0$  – абсолютное остаточное уменьшение площади поперечного сечения.

Эти характеристики имеют большое значение как при выборе материала для элементов конструкции, так и при расчёте их на прочность.

В результате испытаний, если разрывная машина снабжена самопишущим аппаратом, получают диаграмму растяжения в координатах  $F - \Delta \ell$ . Для удобства исследований её перестраивают и изображают в координатах  $\sigma - \varepsilon$ . Эту диаграмму называют условной.

### Диаграмма растяжения

Характер диаграммы растяжения зависит от свойств испытываемого материала, и для различных материалов эти диаграммы значительно отличаются друг от друга.

На рисунке 13 приведена диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали, вычерченная диаграммным прибором разрывной машины. Диаграмма вычерчена в координатах  $F$ ,  $\Delta l$  за время испытаний, начиная с приложения нагрузки и кончая его разрушением.

$F$  – растягивающая сила;

$\Delta l_{\text{полн}}$  – абсолютное удлинение.

Диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали - Ст3.

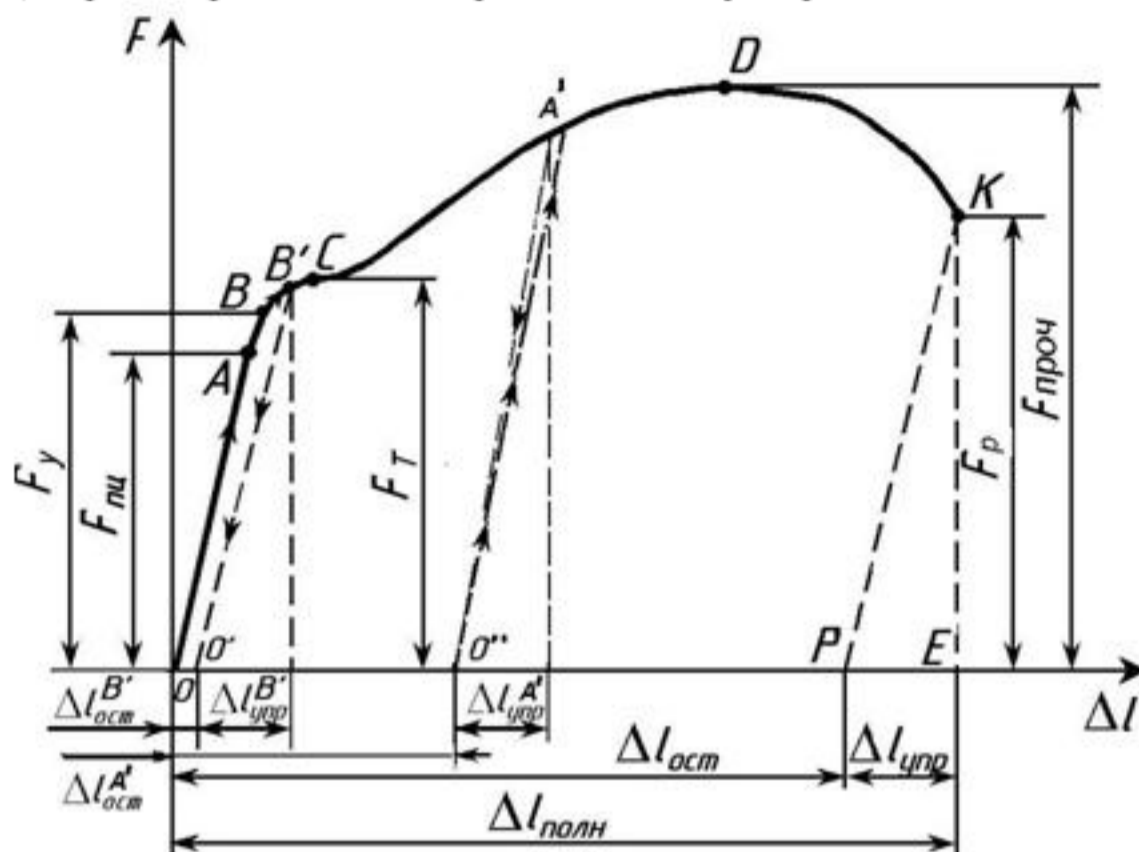


Рис.3

Рассмотрим характерные участки и точки этой диаграммы, а также соответствующие им стадии деформирования образца

Начальный горизонтальный и криволинейный участок диаграммы является результатом незначительного смятия головок образца в местах их соприкосновения с захватом и устранением различных зазоров в механизме машины. Этот участок диаграммы не связан с деформацией самого образца и его исключают, принимая за начало координат диаграммы точку 0 пересечения продолжения прямолинейного участка диаграммы с осью абсцисс.

Первый участок изображается прямой наклонной линией 0А. На этом участке связь между растягивающей силой  $F$  и деформацией  $\Delta l$  подчиняется закону Гука, то есть нагрузка возрастает пропорционально удлинению  $F_{\text{пц}} = k \Delta l$ . Эта пропорциональность впервые была замечена в 1670 г. Робертом Гуком и получила в дальнейшем название Закона Гука. Величина силы  $F_{\text{пц}}$ , до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала. Деформация на этом участке является упругой и носит обратимый характер, а удлинения оказываются очень малыми и полностью исчезают после снятия нагрузки. Нагрузка на диаграмме обозначена через  $F_{\text{пц}}$  и используется для вычисления предела пропорциональности.

Напряжение, вызванное этой силой, называется пределом пропорциональности и вычисляется по формуле:

$\sigma_{\text{пц}}$

Пределом пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$  называется наибольшее напряжение, до которого существует прямопропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией.



Зона 0В называют зоной упругости. Здесь возникают только упругие, очень незначительные деформации. Данные, характеризующие эту зону, позволяют определить значение модуля упругости E.

После достижения предела пропорциональности деформации начинают расти быстрее, чем нагрузка и диаграмма становится криволинейной. На этом участке в непосредственной близости от точки А находится точка В, соответствующая пределу упругости.

Пределом упругости называют максимальное напряжение, при котором в материале не обнаруживаются признаков пластической (остаточной) деформации.

Предел упругости характеризует начало перехода от упругой деформации к пластической.

У большинства материалов значения предела упругости и предела пропорциональности незначительно отличаются друг от друга. Поэтому обычно считают, что они практически совпадают. Наибольшее напряжение, до которого остаточная деформация при разгрузке не обнаруживается, называется пределом упругости. Это напряжение вызывается силой F у и определяется по формуле :

$$\sigma_y = F_y / A .$$

При дальнейшем нагружении криволинейная часть диаграммы переходит в почти горизонтальный участок ВС – площадку текучести. Здесь деформации растут практически без увеличения нагрузки. Нагрузка F<sub>T</sub>, соответствующая площадке текучести используется при определении физического предела текучести. В процессе текучести на отшлифованной поверхности образца можно наблюдать появление линий (полос скольжения), наклоненных примерно под углом 45° к оси образца (рис. 4а). Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

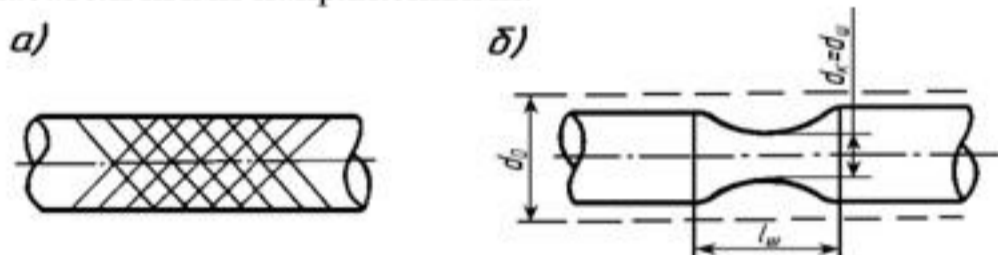


Рис.4

Линии сдвига называются линиями Чернова по имени знаменитого русского металлурга Д. К. Чернова (1839 – 1921), впервые обнаружившего их.

Физическим пределом текучести  $\sigma_T$  называется наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

Зону ВС называют зоной общей текучести. В этой зоне значительно развиваются пластические деформации. При этом у образца повышается температура, изменяются электропроводность и магнитные свойства.

Участок DE называют зоной упрочнения. После площадки текучести за точкой С материал вновь приобретает способность сопротивляться нагрузке, и для дальнейшей деформации образца необходимо новое увеличение нагрузки. Точка Д соответствует достижению наибольшего значения нагрузки F<sub>max</sub>. До этого образец удлиняется почти равномерно по исследуемой длине с увеличением длины образца от первоначальной l<sub>0</sub> до l<sub>01</sub>; диаметр, наоборот, равномерно уменьшается от первоначального d<sub>0</sub> до d<sub>к</sub>.

Следовательно, при равномерном растяжении по длине, сопротивление деформированию повышается вследствие деформационного упрочнения материала; одновременно происходит уменьшение сечения образца, ослабляющее сопротивление растяжению. Наблюдаемое фактически повышение сопротивления образца растяжению по кривой DE свидетельствует о том, что деформационное упрочнение материала при равномерном растяжении происходит интенсивнее, чем уменьшение площади поперечного сечения.

Возрастание нагрузки прекращается, когда деформационное упрочнение материала перестаёт возмещать геометрическое ослабление, вызванное уменьшением сечения образца.

В конце этого участка в одном из сечений образца начинает образовываться местное сужение, так называемая «шейка». (Рис.4б) Место образования шейки по длине образца заранее предугадать нельзя.

Максимальная нагрузка, определяемая ординатой  $F_{max}$  точки Д диаграммы, называется нагрузкой, соответствующей пределу прочности(временное сопротивление)

Если процесс растяжения остановить в пределах участка С Д, например, в точке А", и начать разгружать образец, то деформация его будет исчезать пропорционально снимаемой нагрузке, т. е. по прямой А"О"', параллельной прямой АО. При повторной нагрузке этого образца линия нагрузки совпадет с прямой А"О"', т.е. увеличится участок пропорциональности. При дальнейшем увеличении растягивающей силы кривая диаграммы совпадет с кривой А" СК. Часть диаграммы, расположенная левее линии А"О"', окажется отсеченной. т.е. начало координат переместится в точку О"' (Рис.3).

Остаточное удлинение после разрыва будет меньше, чем в образце, не подвергавшемся предварительной пластической деформации.

Таким образом, предварительная вытяжка образца за предел текучести изменяет некоторые механические свойства стали - повышает ее предел пропорциональности, т.е. делает ее более упругой, и уменьшает остаточное удлинение, т.е. делает ее более хрупкой

(Рис.5).

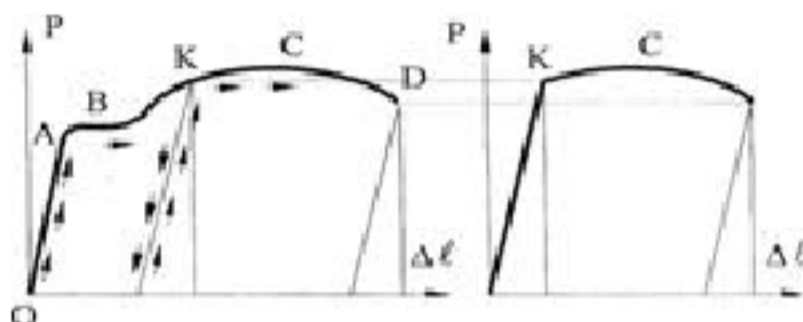


Рис.5. Диаграммы растяжения: слева - полная для предварительно незагруженного образца, справа-укороченная для предварительно загруженного до точки К образца. Изменение свойств материала в результате деформации за пределом текучести называется наклепом. После операции наклепа модуль упругости  $E$  возрастает на 20-30 %.

Четвёртый участок диаграммы ДК (Рис.3). При достижении усилия  $F_{проч.}$  (точка D) на образце появляется местное сужение, так называемая шейка (Рис 4б). До точки D диаграммы, соответствующей  $F_{проч.}$ , каждая единица длины образца удлинилась примерно одинаково; точно так же во всех сечениях одинаково уменьшались поперечные размеры образца. После достижения наибольшей нагрузки, дальнейшее пластическое деформирование сосредоточивается на небольшом участке длины образца, вследствие чего и образуется шейка с интенсивным сужением площади поперечного сечения.

По причине сужения, сопротивление образца растяжению постепенно уменьшается по кривой ДК, до конечной нагрузки  $F_K$  при которой происходит разрыв образца по наименьшему сечению образца - в шейке. Ордината точки К даёт величину разрушающей нагрузки  $F_K$ .



Стальной образец с "шейкой"

Работа затраченная на разрыв образца  $W$  равна площади фигуры образованной диаграммой. Ее приближенно можно вычислить по формуле:

$$W = 0,8 F_{max} \cdot \Delta l_{max}$$

После разрушения образца для определения его длины  $l_K$  обе его части тщательно прикладывают друг к другу и измеряют расстояние между точками, определяющими границы расчётной длины  $l_0$ .

Следует отметить, что в этом случае упругие деформации образца полностью исчезли и остались только пластические деформации.

Абсолютное удлинение образца

$$\Delta l_{ост} = l_K - l_0$$

Полученное значение абсолютного удлинения образца должно быть равным  $\Delta l_{ост}$  измеренным на диаграмме растяжения. В свою очередь  $\Delta l_{ост}$  равно сумме равномерного удлинения образца ( $\Delta l_{равн}$ ) и удлинения за счёт локальной деформации в зоне шейки ( $\Delta l_{ш}$ )

$$\Delta l_{ост} = \Delta l_{равн} + \Delta l_{ш}$$

Далее на оси абсцисс диаграммы измеряется полное удлинение образца, как суммы остаточной и упругой деформации

$$\Delta l_{полн} = \Delta l_{ост} + \Delta l_{упр}$$

После разрушения образца его диаметр в шейке измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднеарифметическому значению  $d_K$  вычисляют площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (шейке)  $F_K$ .

С рабочей диаграммы берутся значения нагрузок, соответствующих пределу пропорциональности, пределу упругости, пределу прочности, нагрузке в момент разрыва, величине остаточной и упругой абсолютной деформации и вычисляются характеристики прочности и пластичности.

#### Характеристики прочности

Пределом текучести  $\sigma_T$  называют напряжение, при котором происходит рост деформаций без увеличения нагрузки.

$$\sigma_T$$

где  $A_0$  – первоначальная площадь образца

Высокоуглеродистые и легированные стали, алюминиевые сплавы, бронза не дают предела текучести и для них устанавливается так называемый условный предел текучести.

Условным пределом текучести называют напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% (рисунок 14) от расчётной длины образца.

$$\sigma_{0,2}$$

Для определения нагрузки  $F_{0,2}$  по оси абсцисс откладывают величину остаточного удлинения  $OK = 0,002l_0$  (в масштабе удлинений). Из точки А проводят прямую параллельную прямолинейному участку диаграммы. Точка А определит  $F_{0,2}$ ; величина  $\Delta l_{0,2}$  обычно мала. После стадии текучести материал вновь начинает сопротивляться возрастающей нагрузке – наступает стадия упрочнения (рис. 5) – участок ВС. Пределом прочности  $\sigma_B$  (временное сопротивление) называют частное от деления максимальной нагрузки –  $F_B$  на первоначальную площадь сечения

образца. К моменту разрыва нагрузка уменьшается (участок СД), за счёт образования шейки – местного сужения площади поперечного сечения и наступает разрыв.

Напряжение при разрыве (истинное)

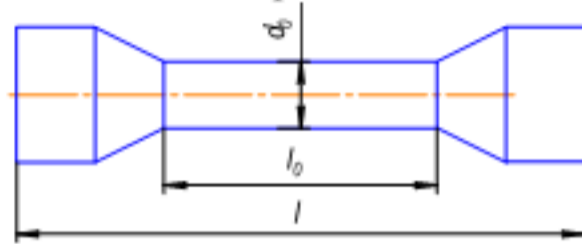
$\sigma_k$

где  $F_k$  – нагрузка, соответствующая разрыву образца;

$A_1$  – площадь сечения шейки в месте разрыва.

### Характеристики пластичности

Относительное остаточное удлинение при разрыве является важной характеристикой пластичности материала.



где

$l_0$  – первоначальная расчётная длина образца;

$l_1$  – расчётная длина образца после разрыва.

Она измеряется после стыковки двух частей разорванного образца.

Образцы при  $l_0 = 10d$  – длинные

при  $l_0 = 5d$  – короткие.

Для СТ 3 –  $\sigma \geq 21\%$ . Для высокопрочных сталей  $7 \div 10\%$ .

Для малоуглеродистой стали коэффициент полноты диаграммы можно принимать  $v = 0,85$ .

Полная работа, затраченная на разрыв образца, отнесённая к единице его объёма, называется удельной работой разрыва.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством машины, на которой будет производиться испытание, в отчет записать:
  - 1.1 Тип машины, масштаб записи диаграммы по нагрузке и удлинению.
  - 1.2 Измерить штангенциркулем диаметр образца  $d_0$  и длину  $l_0$  между головками.
2. Закрепить образец в захватах машины.
  - 2.1 Проверить работу диаграммного аппарата, для чего следует проверить барабан в холостую и получить нулевую линию.
3. Включить машину. Наблюдать за процессом растяжения образца
4. В момент разрыва образца выключить машину.
5. После разрушения образца снять с барабана бумагу с диаграммой растяжения образца и приступить к обработке результатов испытания

### Обработка результатов испытания.

1. Обе части разрушения образца сложить вместе; измерить новое расстояние  $l_1$  между головками образца и диаметр  $d_1$  образца в месте разрыва.
2. Данные наблюдений и измерений записать в таблицу.
3. Построить диаграмму растяжения, пользуясь масштабом нагрузок; 1 мм- 10 кг.

Произвести обработку диаграммы растяжения.

Диаметр образца, мм		Расчётная длина, мм		Площадь сечения $A$ , мм <sup>2</sup>	
$d_0$	$d_1$	$l_0$	$l_1$	$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$	$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$

--	--	--	--	--	--

Таблица значений, снятых с диаграммы, построенной самописцем в осях  $F, \Delta\ell$

№	Координаты точки на диаграмме	Марка стали
1	Сила в кН, соответствующая пределу пропорциональности $F_{мп} =$	
2	Сила в кН, соответствующая пределу текучести $F_T =$	
3	Сила в кН, соответствующая пределу прочности $F_{пч} =$	
4	Сила в кН, соответствующая разрыву образца $F_K =$	

Таблица вычисления координат точек диаграммы растяжения в осях  $\sigma, \xi$

№	Координаты точки на диаграмме	Марка стали
1	Предел пропорциональности $\sigma_{пц} =$ МПа	
2	Предел текучести $\sigma_T =$ МПа	
3	Предел прочности $\sigma_{пч} =$ МПа	
4	Разрушающее напряжение условное  $\sigma_K$ МПа	
5	Разрушающее напряжение истинное  $\sigma_K$ МПа	
7	Относительное остаточное удлинение $\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100$	
8	Относительное остаточное сужение $\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} 100$	
9	Полная работа деформации $W = (l_1 - l_0)(F_y + 2F_x) / 3$	
10	Удельная работа деформации $w = \frac{W}{A_0 l_0}$	

Диаграммы в осях  $F, \Delta\ell$

$F$									

0									$\Delta l$

**Диаграммы в осях  $\sigma, \xi$**

$\sigma$									
0									$\xi$

После определения характеристик испытываемого материала по таблицам ГОСТа устанавливают марку стали, из которой изготовлен образец (см. табл. 1) и, в соответствии с этим решить, в каких конструкциях материал может найти применение.

**Анализ результатов, выводы**

- устанавливают марку стали, используя справочные данные (таблица 1) и, в соответствии с этим решить, в каких конструкциях материал может найти применение. При выборе марки принимают ту строку, которая наиболее точно подходит по трём характеристикам: пределу текучести, пределу прочности и относительному удлинению (относительному сужению)

Таблица 1

Материал	Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_s$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Предел выносливости, МПа		
				$\sigma_{-1p}$	$\sigma_{-1u}$	$\tau_{-1k}$
Углеродистые стали обыкновенного качества						
Ст 2кп	330...420	200...220	30...33	120...160	170...220	80...130
Ст2пс(сп)	340...440	210...230	29...32			

Материал	Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_e$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Предел выносливости, МПа		
				$\sigma_{-1p}$	$\sigma_{-1u}$	$\tau_{-1k}$
Ст 3кп	370...470	220...240	24...27	120...160	170...220	100...130
Ст 3пс(сп)	380...490	230...250	23...26			
Ст 4кп	410...520	240...260	22...25	-	190...250	-
Ст 4пс(сп)	420...540	250...270	21...24			
Ст 5пс(сп)	500...640	270...290	17...20	170...220	220...300	130...180
Ст 6пс(сп)	600	300...320	12...15	190...250	250...340	150...200
Углеродистые качественные стали (нормализованные)						
10	340...420	210	31	120...150	160...220	80...120
20	420...500	250	25	120...160	170...220	100...130
30	500...600	300	21	170...210	200...270	110...140
40	580...700	340	19	180...240	230...320	140...190
45	610...750	360	16	190...250	250...340	150...200
50	640...800	380	14	200...260	270...350	160...210
60	690...900	410	12	220...280	310...380	180...220
Легированные стали						
20X	720...850	400...650	12	-	310...380	170...230
40X	730...1050	650...900	15,5	240...340	320...480	210...260
45X	850...1060	700...950	9	-	400...500	-
40ХН	1000...1450	800...1300	-	310...420	460...600	-
30ХГСА	1100...1700	850...1500	7	-	480...700	280...400
60Г	710	420	11	250...320	-	-

- делают вывод в форме, соответствующей поставленной цели лабораторной

#### **Составление отчета.**

Отчет о проделанной работе должен содержать:

Наименование испытательной машины. Масштаб диаграммы.

Эскиз и размеры образца до испытания и после разрушения (в мм). Начальную площадь поперечного сечения  $A_0$  (мм<sup>2</sup>). Площадь поперечного сечения образца в месте разрыва  $A_1$  (мм<sup>2</sup>)

Диаграмму растяжения с указанием характерных точек.

Результаты испытания:

Предел текучести,  $\delta_T$  (МПа)

Предел прочности,  $\delta_{пч}$  (МПа)

Относительное остаточное удлинение  $\delta\%$

Относительное остаточное сужение  $\psi\%$

Марка материала образца,

ответы на контрольные вопросы.

#### **Контрольные вопросы:**

Что называется пределом текучести и пределом прочности (временным сопротивлением)?

На какую площадь сечения образца нужно делать максимальную нагрузку, которую выдержал образец до разрушения при определении площади прочности?

В чем заключается закон Гука?

Какое напряжение берется за опасное для пластичных материалов?

Как определяются характеристики пластичности?

Как определяются допускаемое напряжение для пластичных материалов при статическом нагружении?

Какие деформации называются упругими, остаточными?

При какой нагрузке возникает на образце шейка?

Какие материалы называются пластичными, хрупкими?

**Дополнительное задание**

Определить материал образца



**Лабораторная работа № 4****Вариант 1**

<b>F (Н)</b>	<b><math>\Delta l</math> (мм)</b>
5000	0,0318
10000	0,0636
15000	0,0954

**Вариант 2**

<b>F (Н)</b>	<b><math>\Delta l</math> (мм)</b>
2500	0,0318
5000	0,0636
7500	0,0954

**Вариант 3**

<b>F (Н)</b>	<b><math>\Delta l</math> (мм)</b>
2500	0,0455
5000	0,0910
7500	0,1365

**Вариант 4**

<b>F (Н)</b>	<b><math>\Delta l</math> (мм)</b>
5000	0,00489
10000	0,0988
15000	0,1468

**Вариант 5**

<b>F (Н)</b>	<b><math>\Delta l</math> (мм)</b>
5000	0,04346
10000	0,0849
15000	0,12738

**Лабораторная работа №6.**  
**Опытная проверка закона Гука при кручении.**  
**(ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА**  
**ПРИ КРУЧЕНИИ)**

**Цель работы:**

- 1) изучение зависимости между крутящим моментом и углом закручивания в пределах упругих деформаций;
- 2) определение опытным путем модуля сдвига (модуля упругости второго рода) для стали.

**Краткие теоретические сведения**

**Кручение** — вид нагружения бруса, при котором в его поперечных сечениях возникает только крутящий момент  $M_z$ . При деформации бруса его поперечные сечения поворачиваются на некоторые углы по отношению к своему первоначальному положению, при этом они не искривляются. По гипотезе Я. Бернулли: сечения плоские и перпендикулярные к оси до нагружения остаются плоскими и перпендикулярными к оси и после нагружения. В поперечных сечениях возникают только касательные напряжения.

Рассмотрим элемент бруса длиной  $dz$  (рис.1). Угол поворота  $d\varphi$  одного поперечного сечения по отношению к другому поперечному сечению называется углом закручивания.

Угол взаимного поворота двух сечений, отнесенный к расстоянию между ними, называют относительным углом закручивания  $\theta$ :  
его размерность рад/м.

$$\theta = d\varphi / dz \quad (1.)$$

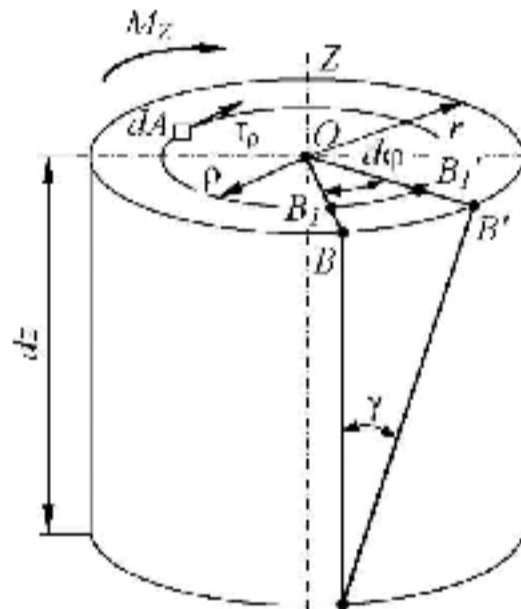


Рис.1.

Точка  $B$  под действием момента сдвигается в положение  $B'$ . Дуга  $BB'$  является абсолютной деформацией сдвига:

$$\frac{BB'}{dz} = r d\varphi$$

Для элемента  $dz$  отношение  $\frac{BB'}{dz}$  есть относительная деформация сдвига или **угол сдвига**  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{BB'}{dz} = r d\varphi / dz = r \theta \quad (2.)$$

**Чистым сдвигом** называют напряженно-деформированное состояние, когда на гранях элемента возникают только касательные напряжения. Зависимость между углом сдвига и касательным напряжением в пределах упругих деформаций определяется законом Гука:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (3.)$$

где коэффициент пропорциональности  $G$  называется *модулем сдвига* (модулем упругости второго рода), он характеризует *жесткость материала* при деформации сдвига.

**Закон Гука:** в пределах упругих деформаций (по достижении напряжения равного пределу пропорциональности) зависимость между касательными напряжениями  $\tau$  и угловыми деформациями  $\gamma$  является линейной.

Модуль сдвига  $G$  (модуль упругости II рода) характеризует сопротивление материала упругим деформациям при сдвиге (кручении) и имеет размерность МПа. Графически  $G$  представляет собой тангенс угла наклона прямой в координатах « $\tau$ - $\gamma$ ». Модуль сдвига  $G$  также, как и модуль продольной упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ , является величиной постоянной для данного материала. Модуль упругости второго рода  $G$  является зависимой от двух других характеристик

упругости материала - модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона  $\mu$ .

Для одного и того же материала между модулем продольной упругости  $E$ , модулем сдвига  $G$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$  существует зависимость.

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4.)$$

По этой формуле, зная  $E$  и  $\mu$ , легко найти  $G$ .

Например, для стали

$E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,25$  и по формуле (4.) найдем

$$G = 0,8 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Модуль сдвига  $G$  также, как и модуль продольной упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ , является величиной постоянной для данного материала.

Угол сдвига у точки В, отстоящей от оси на расстоянии  $\rho$  будет равен  $\gamma_1 = \rho \cdot \theta$ . Тогда касательное напряжение в любой точке поперечного сечения, отстоящей от оси бруса на расстоянии  $\rho$ , определяется по формуле

$$\tau_\rho = G \cdot \rho \cdot \theta \quad (5.)$$

Из этой формулы следует, что касательные напряжения в точках поперечного сечения измеряются пропорционально расстоянию этих точек от оси бруса; максимальные касательные напряжения возникают в точках, наиболее удаленных от центра бруса (рис.2, а). Экономически более выгодно поперечное сечение в виде кругового кольца (рис.2, б), так как напряжения в точках, расположенных вблизи от оси бруса, незначительны.

тmaxтmax

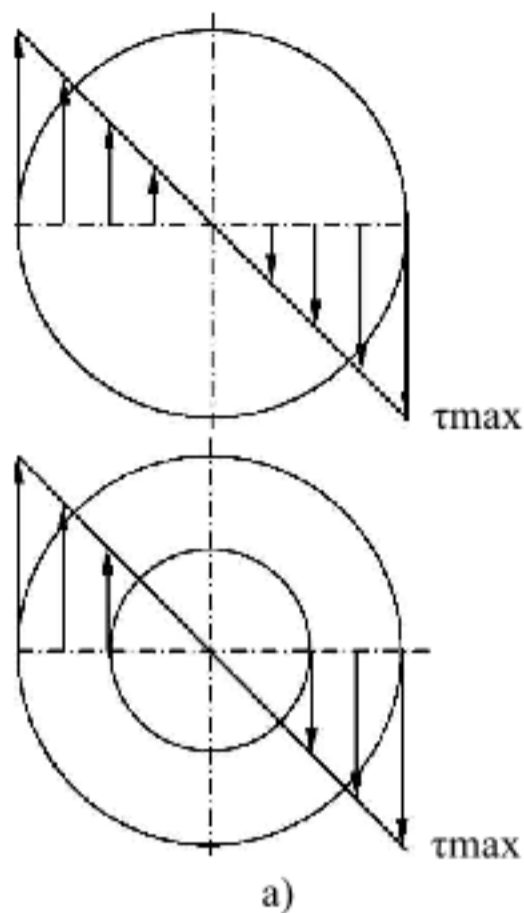


Рис 2.

б)

Между крутящим моментом  $M_z$ , касательными напряжениями в поперечном сечении  $\tau_\rho$  и относительным углом закручивания  $\theta$  существует зависимость. Определим её. На некотором расстоянии  $\rho$  от центра сечения выберем бесконечно малую площадку  $dA$ , касательное напряжение в которой  $\tau_\rho$  (рис.1). Тогда на этой площадке действует элементарная касательная сила  $\tau_\rho \cdot dA$ , момент которой относительно оси  $dM_z = \tau_\rho \cdot dA \rho$ . Суммируя эти элементарные моменты по всей площади поперечного сечения, получим выражение для крутящего момента:

$$M_z = \int \tau_\rho \rho dA = G \int \rho^2 dA = G \theta J_\rho, \quad (6)$$

где  $\tau_\rho$  подставили по формуле (5),

$\int \rho^2 dA = J_\rho$  — полярный момент инерции сечения.

Из этого равенства получим выражение относительного угла закручивания и касательного напряжения:

$$\theta = \frac{M_z}{G J_\rho} \quad (7)$$

$$\tau_\rho = \frac{M_z}{J_\rho} \cdot \rho \quad (8)$$

Элементарный угол закручивания на участке  $dz$  из формулы (1):

Угол закручивания бруса постоянного поперечного сечения на участке длиной  $l$  при действии крутящего момента  $M_z$  найдем, суммируя элементарные величины  $d\theta$  :

$$\int d\theta = \int \frac{M_z}{G J_\rho} dz$$

$$\theta = \frac{M_z l}{G J_\rho} \quad (9)$$

где произведение  $G J_\rho$  называется жесткостью сечения при кручении. Отсюда модуль сдвига равен:

$$G = \frac{M_z l}{\theta J_\rho} \quad (10)$$

### Практическая часть

**Оборудование:**

- 1) лабораторная установка ТМТ11М,
- 2) измерительный индикатор часового типа,
- 3) тарированные грузы.

Лабораторная установка (рис.3) состоит из основания 1, на котором справа закреплена стойка 2 в виде усеченной пирамиды, а слева закреплена цилиндрическая стойка 3 с выдвижным винтом 4.

На стойке 2 закреплена опора 5 с полым валом 6, свободный конец которого опирается на выдвижной винт 4 шарикоподшипником 7. На полым валу 6 закреплены кронштейны 8, на одном из которых закреплена индикаторная головка 9 для замера угла закручивания полого вала 6 под действием момента силы веса гирь 10 на плече рычага нагружения 11. Для устойчивости установки от опрокидывания имеется поворотная опора 12, закрепленная на основании 1.

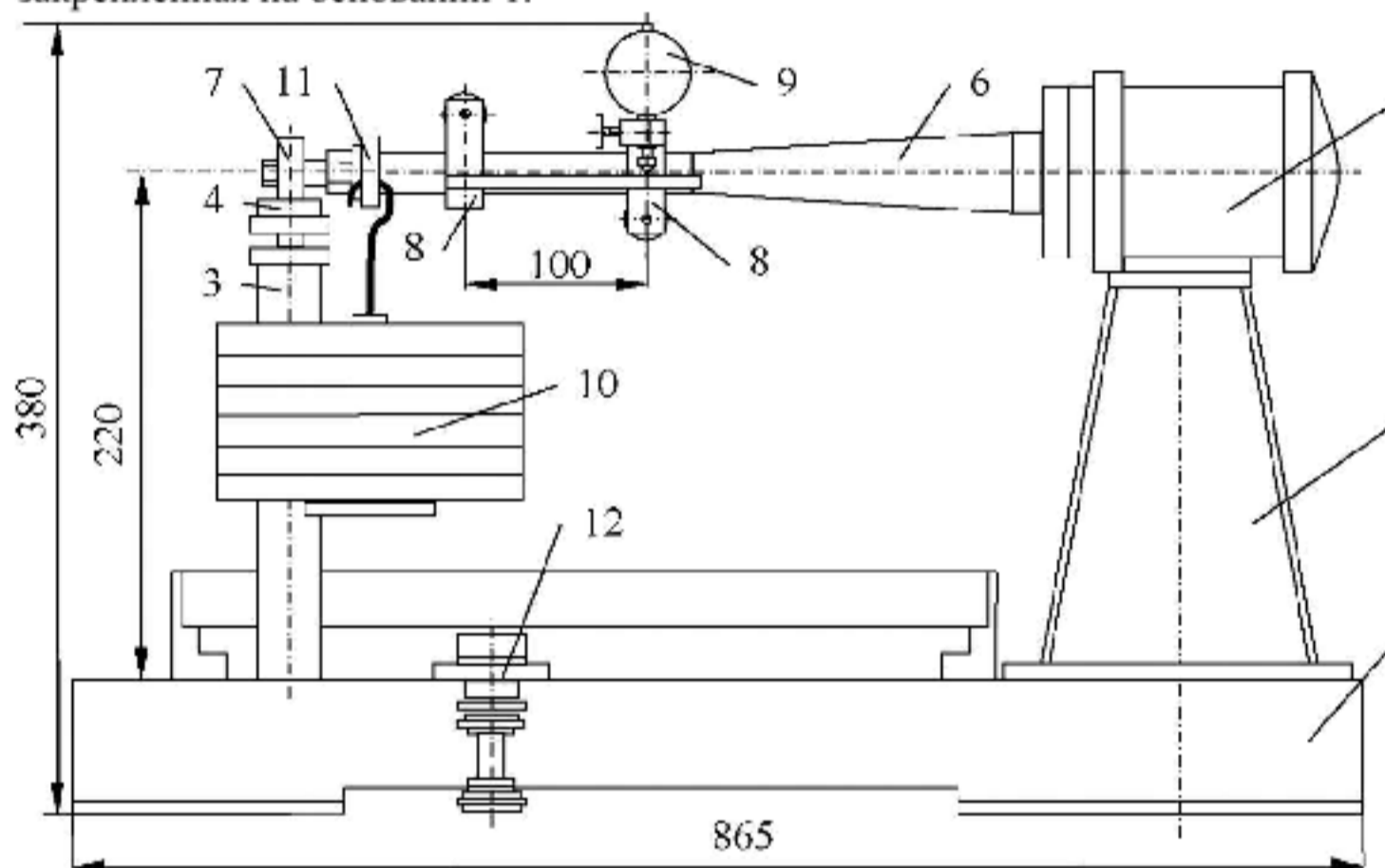


Рис. 3

Угломер (рис.4,а) является прибором, позволяющим простейшим образом с необходимой точностью измерений определить углы поворота сечений при кручении образца.

Стрелочный индикатор 1 установлен на образце 2 при помощи трубки 3. На расстоянии  $l$  закреплена вторая трубка с упором 4, который касается измерительного наконечника индикатора.

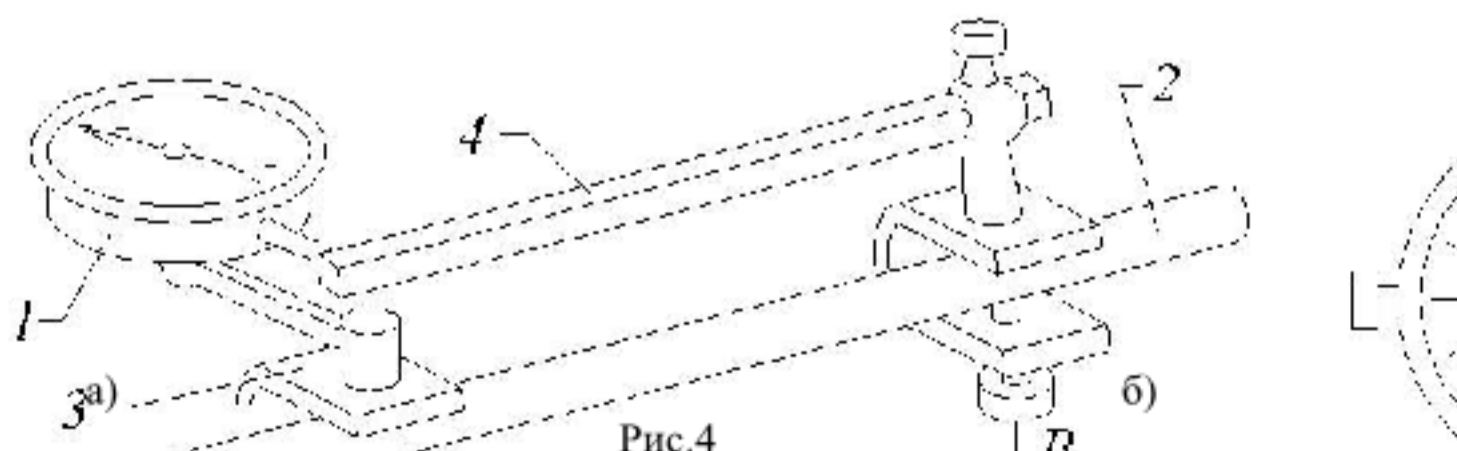


Рис.4

При взаимном повороте сечений  $A$  и  $B$  на угол  $\alpha$  (рис.4,б) наконечник индикатора получает перемещение  $s$ . Так как угол  $\alpha$  мал, то можно принять  $s \approx b \alpha$ ,

где  $b$  - расстояние между осью образца осью наконечника индикатора.

Следовательно, угол поворота сечения  $B$  по отношению к сечению  $A$  равен

$$\Delta\varphi = \frac{s}{b}$$

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки и работой на ней.
2. Нагрузить подвес на рычаге нагружения последовательно гирями массой 1000 г от одной до шести.
3. Снимать каждый раз показания индикатора угломера  $s_i$  ( $i = 1 \dots 6$ ).
4. Определять каждый раз, начиная со второго опыта, разность показаний индикатора, текущего и предыдущего опытов:  

$$\Delta s_i = s_i - s_{i-1} \quad (i = 1 \dots 5).$$
5. Определить среднюю разность показаний индикатора, соответствующую приращению силы  $F = 10$  Н:

6. Определить средний угол поворота сечения полого вала:

где  $b = 80$  мм — длина вылета рычага угломера (рис.4).

7. Определить модуль сдвига  $G$  по формуле:

$$G = \frac{M_z l}{\varphi J_p}$$

где  $l = 100$  мм — длина рабочего участка вала;  
 $J_p = J_{cp}$

$$J = \frac{(D^4 - d^4)}{32}$$

Полярный момент инерции кольцевого сечения

$$D = 20 \text{ мм}, d = 16 \text{ мм}$$

$$M_z = Fa$$

( $F = F = 10$  Н,  $a = 500$  мм — длина вылета рычага нагружения).

8. Сравнить модуль сдвига, полученный экспериментально, с теоретическим (известным по табличным величинам), определить погрешность:

$$\delta = \frac{|G_y - G_T|}{G_T} \cdot 100\%$$

### Содержание отчета

1. Значения, необходимые для расчета:  
 $J_p =$  мм<sup>4</sup>;  
 $M_z =$  Нм;  
 $l =$  мм.
2. Таблица нагружения и измерения.

Таблица 1

№ опыта	Нагрузка $F_i$ , Н	Показание индикатора $s_i$ , мм	Разность измерений $s_i$ , мм
1	$F_1$	$s_1$	
2	$F_2 = F_1 + F$	$s_2$	$s_1 = s_2 - s_1$

3	$F_3 = F_2 + F$	$s_3$	$s_2 = s_3 - s_2$
4	$F_4 = F_3 + F$	$s_4$	$s_3 = s_4 - s_3$
5	$F_5 = F_4 + F$	$s_5$	$s_4 = s_5 - s_4$
6	$F_6 = F_5 + F$	$s_6$	$s_5 = s_6 - s_5$

3. Средняя разность измерений:

$$s_{cp} = \quad \text{мм.}$$

4. Средний угол поворота сечения полого вала:

$$\alpha_{cp} = \quad \text{рад.}$$

5. Угол сдвига:

$$G_3 = \quad \text{МПа.}$$

6. Погрешность определения модуля сдвига:

$$\delta = \quad \%$$

7. Вывод.

### Приложение

Таблица характеристик упругости различных материалов

Материал	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	$G \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\mu$
1	2	3	4
Алюминиевый сплав литейный	0.67-0.71	2.4-2.7	0.32-0.36
Бронза фосфористая катаная	1.15	4.2	0.32-0.35
Латунь холодно-тянутая	0.01-0.99	3.5-3.7	0.32-0.42
Медь холодно-тянутая прокатная	1.1-1.3	4.9	0.31-0.34
Свинец	0.17	0.7	0.42
Стали углеродистые	2.0-2.1	7.7-8.5	0.24-0.28
Стали хромоникеливые	2.0-2.1	8.1	0.25-0.28
Чугун серый, белый	1.55-1.6	6.0	0.23-0.27
Чугун ковкий	1.55	4.0-6.0	0.23-0.27
Стекло	0.49-0.63	2.1-2.5	0.24-0.27

Текстолит	0.06-0.1	-	-
Целлулоид	0.017-0.02	0.06-0.07	0.39

#### Вопросы для подготовки к защите работы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. При каком нагружении прямой брус испытывает деформацию кручения?
3. Какое правило знаков принято для крутящих моментов?
4. Что называется углом закручивания?
5. Какое напряженное состояние возникает в каждой точке образца при кручении?
6. Как выражается закон Гука при кручении?
7. По каким формулам можно определить модуль упругости второго рода?
8. Как опытным путем определяется модуль упругости второго рода?
9. Как определяется угол закручивания образца экспериментально?
10. Какие измерительные приборы и приспособления при этом применяются?
11. Что называется жесткостью поперечного сечения бруса при кручении?
12. Какова размерность жесткости поперечного сечения.
13. Какие факторы влияют на величину угла закручивания?
14. Во сколько раз изменится величина угла закручивания, если диаметр образца уменьшится вдвое?
15. По какой формуле определяется полярный момент сопротивления для круглого вала сплошного сечения и для вала кольцевого сечения?
16. Какие напряжения возникают в поперечном сечении круглого вала при кручении? Как они направлены? По какому закону распределяются?
17. Напишите формулу для определения касательных напряжений.
18. Возникают ли какие напряжения в продольных сечениях вала, проходящих через его ось? Если да, то как это доказать?
19. Какое напряженное состояние возникает в каждой точке круглого бруса при кручении?
20. Возникают ли по какому-либо сечению круглого вала нормальные напряжения при кручении?
21. Как разрушается при кручении круглый образец из пластичного материала? Какие напряжения вызывают это разрушение?
22. Как разрушается при кручении круглый образец из хрупкого материала (чугун)? Почему?
23. Как разрушается при кручении круглый образец из дерева? Почему?
24. Какие материалы лучше сопротивляются скручиванию?
25. Какое напряжённое состояние называют чистым сдвигом?
26. Как вычисляются напряжения при кручении и как они распределяются в поперечном сечении образца при упругом и при пластическом деформировании?
27. Как опытным путем определяют угол закручивания на расчетной длине  $l$  образца?
28. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?
29. Какая зависимость существует между величинами  $E$ ,  $G$  и  $\mu$  ?
30. Каковы отличительные особенности диаграмм кручения стержней из пластичных и хрупких материалов?
31. Почему при испытании образцов крутящий момент наращивают равными ступенями?
32. Какие характеристики прочности можно получить при испытании образцов из пластичных и хрупких материалов?
33. С какой целью перед началом испытаний производят предварительное нагружение образца?





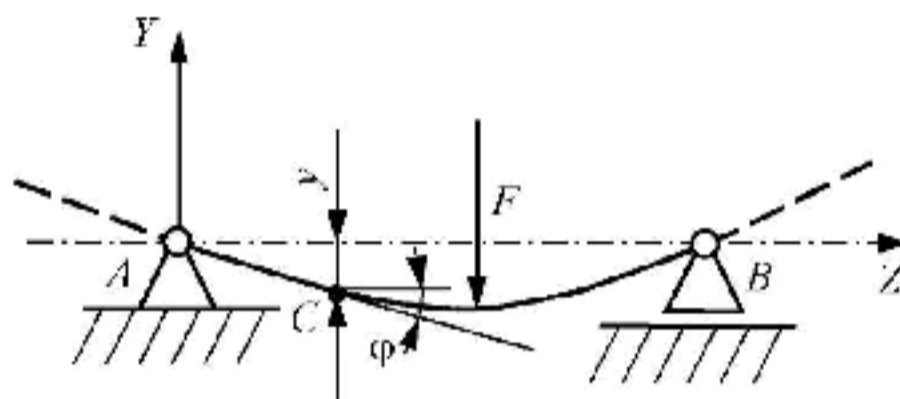
## Лабораторная работа № 7

### Определение линейных и угловых перемещений поперечных сечений статически определимой балки

**Цель работы:** Опытное определение величин перемещений (прогибов и углов поворота) сечений балки и сравнение их с величинами, полученными теоретическими расчетами.

#### Краткие теоретические сведения

Под действием внешних сил балка деформируется таким образом, что её продольная ось искривляется. Если изгиб балки происходит в пределах упругих свойств материала, то после снятия нагрузки ось балки выпрямляется. Изогнутую ось балки называют упругой линией, а перемещение точек оси балки по нормали к её недеформированной оси называют прогибами балки (прогибами оси балки, прогибами сечений балки). Обозначим прогибы балки через  $y$  (рис.1). Максимальный прогиб называется стрелой прогиба и обозначается  $y_{max}$ .



При деформировании балки её поперечные сечения, оставаясь плоскими, поворачиваются, сохраняя перпендикулярность к изогнутой оси балки.

Угол поворота  $j$  поперечного сечения равен углу между касательной к изогнутой оси балки в данной точке и направлением оси недеформированной балки (рис.1).

Для определения изогнутой оси балки необходимо составить её уравнение, то есть выразить ординаты (прогибы балки) от положения точек по длине, другими словами, найти зависимость  $y = f(z)$ . Чтобы найти эту зависимость, используем равенство, полученное при выводе формулы нормальных напряжений при изгибе

#### Практическая часть

*Приборы и принадлежности:* лабораторная установка ТМт 03М, измерительные индикаторы часового типа, тарированные грузы.

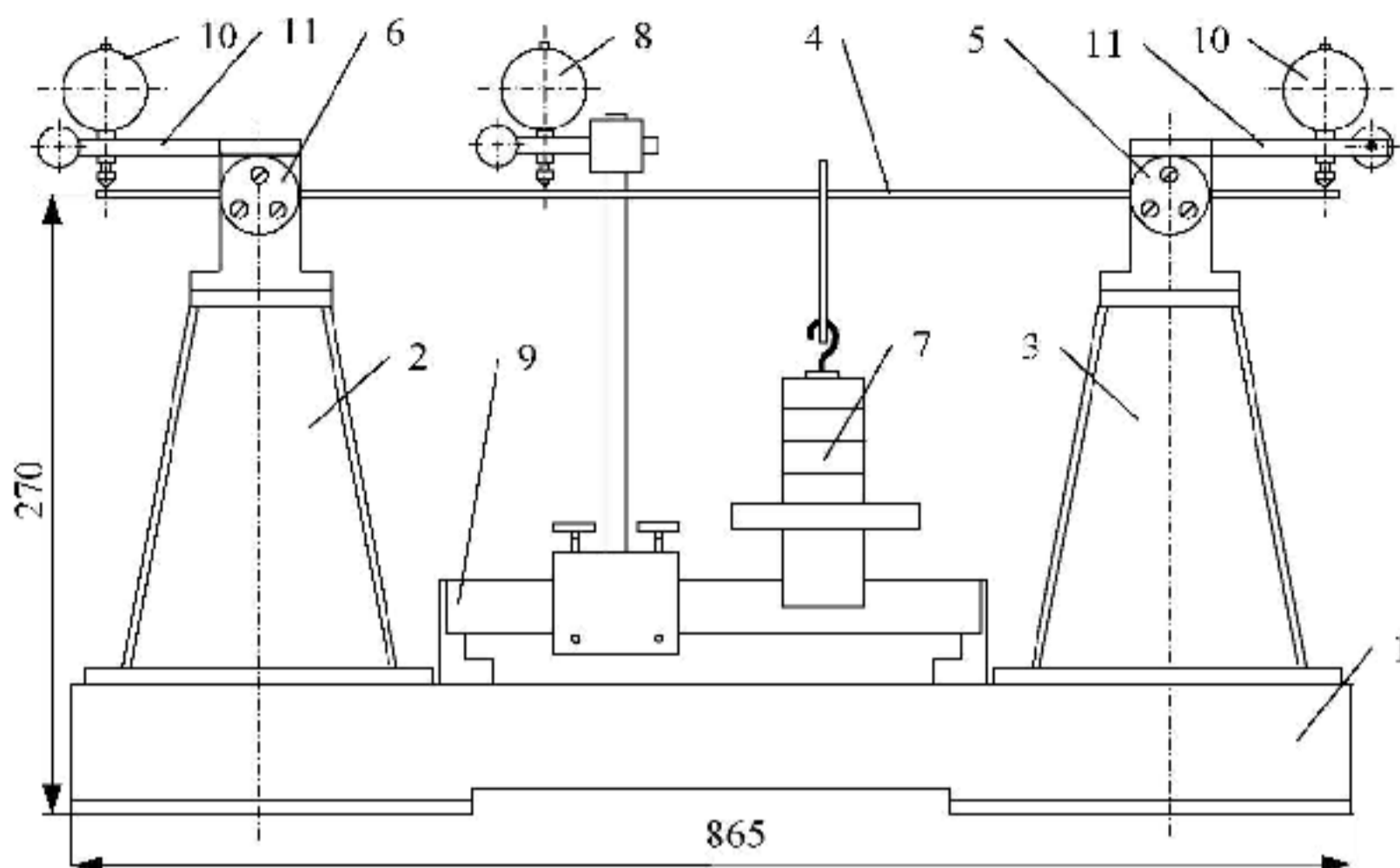


Рис. 3.2

Схема измерений представлена на рис.3, где индикаторы 10 определяют углы поворота  $j_0$  и  $j$  в местах опор, а индикатор 8 — прогиб в сечении, расположенном на расстоянии  $s$  от левой опоры. На рис.3 величина  $s$  равна. Работа проводится на лабораторной установке ТМт 03М (рис.2), состоящей из сварного основания 1, на котором закреплены стойки 2 и 3 в виде усеченной пирамиды. На стойках устанавливается контрольная балка 4, правый конец которой располагается на шарнирно-подвижной опоре 5, а левый конец на шарнирно-неподвижной опоре 6. Нагрузение балки при выполнении лабораторной работы осуществляется через подвес 7 с грузами. На балке нанесены риски с интервалом 50 мм для измерения расстояний. Линейные перемещения (прогибы) измеряются индикаторной головкой 8, закреплённой на горизонтальной планке 9. Для измерения угловых перемещений опор балки используется индикаторные головки 10, закреплённые на рычагах 11.

Балка представляет собой стальную полосу прямоугольного поперечного сечения, выполненную из листовой стали марки – сталь 4. Измерение поперечных размеров балки: ширины сечения  $b$  и высоты сечения  $h$  — производится штангенциркулем длине вылета рычагов угломера поворота опор балки ( $s = 80$  мм),  $s_0$  из — показания индикаторов в опорах  $A$  и  $B$  соответственно. Зная эти величины, определим углы поворота:

#### Подготовка установки ТМт 03М к работе

1. Разместить установку на ровной горизонтальной поверхности стола и произвести юстировку (настройку на ноль) показаний индикаторных головок при закреплении контрольной балки без нагружения грузами.
2. В среднем сечении балки установить серьгу с грузом массой 1 кг. Показание индикатора в зоне приложения силы должно быть величиной  $0,5 \text{ мм} \pm 0,02$ .

#### Порядок выполнения работы

Указание: система закрепления балки, ее нагружение и измерение прогибов устанавливается по заданию преподавателя.

Задание 1. Ознакомиться с установкой ТМт 03М и зарисовать ее схему (рис. 2)

Задание 2. До начала эксперимента измерить и записать в таблицу длину балки 1, размеры поперечного сечения  $b$  и  $h$ ; расстояние  $s$  — от левой стойки до места установки

индикатора, где измеряется прогиб балки; расстояние  $a$  от левой стойки до места приложения нагрузки  $F$ .

**Задание 3.**

3.1. В сечении, где определяется прогиб, устанавливается индикатор в вертикальном положении и его стрелка устанавливается на ноль.

3.2. Нагрузить балку силой  $F$  (Н) последовательно от начала до конца с шагом 50 мм и снять показания индикатора.

Результат занести в таблицу.

3.3. Для определения углов поворота опорного сечения записывают показания с горизонтального индикатора, измеряют горизонтальное перемещение конца вертикального стрелки до и после приложения нагрузки.

Углы поворота опорных сечений, полученных экспериментально, определяются по соотношениям:

$$\varphi_A = h_A / H; \quad \varphi_B = h_B / H$$

где  $h_A$ , и  $h_B$  – показания индикаторов соответственно на опорах А и В;

$H$  – расстояние от оси балки до ножки индикатора.

Результаты занести в таблицу.

**Задание 4.** Теоретический расчет поперечных прогибов и углов поворота сечений балки.

С помощью одного из известных в курсе сопротивления материалов метода определяются прогибы и углы поворота сечений, в которых эти перемещения находились экспериментально. Например, вертикальное перемещение сечения С и угол поворота опорного сечения А могут быть определены по формулам:

$$v_c = \frac{F \cdot b}{6E \cdot J_x \cdot l \cdot (c^3 + b^2 \cdot c - l^2 \cdot c)}$$

$$\varphi_A = \frac{F \cdot a \cdot b}{6E \cdot J_x \cdot l \cdot (l + b)}$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода материала балки, для стали  $2 \cdot 10^5$  МПа

$J_x = bh^3 / 12$  – осевой момент инерции сечения балки,

$l$  – длина балки,

$c$  – расстояние до сечения,

$a$  – расстояние до нагрузки,

$b = l - a$ .

В частном случае, для балки, нагруженной посередине между опорами, перемещение сечения, совпадающего с точкой приложения нагрузки, и угол поворота левого опорного сечения определяются из выражений:

$$v_c = \frac{F \cdot l^3}{48E \cdot J_x}; \quad \varphi_A = \frac{F \cdot l^2}{16E \cdot J_x}$$

Перемещение сечения балки должны быть такими, чтобы материал работал только при упругих деформациях. Поэтому при определении перемещений опытным путем следует вычислять наибольший изгибающий момент, при котором деформация будет упругой.

**Задание 5.** Построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов для нагруженной балки средней силой. По эпюре изгибающих моментов определить нормальное напряжение в балке:

$$\sigma = \frac{Mx}{W_x} < [\sigma] \text{ МПа}$$

Результаты занести в таблицу.

Размер балки	$l =$ мм	$b =$ мм	$h =$ мм
	$a =$ мм	$c =$ мм	

№п/п	F, кг	Величина прогиба			Прогиб по формуле, мм
		1	2	Средние значение	

Вывод: Определить погрешность прибора. Процент расхождения между теоретическими и опытными показаниями.

$$\delta = \frac{u_{\text{теор}} - u_{\text{прак}}}{u_{\text{теор}}} \cdot 100\%$$

Погрешность не должна превышать 10 %

**Контрольные вопросы:**

1. Какой вид деформации называется изгибом?
2. В каком случае изгиб называется прямым поперечным?
3. Что называется упругой линией балки?
4. Как перемещаются поперечные сечения балок?
5. Как теоретически можно определить прогибы и углы поворота сечений балки?
6. Во сколько раз изменится прогиб балки, если нагрузку уменьшить в два раза?
7. Балки изготовленные из стали и чугуна, имеют одинаковые размеры и подвергаются действию одинаковых сил. У какой балки величина прогиба будет больше?

## Лабораторная работа №8 Определение критической силы сжатого стержня

### Цель работы:

1. Провести наблюдение над явлением потери устойчивости.
2. Определить опытным путем величины критической силы и сравнить ее с результатами расчета по формуле Эйлера.
3. Вычислить критические напряжения и сравнить их с пределом пропорциональности.

**Оборудование:** испытательная установка

### Краткое теоретическое обоснование

Если прямолинейный стержень сжимать осевой силой  $F$ , то с возрастанием этой силы стержень вначале только укорачивается, сохраняя прямолинейную форму (рис.1,а), а затем наступает явление потери устойчивости - стержень изгибается (рис1.б).



рис 1.а



рис 1. б

Нагрузка  $F_{кр}$ , превышение которой вызывает потерю устойчивости, называется критической.

Изгиб стержня при потере устойчивости происходит в плоскости наименьшей жесткости, т.е. поперечные сечения поворачиваются вокруг той оси, относительно которой момент инерции имеет минимальное значение. Возможные направления выпучивания стержней с различными поперечными сечениями указаны стрелками на рис.2.

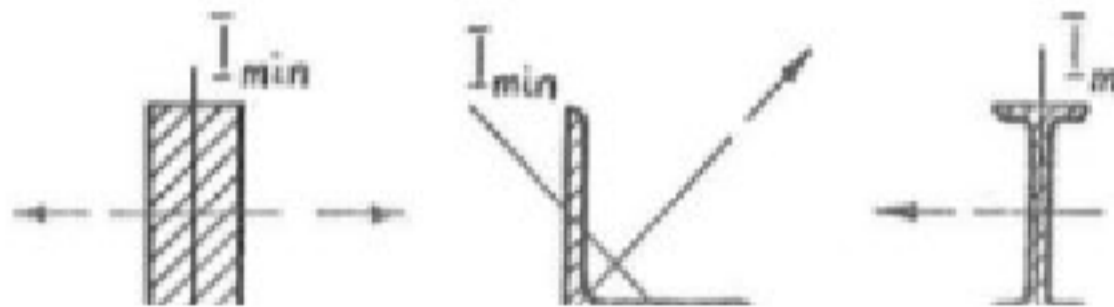


рис 2

Практически можно считать, что критическая сила  $F_{кр}$  эквивалентна нагрузке, «разрушающей» сжатый стержень, выводящей его и связанную с ним конструкцию из условий нормальной работы. Для обеспечения определенного запаса устойчивости необходимо, чтобы выполнялось условие  $F \leq [F]$ , где  $F$  – действующая нагрузка;  $[F]$  – допускаемая нагрузка, которая при коэффициенте запаса устойчивости  $n_y$  равна  $[F] = F_{кр}/n_y$ .

Если напряжения в сжатом стержне не превышают предела пропорциональности  $\sigma_{мп}$ , то величина критической силы определяется по формуле Эйлера

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\mu^2 l^2} I_{min}$$

где  $E$  - модуль продольной упругости,  $I_{min}$  - минимальный момент инерции сечения, - длина стержня,  $\mu$  - коэффициент приведения длины, учитывающий условия закрепления концов стержня (рис.3).

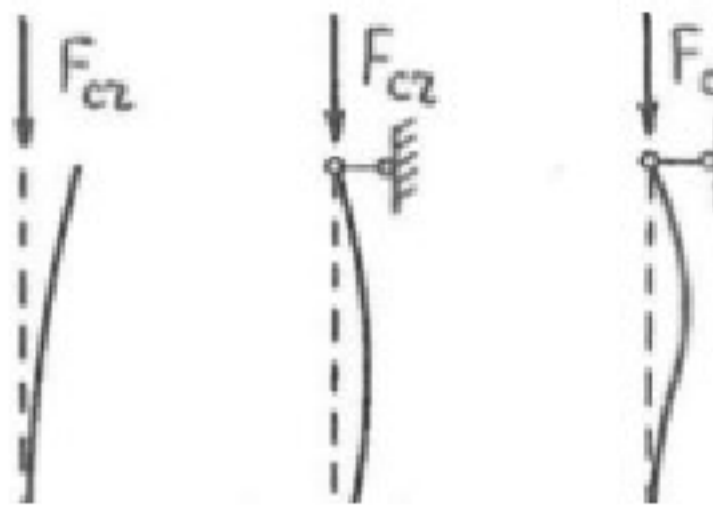


рис. 3

Формулой Эйлера можно пользоваться только в случае, если справедлив закон Гука, то есть пока критическое напряжение  $\sigma_{кр}$  возникшее в стержне при действии критической силы, не превышает предела пропорциональности:

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A} \leq \text{или} \sigma_{кр} = \frac{\pi E}{\lambda^2} \leq$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения стержня;

$$\lambda = \frac{l}{i} \text{ – гибкость стержня.}$$

Условие позволяет определить предельную гибкости стержня  $\lambda_{пред} \geq \sqrt{\frac{E}{\sigma_{проц}}}$ .  
 Здесь  $\sigma_{проц}$  – предел пропорциональности материала стержня. Формулу Эйлера для определения критической силы  $F_{кр}$  можно использовать при условии  $\lambda \geq \lambda_{пред}$ .

При значениях гибкости  $\lambda \leq \lambda_{пред}$  значение критического напряжения может быть вычислено согласно опытным данным по эмпирической формуле  $\sigma_{кр} = a - b\lambda$ . Значения постоянных коэффициентов  $a$ ,  $b$  приведены в справочниках по сопротивлению материалов

Условие, при котором напряжения в сжатом стержне не превышают предела пропорциональности, а, следовательно, и условие применимости формулы Эйлера имеет

место, если гибкость стержня  $\lambda$  больше предельной гибкости  $\lambda_{пр}$ , т.е.  $\lambda = \frac{l}{i_{min}} > \lambda_{пр}$   
 где  $i_{min} = \sqrt{I_{min}/A}$  – минимальный радиус инерции сечения,  $A$  – площадь поперечного сечения стержня.

Например, для стали

Ст. 3 при  $40 \leq \lambda \leq 100$ :  $a = 310$  МПа,  $b = 1,14$  МПа

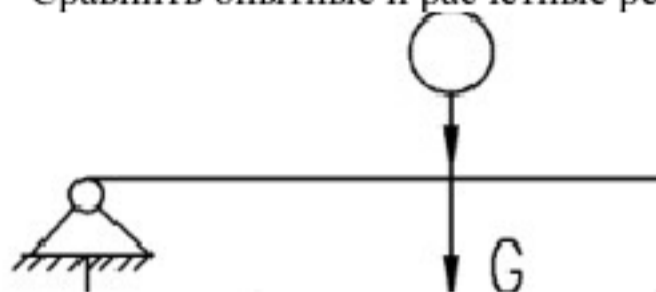
Величина предельной гибкости зависит от модуля продольной упругости  $E$  и предела пропорциональности  $\sigma_{проц}$  и для стали Ст 3 имеет значение  $\lambda_{пр} = 100$ . Следовательно, для стержней из стали Ст 3 формула Эйлера применима, если гибкость стержня  $\lambda$  больше 100. Критические напряжения в сжатом стержне определяются по формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A}$$

#### Порядок выполнения работы

- Снять необходимые геометрические размеры образца.
- Установить образец в приспособление, которое поместить затем между опорами испытательной машины.

- Производить медленное нагружение, непрерывно наблюдая за тензометрами, диаграммой нагружения и поведением стержня.
- Установить величину максимальной силы сжатия, соответствующей внезапному искривлению оси стержня. Разгрузить стержень.
- Подсчитать гибкость стержня, выбрать необходимую формулу и по ней вычислить критическую силу.
- Сравнить опытные и расчетные результаты.



Расчётная схема

Результаты записать в таблицу

$\mu$	Гибкость $\lambda = \frac{\mu l}{i}$	$P_{KR} = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{(\mu l)^2}$
1		
2		

Значения  $\lambda_{кр}$  для различных материалов

Материал
Малокислотистая сталь
Чугун
Хромомолибденовая ст
Дюралюминий

Контрольные вопросы:

1. Какая нагрузка называется критической?
2. В какой плоскости происходит изгиб стержня при потере устойчивости?
3. Запишите формулу Эйлера для определения критической силы.
4. Условия применимости формулы Эйлера имеет вид...
5. Укажите формулу для определения гибкости стержня.
6. От каких характеристик зависит предельная гибкость стержня?
7. Чему равна предельная гибкость стержня из стали марки Ст 3?
8. Укажите формулу для определения критических напряжений.
9. Чему равен предел пропорциональности для стали марки Ст 3?