

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)
Филиал РГУПС в г. Воронеж

Утверждаю:

Заместитель директора по УПР
филиала РГУПС в г. Воронеж

_____ Гуленко П.И

«01» сентября 2023 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ
по дисциплине ОП.04 Техническая механика
базовая подготовка**

Специальность: 13.02.07 Электроснабжение (по отраслям)

Профиль: технический

Квалификация выпускника: техник

Форма обучения: очная

Воронеж 2023 г.

Автор-составитель: преподаватель Кузнецова О.С. первой категории

(уч. звание, должность, Ф.И.О)

предлагает методические указания по выполнению практических работ по дисциплине

ОП.04 Техническая механика

(код по учебному плану и название дисциплины, МДК,ПМ)

Методические указания рассмотрены на заседании цикловой комиссии
общепрофессиональных дисциплин

Протокол № 07 от 01.09.2023 г.

Председатель цикловой комиссии _____ Гукова Н.С.

(подпись) (Ф.И.О.)

Введение

Методическое пособие по проведению практических занятий и лабораторных работ ОП 04 Техническая механика, разработано в соответствии с ФГОС СПО по специальности 13.02.07 Электроснабжение (по отраслям).

Целью выполнения практических занятий и лабораторных работ является:

- научиться решать типовые задачи;
- получить навыки правильного использования расчетных формул;
- опытным путем привить навыки проверки результатов теоретического расчета;
- установить взаимосвязь между теорией и практикой;
- закрепить знания по темам.

Практические занятия и лабораторные работы можно условно подразделить на группы.

К первой группе относятся занятия по решению задач.

Ко второй группе-занятия, посвященные опытной проверке теоретических положений.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Уметь:

- использовать методы проверочных расчетов на прочность, действий изгиба и кручения;
- выбирать способ передачи вращательного момента.

Знать:

- основные положения и аксиомы статики, кинематики, динамики, детали машин.

При подготовке к очередному практическому занятию и лабораторной работе обучающийся изучает соответствующую работу, используя при этом рекомендуемую на занятиях литературу, а также свои конспекты. Объем лабораторного исследования рассчитан на одно занятие. В течение этого же времени обучающийся составляет отчет о проделанной работе и сдает его преподавателю.

При подготовке к каждому практическому занятию и лабораторной работе обучающиеся должны повторить материал соответствующей темы.

Определение равнодействующей плоской системы сходящихся сил аналитическим способом.

Цель: научиться определять равнодействующую систему сил..

Оборудование: калькулятор, конспект лекций.

Порядок выполнения

1. Указать точку, равновесие которой рассматривается.

В задачах такой точкой является центр тяжести тела или точки пересечения всех стержней и нитей.

2. Приложить к рассматриваемой точке активные силы.

Активными силами являются собственный вес тела или вес груза, которые направлены к центру тяжести земли. При наличии блока вес груза действует на рассматриваемую точку вдоль нити. Направление действия этой силы устанавливается из чертежа. Вес тела принято обозначать Q .

3. Мысленно отбросить связи, заменяя их действия реакциями связей.

При замене связей реакциями следует помнить, что реакция плоскости направлена по нормали (перпендикуляр) к ней в точке контакта, а реакции стержня и нити — по их осям. Реакцию нити и стержня принято называть усилиями.

4. Выбрать положение прямоугольной системы координат.

Начало координат совмещают с точкой, равновесие которой рассматривается.

5. Составить уравнения равновесия вида:

$$\sum F_x = 0; \sum F_y = 0.$$

6. Выполнить проверку решения: меняем координатные оси и снова составляем уравнение равновесия.

Пример 1. Решение задачи на равновесие аналитическим способом.

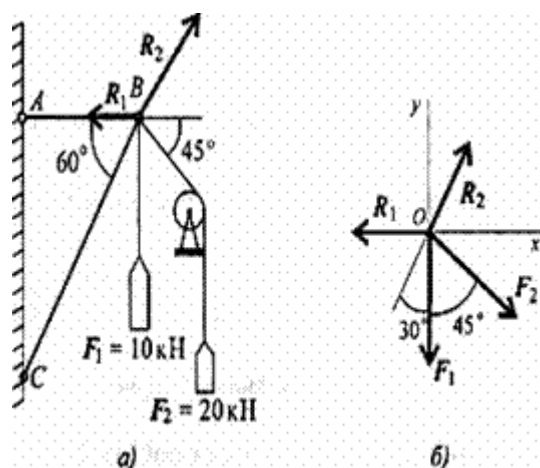
Грузы подвешены на стержнях и канатах и находятся в равновесии. Определить реакции стержней AB и CB (рис. П1.2).

Решение

1. Определяем вероятные направления реакций (рис. П1.2а). Мысленно убираем стержень AB , при этом стержень CB опускается, следовательно, точка B отодвигается от стены: назначение стержня AB — тянуть точку B к стене.

Если убрать стержень CB , точка B опустится, следовательно, стержень CB поддерживает точку B снизу — реакция направлена вверх.

2. Освобождаем точку B от связи (рис. П1.2б).



3. Рис. П1.2

Выберем направление осей координат, ось Ox совпадает с реакцией R_1 .

4. Запишем уравнения равновесия точки B :

$$\sum_0^n F_{kx} = -R_1 + R_2 \cos 60^\circ + F_2 \cos 45^\circ = 0;$$

$$\sum_0^n F_{ky} = R_2 \cos 30^\circ - F_1 - F_2 \cos 45^\circ = 0.$$

5. Из второго уравнения получаем:

$$R_2 = \frac{F_1 + F_2 \cos 45^\circ}{\cos 30^\circ}; \quad R_2 = \frac{10 + 20 \cdot 0,7}{0,866} = 27,87 \text{ кН.}$$

Из первого уравнения получаем:

$$R_1 = R_2 \cos 60^\circ + F_2 \cos 45^\circ; \quad R_1 = 28,07 \text{ кН.}$$

Вывод: стержень AB растянут силой 28,07 кН, стержень CB сжат силой 27,87 кН.

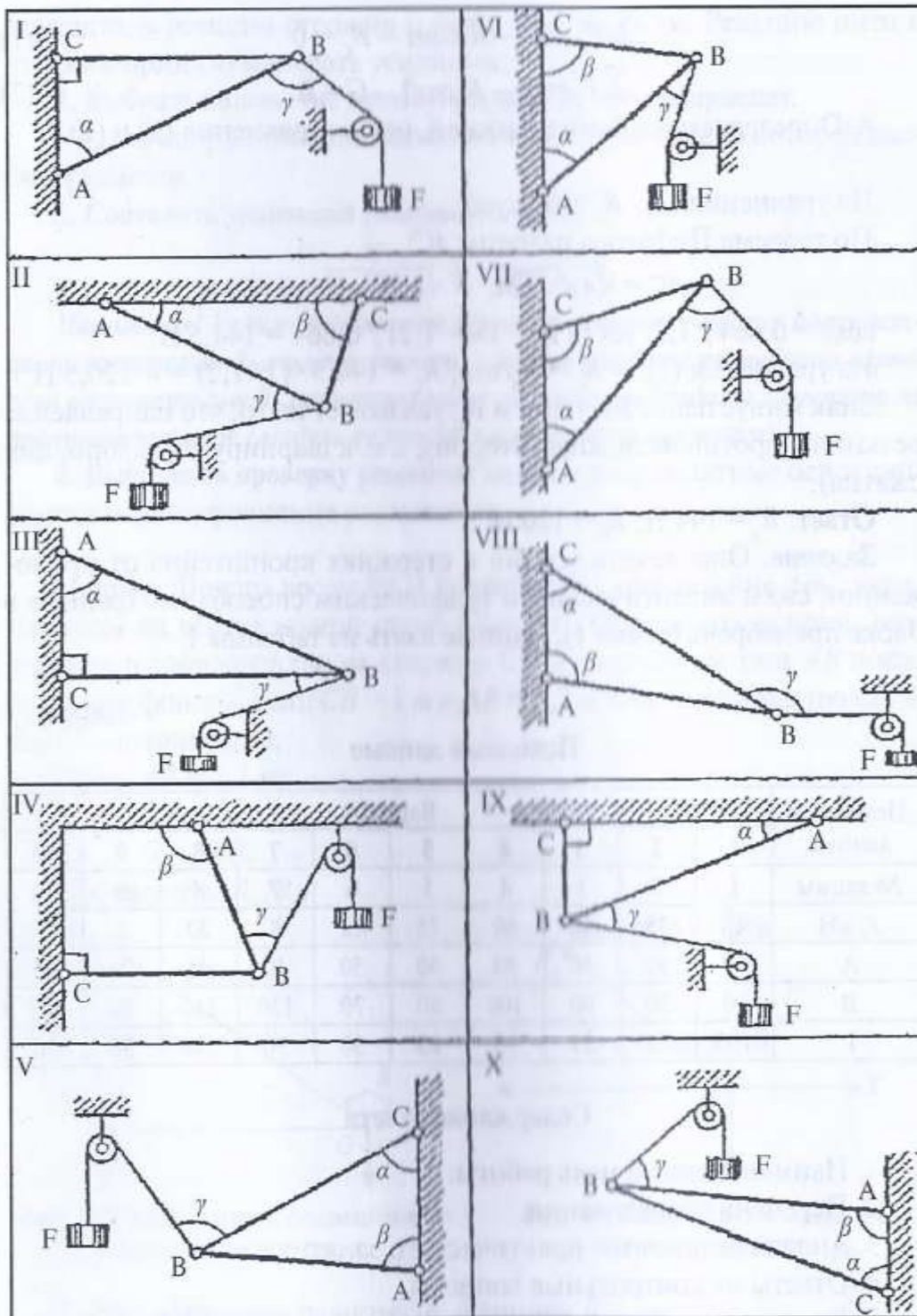
Задание. Определить усилия в стержнях кронштейна от приложенной силы аналитическим способом. Трением в блоке пренебречь. Данные взять из таблицы.

Исходные данные

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F , кН	40	35	48	60	75	12	8	20	3	6
A	60	30	50	90	50	50	40	45	20	45
B	90	70	90	100	80	70	120	110	90	115
Г	100	75	35	35	85	30	70	140	35	50

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень оборудования.
3. Анализ результатов практического занятия.
4. Выводы по работе.



Практическое занятие №2

Определение реакций в опорах балочных систем под действием сосредоточенных сил.

Цель: ознакомиться с видами опор балок, научиться составлять расчетную схему балки и определять реакции их опор.

Оборудование: калькулятор, конспект лекций.

Порядок выполнения

1. Балку освободить от связей (связи) и их (его) действие заменить силами реакций.

2. Выбрать координатные оси.

3. Составить и решить уравнения равновесия.

Реакции опор можно определить, исходя из трех форм уравнений равновесия:

а) $\sum F_{ix} = 0;$

$\sum F_{iy} = 0;$

$\sum M_A = 0;$

б) $\sum F_{ix} = 0;$

$\sum M_A = 0;$

$\sum M_B = 0;$

в) $\sum M_A = 0;$

$\sum M_B = 0;$

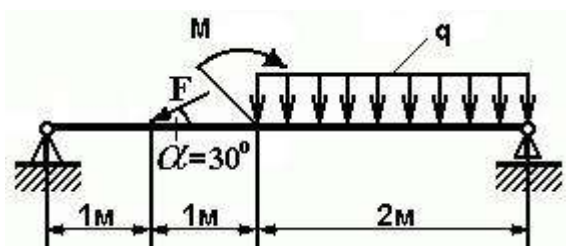
$\sum M_C = 0.$

4. Проверить правильность решения задачи. Проверку необходимо производить по тому уравнению равновесия, которое не было использовано при решении данной задачи (задача решена правильно лишь в том случае, если после постановки значений активных и реактивных сил в уравнение равновесия выполняется условие равновесия).

5. Сделать анализ решенной задачи (если при решении задачи реакции опор или реактивный момент получается отрицательным, то их действительное направление противоположно принятому).

Пример 1. Определить реакции опор балки, если известно

$F = 20 \text{ кН}, M = 10 \text{ кН м}, q = 1 \text{ кН/м}$



Решение:

1 Изображаем балку вместе с нагрузками.

2 Выбираем расположение координатных осей, совместив ось X с балкой, а ось Y направив перпендикулярно оси X .

3 Производим необходимые преобразования заданных активных сил: силу, наклонённую к оси балки под углом α , заменяем двумя взаимно перпендикулярными составляющими

$$F_x = F \times \cos 30^\circ = 20 \times 0,866 = 17,32 \text{ кН}$$

$$F_y = F \times \cos 60^\circ = 20 \times 0,5 = 10 \text{ кН},$$

а равномерно распределенную нагрузку - её равнодействующей

$$Q = q \times CD = 1 \times 2 = 2 \text{ кН},$$

Равнодействующая Q приложена в середине участка CD , в точке K (рисунок 6).

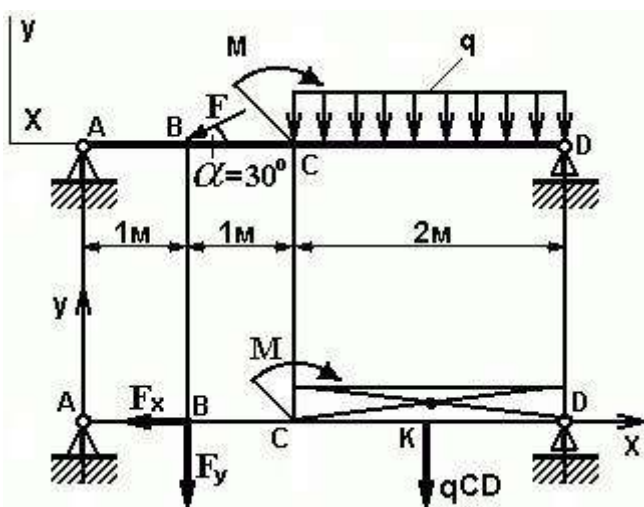


Схема преобразования заданных активных сил

4. Освобождаем балку от опор, заменив их опорными реакциями, направленными вдоль выбранных осей координат.

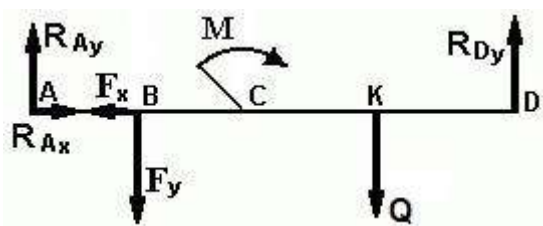


Схема реакций балки

5. Составляем уравнения равновесия статики для произвольной плоской системы сил таким образом и в такой последовательности, чтобы решением каждого из этих уравнений

было определение одной из неизвестных реакций опор и определяем неизвестные реакции опор.

$$\sum M_A = 0; F_y \times AB + M + Q \times AK - R_{Dy} \times AD = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_D = 0; R_{Ay} \times AD - F_y \times BD + M - Q \times KD = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_{ix} = 0; R_{Ax} - F_x = 0 \quad (3)$$

6 Определяем реакции опор балок R_{Ay} , R_{Dy} и R_{Ax} решая уравнения.

Из уравнения (1) получаем

$$R_{Dy} = F_y \times AB + M + Q \times AK / AD = 10 \times 1 + 10 + 2 \times 3 / 4 = 6,5 \text{ кН}$$

Из уравнения (2) получаем

$$R_{Ay} \times AD = F_y \times BD - M + Q \times KD / AD = 10 \times 3 - 10 + 2 / 4 = 5,5 \text{ кН}$$

Из уравнения (3) получаем

$$R_{Ax} = F_x = F \times \cos 30^\circ = 20 \times 0,866 = 17,32 \text{ кН}$$

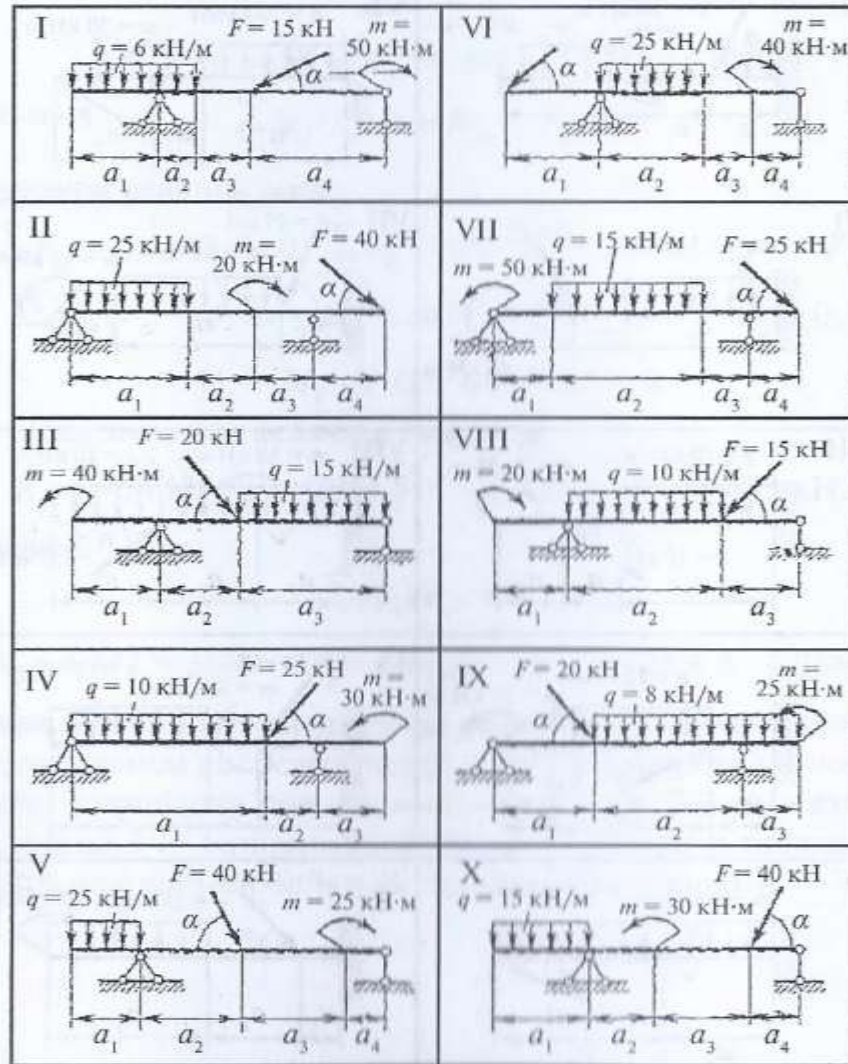
7 Проверяем правильность найденных результатов:

$$\sum F_{iy} = 0; R_{Ay} - F_y - Q + R_{Dy} = 5,5 - 10 - 2 + 6,5 = 0$$

Условие равновесия $\sum F_{iy} = 0$ выполняется, следовательно, реакции опор найдены верно.

Исходные данные

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол α^0	30	27	55	75	65	30	45	32	27	80
$a_1, \text{м}$	1,2	2,5	1,5	3,0	1,2	1,1	1,2	1,5	1,8	1,5
$a_2, \text{м}$	0,5	1,2	1,2	0,8	1,5	2,5	3,0	2,5	2,2	0,8
$a_3, \text{м}$	0,8	0,8	2,5	1,2	1,5	0,7	0,5	1,5	0,7	1,5
$a_4, \text{м}$	2,5	1,2	—	—	0,5	0,7	0,8	—	—	0,6



Практическое занятие №3

Определение центра тяжести сечения

Цель: научиться определять положение центра тяжести сложной фигуры аналитическим и опытным путем; получить подтверждение традиционных расчетов и исследований.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с заданием начертить чертеж фигуры сложной формы в масштабе и проставить ее размеры.
2. Разбить чертёж фигуры на простейшие составные части, показать центр тяжести каждой из них.
3. Провести оси координат так, чтобы они охватывали всю фигуру (если фигура не симметричная, желательно располагать плоскую фигуру в первой четверти системы координатных осей).
4. Используя знания по определению центра тяжести простейших плоских фигур (рисунок 8).

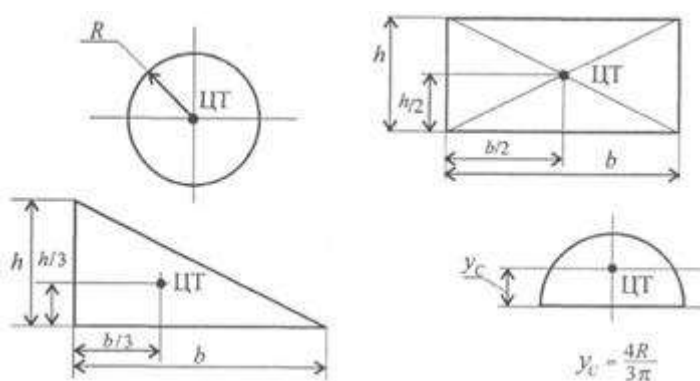


Рисунок 8 Центры тяжести простейших плоских фигур

5. Вычислить координаты центра тяжести всей фигуры аналитическим способом.

Координаты центра тяжести всей фигуры X_c и Y_c определяют по формулам:

$$X_c = \frac{X_1 \cdot A_1 + X_2 \cdot A_2 + \dots + X_i \cdot A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} = \frac{\sum X_i \cdot A_i}{\sum A_i},$$
$$Y_c = \frac{Y_1 \cdot A_1 + Y_2 \cdot A_2 + \dots + Y_i \cdot A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} = \frac{\sum Y_i \cdot A_i}{\sum A_i}, \quad (5)$$

где X_1, X_2, \dots, X_i - расстояние от оси Y до центра тяжести простой фигуры, см;

Y_1, Y_2, \dots, Y_i - расстояние от оси X до центра тяжести простой фигуры, см;

A_1, A_2, \dots, A_i - площадь простой фигуры, см².

Если сложная фигура имеет отверстие в виде геометрических фигур, то эти площади необходимо ввести в формулу со знаком «минус». Этот метод называется методом отрицательных площадей.

6. Проверить правильность решения задачи, используя другой метод разбивки.

Пример: Определить координаты центра тяжести плоской фигуры, изображённой на рисунке 9, если известно $a = 40$ см, $b = 100$ см, $r = 20$ см.

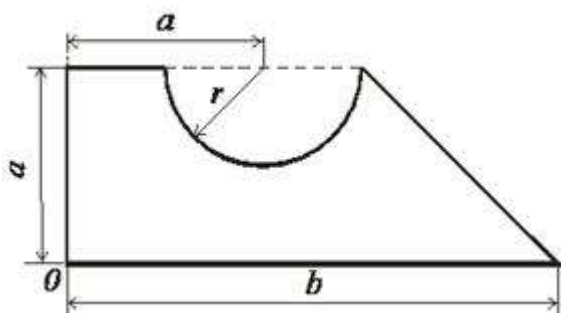


Рисунок 9 Схема задачи

Решение:

1. Разбиваем чертёж фигуры на простейшие составные части: прямоугольник, треугольник, полукруг, обозначаем центр тяжести каждой из них и располагаем чертёж фигуры в первой четверти координатных осей (рисунок 10).

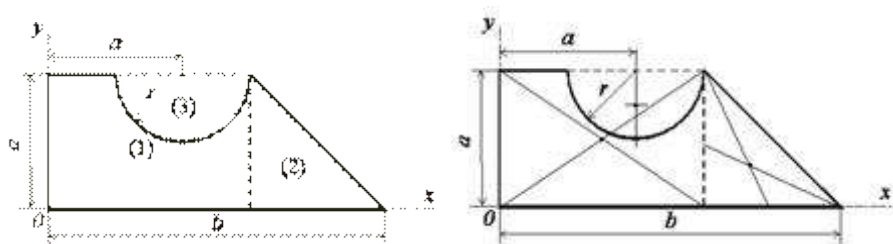


Рисунок 10 Разбиение на части

2. а) Площади сечения простейших фигур
 для прямоугольника $A_1 = 40 \times 60 = 2400$ см²
 для треугольника $A_2 = 40 \times 40 / 2 = 800$ см²
 для полукруга $A_3 = r \times 20^2 / 2 = 628$ см²

б) Центры тяжестей рассматриваемых частей фигуры имеют следующие координаты:

для прямоугольника $x_1 = 30$ см, $y_1 = 20$ см;
 для треугольника $x_2 = 60 + 40/3 = 73,3$ см, $y_2 = 40/3 = 13,3$ см;
 для полукруга $x_3 = 40$ см, $y_3 = 40 - 4 \cdot 20 / (3 \cdot \pi) = 31,5$ см.

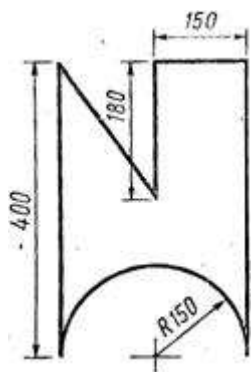
3 Вычисляем координаты центра тяжести фигуры по формулам

$$X_c = (2400 \times 30 + 800 \times 73,3 - 628 \times 40) / (2400 + 800 - 628) = 41 \text{ см}$$

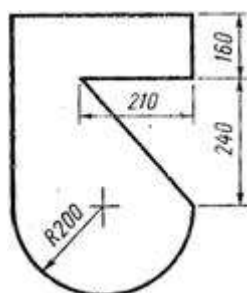
$$Y_c = (2400 \times 20 + 800 \times 13,3 - 628 \times 31,5) / (2400 + 800 - 628) = 15,1 \text{ см}$$

Ответ: С (41;15,1)

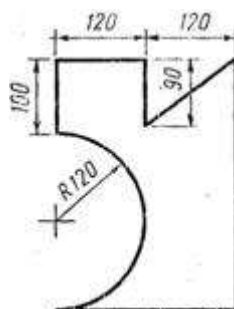
Задание



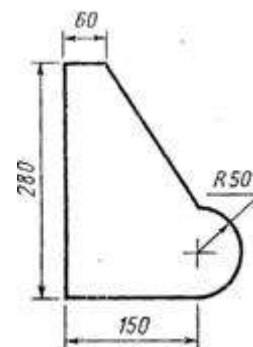
Вариант 1, 11



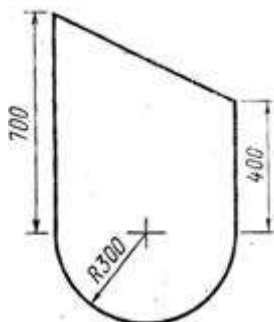
Вариант 2, 12



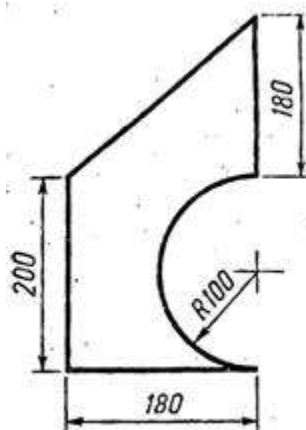
Вариант 3, 13



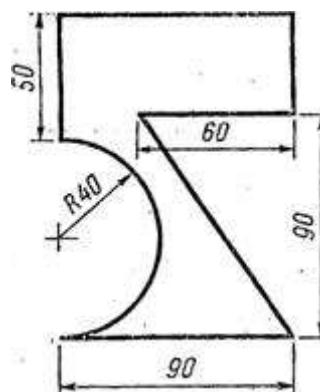
Вариант 4, 14



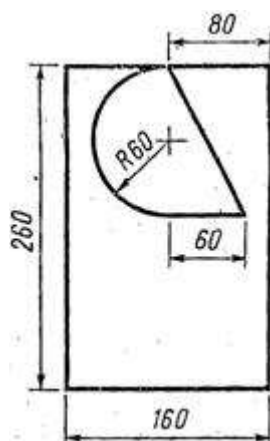
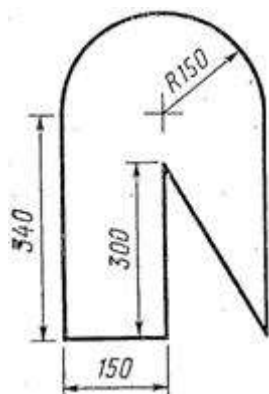
Вариант 5, 15



Вариант 6, 16



Вариант 7, 17



Практическое занятие №4

Расчет материалов на прочность при растяжении и сжатии

Цель: освоить порядок расчетов на прочность при растяжении и сжатии.

Пример. Груз закреплен на стержнях и находится в равновесии (рис. П6.1).
Материал стержней - сталь, допускаемое напряжение 160 МПа. Вес груза 100 кН.
Длина стержней: первого - 2 м, второго - 1 м. Определить размеры поперечного сечения и удлинение стержней. Форма поперечного сечения - круг.

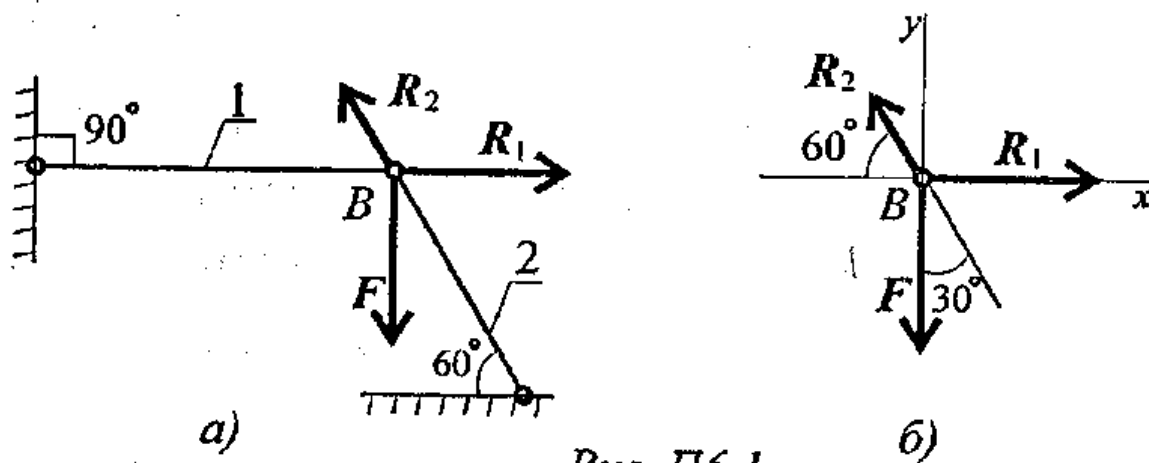


Рис. П6.1

Решение

1. Определить нагрузку на стержни. Рассмотрим равновесие точки B , определим реакции стержней. По пятой аксиоме статистики (закону действия и противодействия) реакция стержня численно равна нагрузке на стержень.

Наносим реакции связей, действующих в точке B . Освобождаем точку B от связей (рис. П6.1).

Выбираем систему координат так, чтобы одна из осей координат совпала с неизвестной силой (рис. П6.1б).

Составим систему уравнений равновесия для точки B :

$$\begin{aligned} \sum F_x &= -R_2 \cos 60^\circ + R_1 = 0; \\ \sum F_y &= R_1 \cos 30^\circ - F = 0; \end{aligned}$$

Решаем систему уравнений и определяем реакции стержней.

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{F}{\cos 30^\circ}; & R_2 &= \frac{100}{0,866} = 115,5 \text{ кН.} \\ R_1 &= R_2 \cos 60^\circ; & R_1 &= 115,5 \cdot 0,5 = 57,4 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Направление реакций выбрано верно. Оба стержня сжаты. Нагрузки на стержни: $F_1 = 57,4$ кН; $F_2 = 115,5$ кН.

2. Определяем требуемую площадь поперечного сечения стержней из условий прочности.

Условие прочности на сжатие: $\sigma = N/A \leq [\sigma]$, откуда

$$A = \frac{N}{[\sigma]}.$$

Стержень 1 ($N_1 = A_1$):

$$A_1 \geq \frac{57,4 \cdot 10^3}{160} = 358,75 \text{ мм}^2.$$

Для круга

$$A = \pi R^2; \quad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}; \quad R_1 \geq \sqrt{\frac{358,75}{3,14}} = 10,68 \text{ мм}; \quad d_1 = 21,3 \text{ мм}.$$

Стержень 2 ($N_2 = F_2$):

$$A_2 \geq \frac{115,1 \cdot 10^3}{160} = 722 \text{ мм}^2; \quad R_2 \geq \sqrt{\frac{722}{3,14}} = 15,2 \text{ мм}; \quad d_2 = 30,4 \text{ мм}.$$

Полученные диаметры округляем: $d_1 = 25 \text{ мм}$, $d_2 = 32 \text{ мм}$.

3. Определяем удлинение стержней $\Delta l = \frac{Nl}{AE}$.

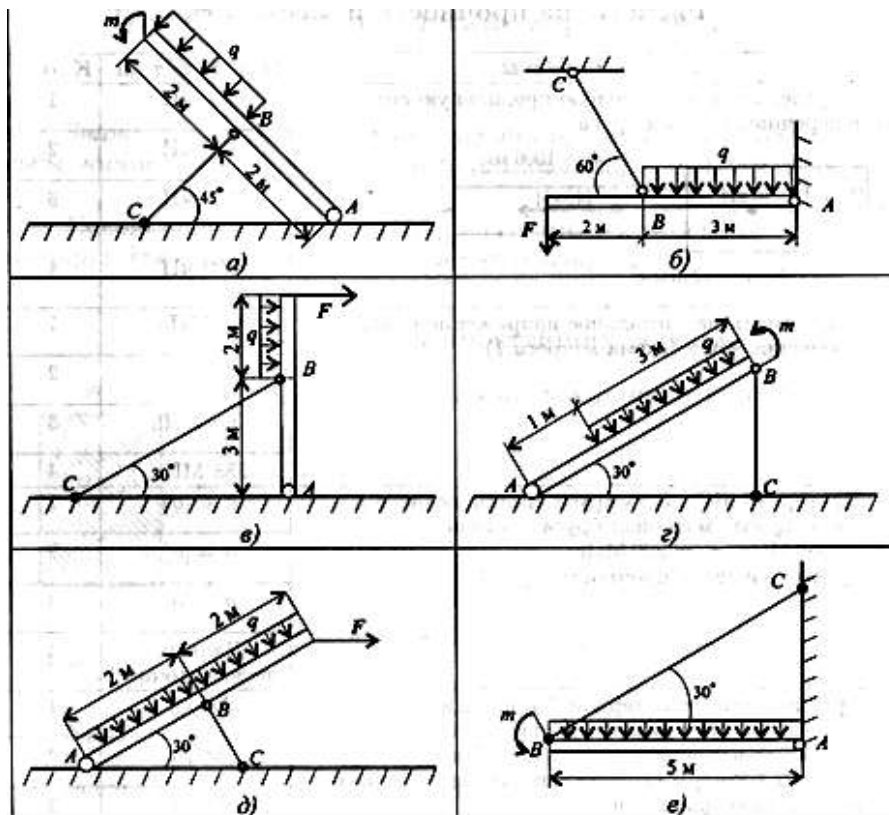
Укорочение стержня 1:

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}; \quad A_1 = \frac{3,14 \cdot 25^2}{4} = 490 \text{ мм}^2;$$
$$\Delta l_1 = \frac{57,4 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 490} = 1,17 \text{ мм}.$$

Укорочение стержня 2:

$$A_2 = \frac{3,14 \cdot 32^2}{4} = 804 \text{ мм}^2;$$
$$\Delta l_2 = \frac{115,5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 804} = 0,72 \text{ мм}.$$

Исходные данные



Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F, \text{ кН}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$m, \text{ кН}\cdot\text{м}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$q, \text{ кН/м}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22

Практическое занятие №5

Выполнение расчетов на прочность при растяжении и сжатии

Цель: научиться выполнять проверочный расчет стержня на прочность, строить эпюры продольных сил N и нормальных напряжений σ .

Задание:

- 1 По полученному варианту выбрать стержень и схему нагружения.
- 2 Разбить стержень на участки и определить внутренний силовой фактор (продольные силы и нормальные напряжения).
- 3 Построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений.
- 4 Определить абсолютную деформацию стержня.
- 5 Проверить прочность стального ступенчатого стержня.

Порядок выполнения работы:

- 1 Ознакомиться с данными методическими указаниями.

Вычертить предложенную схему нагружения стального ступенчатого стержня, согласно второй цифре варианта (таблица 1.1), оставив место для построения эпюр продольных сил и нормальных напряжений. Из таблицы 1.2 выписать (согласно первой цифре варианта) размеры и величины сил нагружения.

Модуль упругости материала (Ст 3) $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. $[\sigma] = 160$ МПа.

- 2 Определение продольных сил и нормальных напряжений

2.1 Разбиваем стержень на отдельные участки, начиная со свободного конца. Участки ограничены сечениями, в которых приложены внешние силы или происходит резкое изменение их размеров.

2.2 Пользуясь методом сечений, определяем значения продольных сил в сечениях стержня.

$$\sum F_y = 0, \quad (6)$$

То же делаем для последующих участков

По полученным значениям N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 строим эпюру N .

2.3 Определяем значения нормальных напряжений σ (в МПа) по участкам, используя формулу 7:

$$\sigma = N / A, \quad (7)$$

3 По полученным напряжениям строим эпюру σ .

Если участок растягивается – такую деформацию считаем положительной, а если сжимается – отрицательной

Определяем опасный участок. По наибольшему нормальному напряжению σ_{max} .

4 Определяем абсолютную деформацию ступенчатого стержня

$$\Delta l = \sum \Delta l_i, \quad (8)$$

где Δl_i – деформация отдельного участка стержня (определяется по формуле 9).

$$\Delta l_i = \sigma_i \cdot l_i / E, \quad (9)$$

Положительное значение деформации ступенчатого бруса под действием внешней нагрузки указывает на то, что стержень удлиняется.

5 Проверяем прочность бруса исходя из условия прочности на растяжение (сжатие):

$$\sigma_{max} = N / A \leq [\sigma], \quad (10)$$

Пример: Для бруса ступенчатого сечения требуется:

- 1 Построить эпюру продольных сил N в сечениях бруса
- 2 Построить эпюру нормальных напряжений σ
- 3 Определить абсолютные деформации участков бруса и построить эпюру перемещений d
- 4 Определить относительную поперечную деформацию на заданном участке

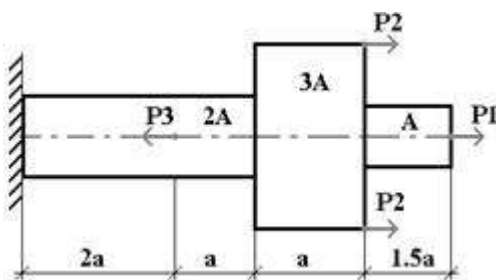


Рисунок 11 Заданный брус с нагрузкой

В соответствии с вариантом дано:

$$a=1\text{м}; P_1=5\text{кН}; P_2=2\text{кН}; P_3=10\text{кН}; A=5\text{см}^2; m=0.2; E=2 \times 10^3 \text{МПа}$$

Поперечную деформацию определить на III участке.

Решение:

Построение эпюры N

Решение задачи начинается от свободного конца бруса. Это позволяет начать построение эпюры N без определения реакции опоры. Эпюра N строится методом сечений. Разделяем брус на участки. Границами участков являются точки приложения внешних сил, перемена сечения бруса и опора.

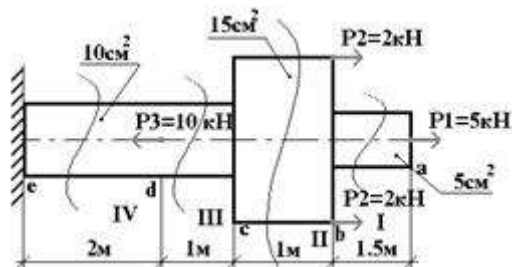


Рисунок 12 Расчетная схема бруса

Границы участков обозначим буквами a, b, c, d, e.

I участок (ab)

$$N_I = P_1 = 5 \text{ кН (растяжение)}$$

II участок (bc)

$$N_{II} = P_1 + 2P_2 = 5 + 2 \times 2 = 9 \text{ кН (растяжение)}$$

III участок (cd)

$$N_{III} = P_1 + 2P_2 = 9 \text{ кН (растяжение)}$$

IV участок (de)

$$N_{IV} = P_1 + 2P_2 - P_3 = -1 \text{ кН (сжатие)}$$

Строим эпюру продольной силы. Для этого:

- 1 Проводим ось, параллельную оси бруса
- 2 Откладываем в масштабе значения продольной силы по участкам.
- 3 Ставим знак усилия и штрихуем перпендикулярно оси бруса

Построение эпюры

Значение нормальных напряжений на участке получаем как отношение продольной силы к площади поперечного сечения участка по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

I участок (ab):

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{A_1} = \frac{5}{5} = 1 \text{ кН/см}^2$$

II участок (bc):

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{A_2} = \frac{9}{15} = 0.6 \text{ кН/см}^2$$

III участок (cd):

$$\sigma_3 = \frac{N_3}{A_3} = \frac{9}{10} = 0.9 \text{ кН/см}^2$$

IV участок (de):

$$\sigma = \frac{N_4}{A_4} = \frac{-1}{10} = -0.1 \text{ кН/см}^2$$

Строим эпюру нормальных напряжений σ .

Абсолютные деформации участков определяются по закону Гука по формуле:

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot A} = \frac{\sigma \cdot l}{E} \quad (2)$$

I участок (ab):

$$\Delta l_1 = \frac{N_1 \cdot l_1}{E \cdot A_1} = \frac{\sigma_1 \cdot l_1}{E} = \frac{1 \cdot 150}{2 \cdot 10^2} = 0.75 \text{ см}$$

$$E = 2 \times 10^3 \text{ МПа} = 2 \times 10^2 \text{ кН/см}^2$$

II участок (bc):

$$\Delta l_2 = \frac{\sigma_2 \cdot l_2}{E} = \frac{0.6 \cdot 100}{2 \cdot 10^2} = 0.3 \text{ см}$$

III участок (cd):

$$\Delta l_3 = \frac{\sigma_3 \cdot l_3}{E} = \frac{0.9 \cdot 100}{2 \cdot 10^2} = 0.45 \text{ см}$$

IV участок (de):

$$\Delta l_{IV} = \frac{\sigma_4 \cdot l_4}{E} = -\frac{0.1 \cdot 200}{2 \cdot 10^2} = -0.1 \text{ см}$$

Определение линейных перемещений d :

Расчет начинаем от опоры, зная, что $d_{оп} = d_e = 0$

$$d_d = d_e + D \cdot l_{IV} = 0 - 0.1 = -0.1$$

$$d_c = d_d + D \cdot l_{III} = -0.1 + 0.45 = 0.35$$

$$d_b = d_c + D \cdot l_{II} = 0.35 + 0.3 = 0.65$$

$$d_a = d_b + D \cdot l_{I} = 0.65 + 0.75 = 1.4$$

Строим эпюру перемещений

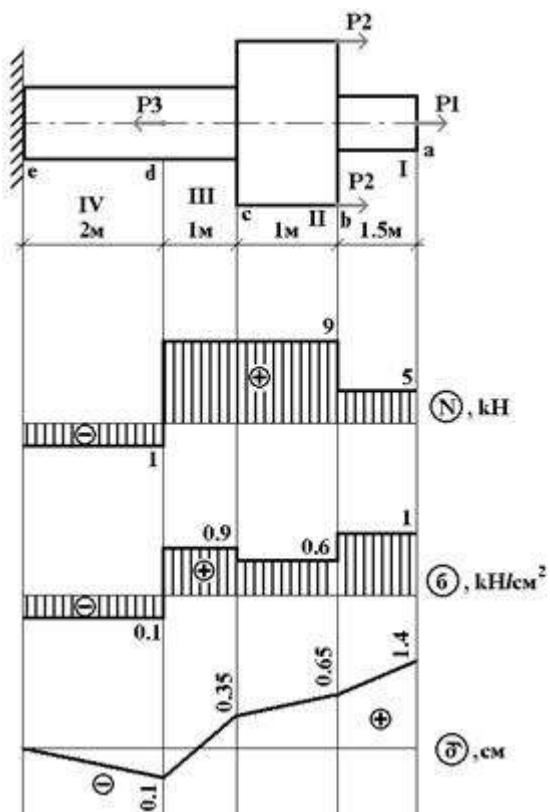


Рисунок 13 Результаты решения задачи

4. Определение относительной поперечной деформации на III участке:

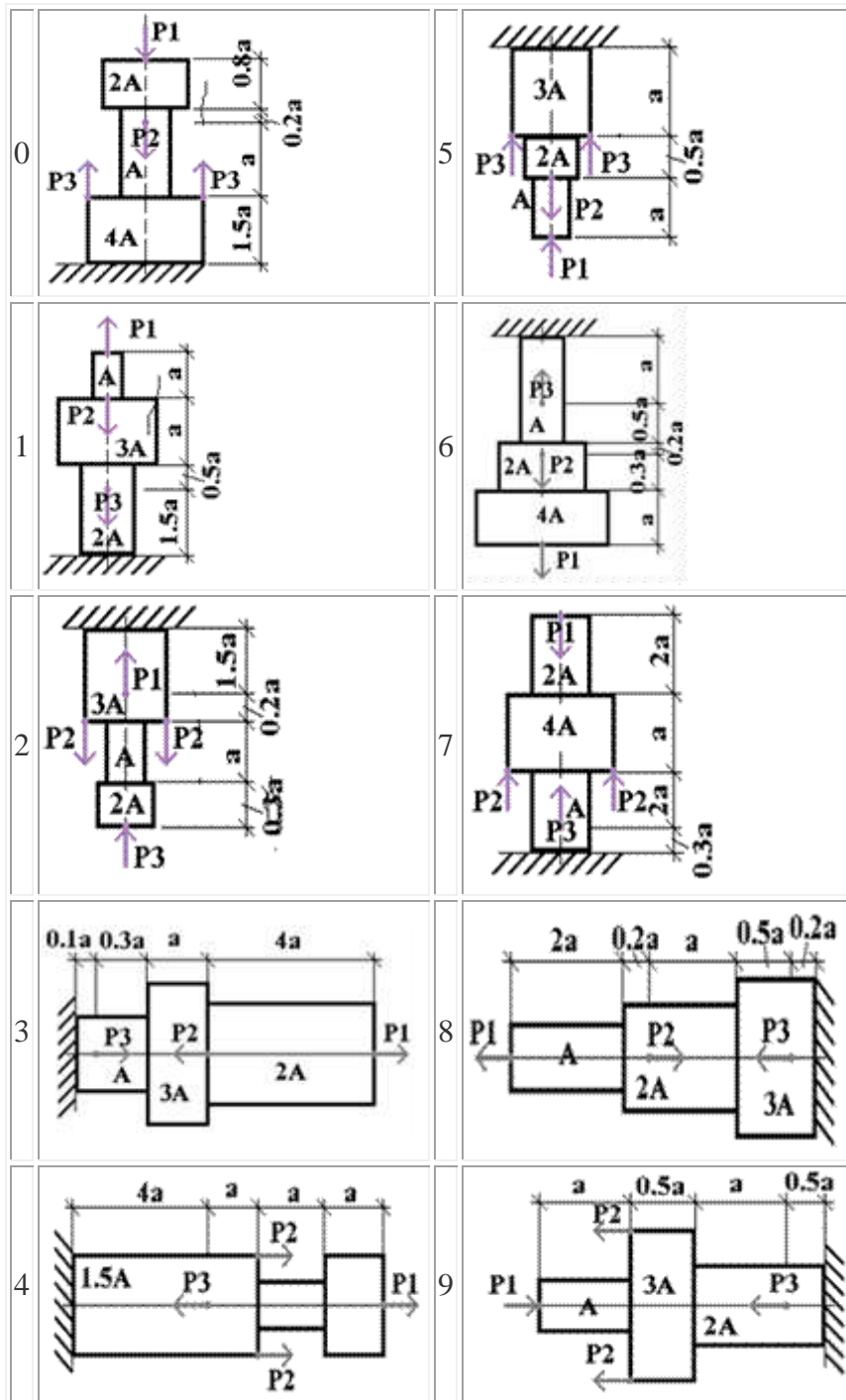
$$e\phi = -m \times e; \quad m = 0.2 \quad (3)$$

$$e_{III} = \frac{\Delta l_{III}}{l_3} = \frac{0.45}{100} = 0.045$$

$$e\phi_{III} = -0.2 \times 0.045 = -0.009$$

Варианты задания:

Схемы нагружения стальных ступенчатых стержней (вторая цифра варианта)



Практическое занятие №6

Испытание стального образца на срез и смятие

Пример. Проверить прочность стержня на растяжение его головки на срез и опорной поверхности под головкой на смятие, если допускаемые напряжения

$$[\sigma_p] = 110 \text{ Н/мм}^2, [\tau_{ср}] = 60 \text{ Н/мм}^2 \text{ и } [\sigma_{см}] = 120 \text{ Н/мм}^2 .$$

Решение

1. Диаметр стержня $d = 5$ мм, следовательно, площадь поперечного сечения стержня

$$A = \pi d^2/4 = \pi 5^2/4 = 19,6 \text{ мм}^2,$$

а нормальная сила в этом сечении $N = F = 2 \text{ кН} = 2000 \text{ Н}$.

Рабочее напряжение в поперечном сечении

$$\sigma = N/A = 2000 / 19,6 = 102 \text{ Н/мм}^2 < [\sigma_p].$$

2. Головка стержня может быть срезана по цилиндрической поверхности диаметром $d = 5$ мм и высотой $h = 2$ мм, т.е. $A_{ср} = \pi dh = \pi 5 \cdot 2 = 31,4 \text{ мм}^2$.

Следовательно, при $Q = F$ рабочее напряжение среза

$$[\tau_{ср}] = Q / A_{ср} = 2000 / 31,4 = 63,7 \text{ Н/мм}^2 > [\tau_{ср}].$$

Перегрузка составляет $[(63,7 - 60) / 60] \cdot 100\% = 6,33\%$, что не допустимо. Необходимо, либо снизить нагрузку, либо взять стержень с более высокой головкой.

3. Поверхность контакта между головкой стержня и опорой имеет форму плоского кольца, т.е. $A_{см} = [\pi(D^2 - d^2)] / 4$.

Рабочее напряжение определяем по формуле

$$\sigma_{см} = (F \cdot 4) / [\pi(D^2 - d^2)] = 2000 \cdot 4 / [\pi(8^2 - 5^2)] = 65 \text{ Н/мм}^2 < [\sigma_{см}].$$

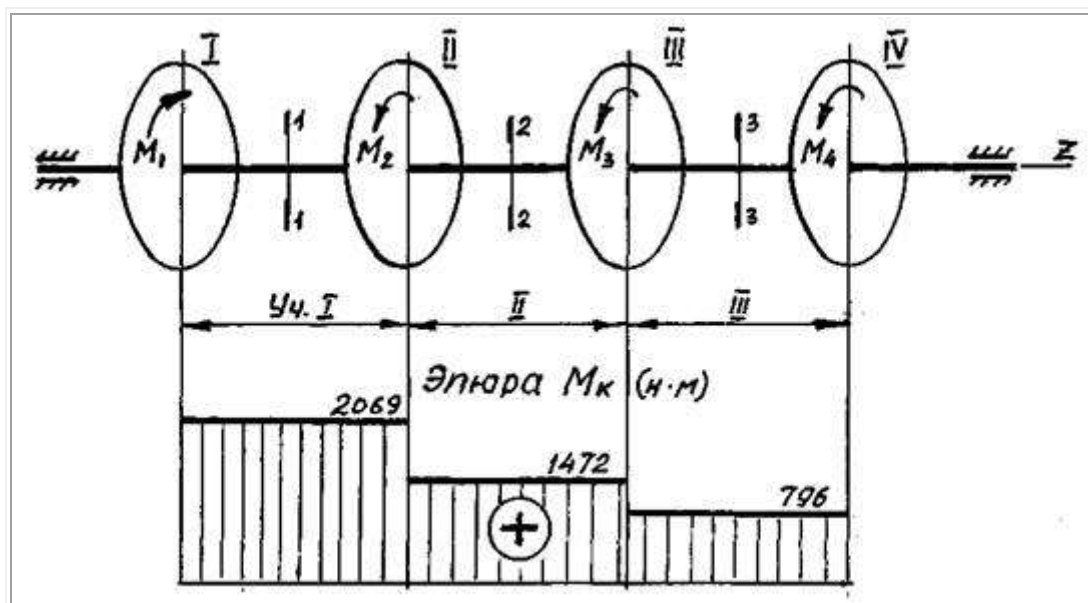
Практическое занятие №7

Расчет на прочность и жесткость при кручении

Цель: освоить порядок расчетов на прочность и жесткость при кручении.

Пример выполнения

Приводной шкив I получает от двигателя мощность, а шкивы II, III и IV снимают мощности: $P_2=15$ кВт, $P_3=17$ кВт, $P_4=20$ кВт. Частота вращения вала $n=240$ об/мин. Построить эпюру « M_k » и определить диаметр вала на участках из условий прочности и жесткости.



Решение.

1. Определяем моменты, передаваемые шкивами:

$$P_1 = P_2 + P_3 + P_4 = 15 + 17 + 20 = 52 \text{ кВт}$$

$$M_1 = 9,55 \frac{P_1}{n} = 9,55 \frac{52 \cdot 10^3}{240} = 2069 \text{ Н·м}$$

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{15 \cdot 10^3}{240} = 597 \text{ Н·м}$$

$$M_3 = 9,55 \frac{P_3}{n} = 9,55 \frac{17 \cdot 10^3}{240} = 676 \text{ Н·м}$$

$$M_4 = 9,55 \frac{P_4}{n} = 9,55 \frac{20 \cdot 10^3}{240} = 796 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Проверка: $\sum M_z = M_1 - M_2 - M_3 - M_4 = 2069 - 597 - 676 - 796 = 0$

2. Разбиваем вал на 3 участка и применяя метод сечений находим крутящие моменты на участках:

$$M_{k1} = M_1 = 2069 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{k2} = M_1 - M_2 = 2069 - 597 = 1472 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{k3} = M_1 - M_2 - M_3 = 1472 - 676 = 796 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Строим эпюру « M_k ».

Определяем диаметр вала на каждом участке из условий прочности.

$$D = \sqrt[3]{\frac{|M_k|}{0,2[\tau_k]}}$$

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{2069 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 32}} = 68,6 \text{ мм, принимаем } D_1 = 71 \text{ мм}$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{1472 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 32}} = 61,3 \text{ мм, принимаем } D_2 = 63 \text{ мм}$$

$$D_3 = \sqrt[3]{\frac{796 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 32}} = 49,9 \text{ мм, принимаем } D_3 = 50 \text{ мм}$$

4. Определяем диаметр вала на каждом участке из условий жесткости

$$[\varphi_0] = 0,95 \cdot 10^{-2} \text{ рад/м} = 0,95 \cdot 10^{-5} \text{ рад/мм}$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{|M_k|}{0,1G[\varphi_0]}}$$

$$D_1 = \sqrt[4]{\frac{2069 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 10^{-5}}} = 72,2 \text{ мм, принимаем } D_1 = 75 \text{ мм}$$

$$D_2 = \sqrt[4]{\frac{1472 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 10^{-5}}} = 66,3 \text{ мм, принимаем } D_2 = 67 \text{ мм}$$

$$D_3 = \sqrt[4]{\frac{796 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 10^{-5}}} = 56,9 \text{ мм, принимаем } D_3 = 60 \text{ мм}$$

Окончательно принимаем диаметры вала из условий жесткости

Стандартный ряд номинальных размеров ($R_n 40$)

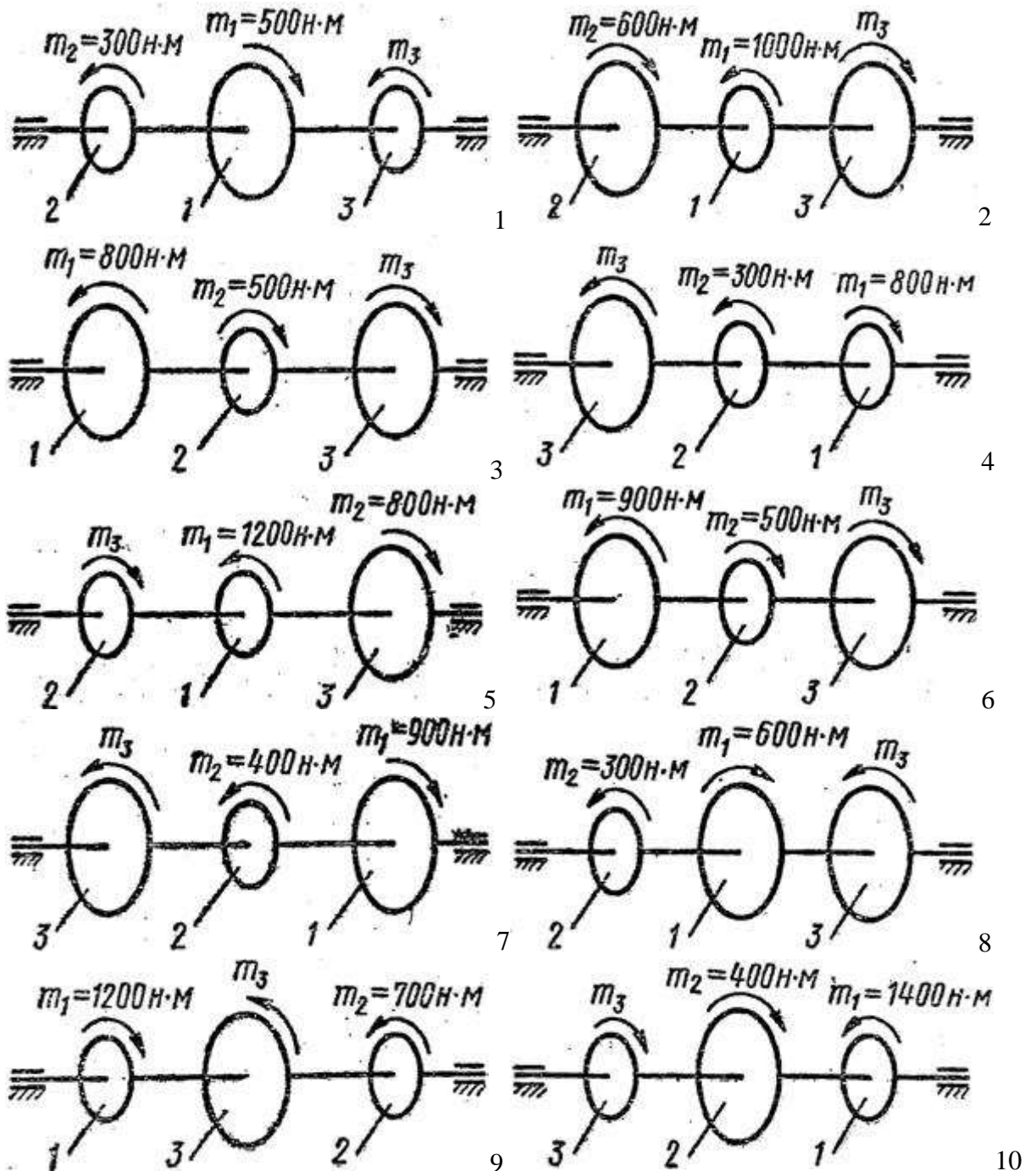
12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,24,25,26,28,30,32,34,36,38,40,42,45,48,50,53,56,60,63,67,71,75,80,85,90,95,100

Варианты заданий

Вариант	P кВт	ω рад/с	№ схемы
1, 11, 21.	30	20	1
2, 12, 22.	22	30	2
3, 13, 23.	15	10	3
4, 14, 24.	18	40	4

5, 15, 25.	10	30	5
6, 16, 26.	25	35	6
7, 17, 27.	35	40	7
8, 18, 28.	24	15	8
9, 19, 29.	50	100	9
10, 20, 30.11	24	24	10

Задания к практической работе



Практическое занятие №8

Расчет на прочность при изгибе

Цель: освоить способы построения эпюр поперечных сил и изгибающих моментов.

Порядок выполнения:

1. Составить уравнение равновесия;
2. Найти реакции опор;
3. Сделать проверку правильности определения реакций опор;
4. Построить эпюру – Q ;
5. Построить эпюру – M ;
6. Определить опасное сечение балки по эпюре изгибающих моментов – M ;
7. Проверить условие прочности балки;
8. Подобрать сечение балки стальной двутавровой в соответствии с ГОСТ.

Дано: Для двухопорной балки построить эпюры поперечных сил Q и изгибающих моментов M . Подобрать сечение стального двутавра, приняв $[\delta_i]=160$ МПа.

$F_1=24$ кН; $F_2=36$ кН; $m_1=18$ кНм; $m_2=24$ кНм; $L_1=2,0$ м; $L_2=3,0$ м; $L_3=3,0$ м.

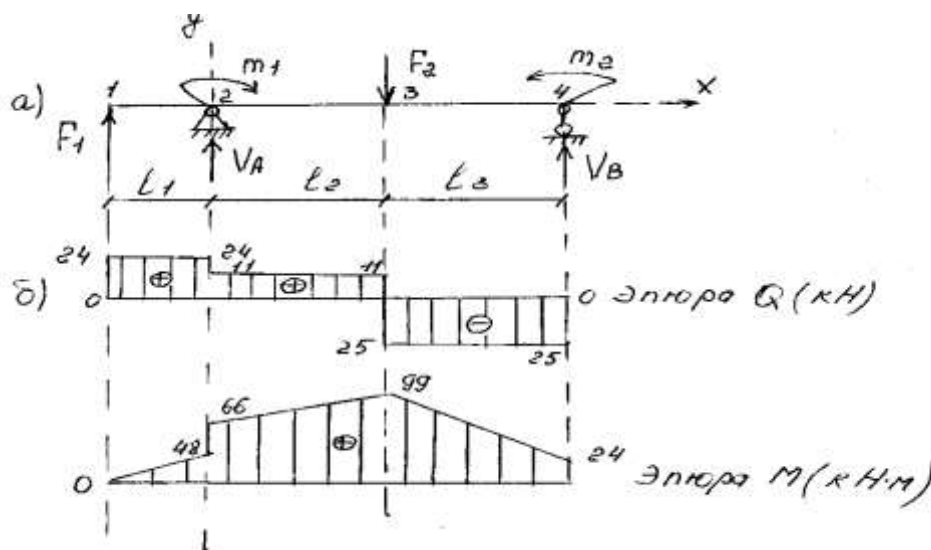


Рисунок 1- Построение эпюры Q и M .

Решение:

1. Составляем уравнения равновесия плоской системы произвольно расположенных сил, из которых определяем опорные реакции балки:

$$\sum M_A(F_R) = F_1 \cdot 2,0 + m_1 + F_2 \cdot 3,0 - m_2 - V_B \cdot 6,0 = 0, \quad (1)$$

$$\sum M_B(F_R) = F_1 \cdot 8,0 + m_1 + V_A \cdot 6,0 - F_2 \cdot 3,0 - m_2 = 0, \quad (2)$$

Из уравнения (2) находим V_A :

$$V_A = (-F_1 \cdot 8,0 - m_1 + F_2 \cdot 3,0 + m_2) / 6,0 = (-192 - 18 + 108 + 24) / 6,0 = -13 \text{ кН},$$

Из уравнения (1) находим V_B :

$$V_B = (F_1 \cdot 2,0 + m_1 + F_2 \cdot 3,0 - m_2) / 6,0 = (48 + 18 + 108 - 24) / 6,0 = 150 / 6 = 25 \text{ кН},$$

Проверяем правильность опорных реакций, составляя сумму проекций всех сил на ось Y :

$$\sum F_{RY} = F_1 + V_A - F_2 + V_B = 24 - 13 - 36 + 25 = 49 - 49 = 0,$$

т.е. реакции определены верно.

2. Определяем значение поперечной силы $-Q$ в характерных сечениях балки, которая обозначена цифрами 1,2,3,4 (рисунок-2а).

$$Q_1 = Q_2^{\text{лев}} = F_1 = 24 \text{ кН},$$

$$Q_2^{\text{прав}} = Q_3^{\text{лев}} = F_1 + V_A = 24 - 13 = 11 \text{ кН},$$

$$Q_3^{\text{прав}} = Q_4 = F_1 + V_A - F_2 = -V_B = -25 \text{ кН}.$$

По найденным значениям строим эпюру поперечных сил $-Q$ (рисунок-1б).

2. Аналогично определяем значения изгибающего момента $-M$ в характерных сечениях балки:

$$M_1 = 0;$$

$$M_2^{\text{лев}} = F_1 \cdot 2,0 = 48 \text{ кНм},$$

$$M_2^{\text{прав}} = M_2^{\text{лев}} + m_1 = 48 + 18 = 66 \text{ кНм},$$

$$M_3 = F_1 \cdot 5,0 + m_1 + V_A \cdot 3,0 = 120 + 18 - 39 = 99 \text{ кНм},$$

$$M_4 = m_2 = 24 \text{ кНм}.$$

По найденным значениям строим эпюру изгибающих моментов $-M$ (рисунок-. 1в).

2. По эпюре изгибающих моментов определяем положение опасного сечения балки (сечение, в котором изгибающий момент имеет наибольшее по абсолютной величине значение). В нашем случае - это сечение **3**, где

$$M_3 = M_{\text{max}} = 99 \text{ кНм}.$$

Из условия прочности балки на изгиб:

$$\delta = \frac{M_{\text{max}}}{W_x} < [\delta],$$

$$W_x$$

$$W_x = \frac{M_{\max}}{\sigma} = \frac{99 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{160 \text{ Н/мм}^2} = 0,619 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 = 619 \text{ см}^3, [\delta_{\text{и}}] 160 \text{ Н/мм}^2$$

В соответствии с **ГОСТ 8239-89**,

(приложение №1, принимаем сечение балки стальной двутавровой № **33**

$$W_x = 597 \text{ см}^3).$$

$$\delta = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{99 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{597 \cdot 10^3 \text{ мм}^3} = 165,8 \text{ МПа},$$

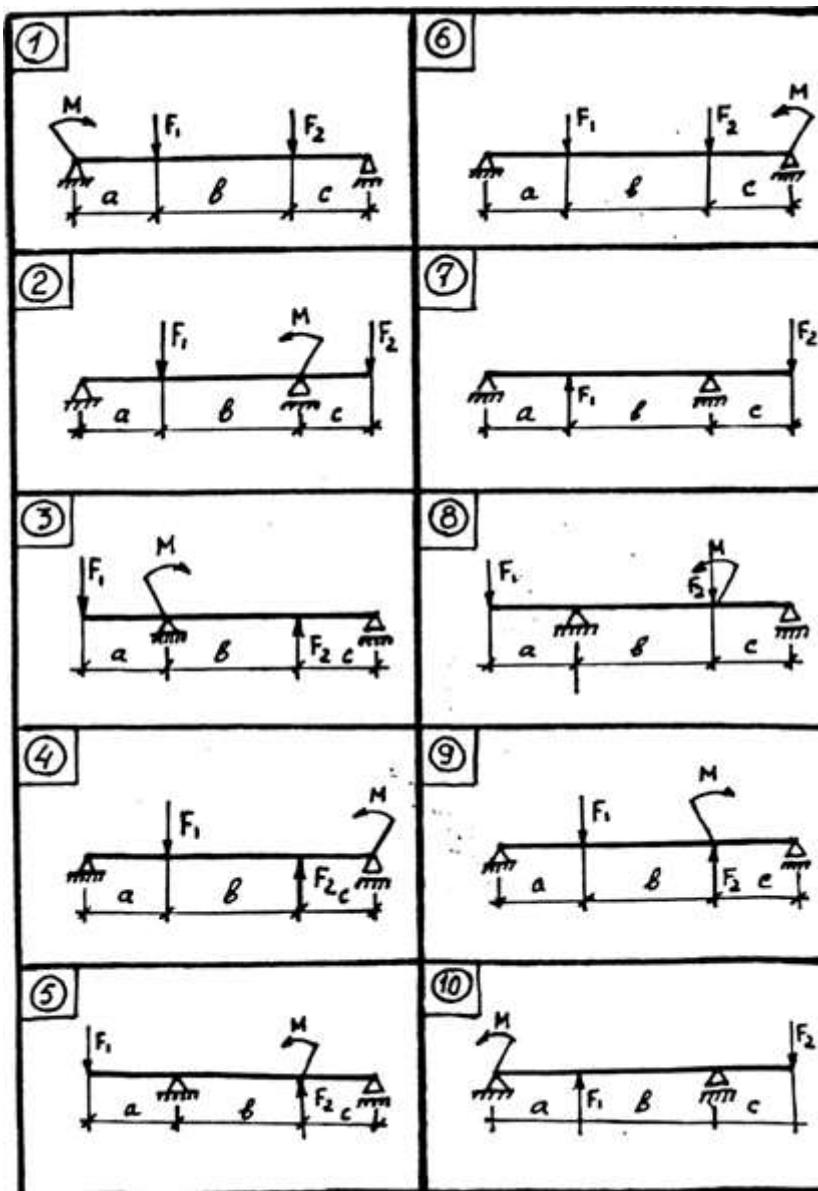
$$W_x = 597 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$$

$$\delta = \frac{\delta_{\max} - [\delta_{\text{и}}]}{[\delta_{\text{и}}]} = \frac{165,8 - 160}{160} \cdot 100 = 3,6\% < 5\%,$$

$$[\delta_{\text{и}}] 160$$

что находится в разрешенных пределах (менее 5%).

Варианты задания



Практическое занятие №9

Расчет разъемных и не разъемных соединений на срез и смятие.

Цель: освоить порядок расчета разъемных и не разъемных соединений на срез и смятие.

Пример. Рассчитать заклепочное соединение двух листов одинакового сечения толщиной $t=16$ мм, перекрытых двумя накладками, если $F=0,5$ МН. Допускаемое напряжение $[\sigma]=160$ МПа, $[\tau]=90$ МПа, $[\sigma]_{см}=320$ МПа.

□

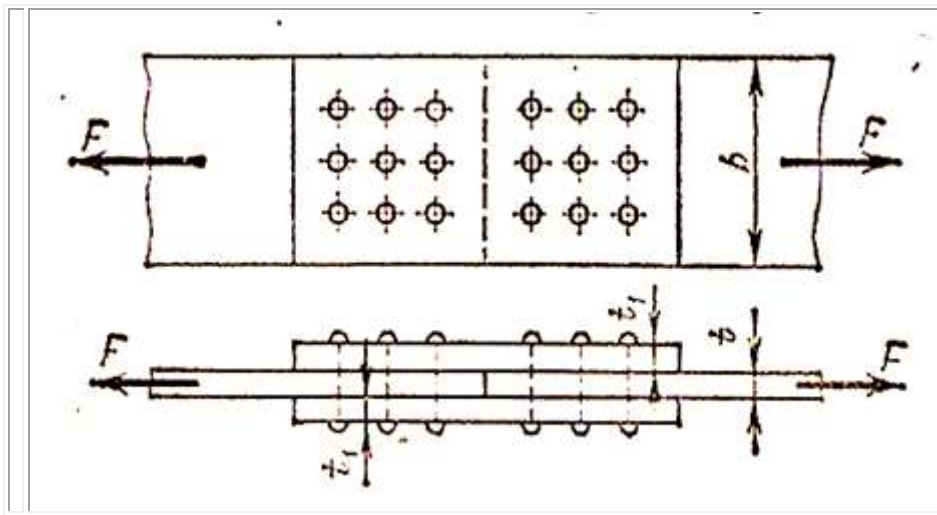


Рисунок 13 Заклёпочное соединение к решению задачи

В данном случае заклёпки двухсрезные, так как для разрушения соединения необходимо, чтобы каждая заклёпка срезалась по двум плоскостям, причём диаметр заклёпки $d=20$ мм= $2 \cdot 10^{-2}$ м. Определяем необходимое число срезов по формуле:

$$n = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} [\tau]} = \frac{0.5 \cdot 4}{3.14 \cdot 2^2 \cdot 10^{-4} \cdot 90} = 17.6 \quad \text{среза} \quad (11)$$

Следовательно, необходимо принять 9 заклёпок. Необходимое число заклёпок по смятию определяем по формуле:

$$n' = \frac{F}{t \cdot d \cdot [\sigma]_{\text{см}}} = \frac{0.5}{0.016 \cdot 0.02 \cdot 320} = 5.85 \approx 6 \quad \text{заклёпок} \quad (12)$$

Решающим явился расчёт на срез. Принимаем 9 заклёпок – с каждой стороны стыка в три ряда по три заклёпки в ряд.

Подберём сечение листа из расчёта на растяжение:

$$A = \frac{F}{[\sigma]} = \frac{0.5}{160} = 31.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 31.3 \text{ см}^2 \quad (13)$$

Отсюда при толщине $t=1,6$ см, найдём ширину листа:

$$b_1 = \frac{A}{t} = \frac{31.3}{1.6} = 19.5 \text{ см} \quad (14)$$

К этой рабочей ширине надо добавить ширину отверстий $3d=6$ см, тогда получим полную ширину листа:

$$b = 19.5 + 6 = 25.5 \text{ см} \quad (15)$$

Этой ширины вполне достаточно для размещения трёх заклёпок. Расстояние между центрами заклёпок принимаем равным $3d$. Толщина t_1 каждой накладки должна быть не менее половины толщины листа; принимаем $t_1=0.8$ см.

Данные для решения задачи по вариантам принимать по таблице 11. Допускаемое напряжение $[\sigma]=160$ МПа, $[\tau]=90$ МПа, $[\sigma]_{\text{см}}=320$ МПа. Диаметр заклёпки $d=20$ мм= $2 \cdot 10^{-2}$ м. Рисунок 13 принимать к решению задачи для всех вариантов.

Пример. Определить, исходя из условий прочности на срез и смятие, необходимый диаметр болта в соединении, показанном на рисунке 2. К листам приложена растягивающая сила $F = 40$ кН. Толщина одного листа 8 мм, второго листа - 10

мм. Материал болта - Ст3. Допускаемое напряжение на срез $[\tau]_{cp} = 80 \text{ МПа}$. Допускаемое напряжение на смятие $[\sigma]_{cm} = 160 \text{ МПа}$. Болт без зазора входит в отверстие.

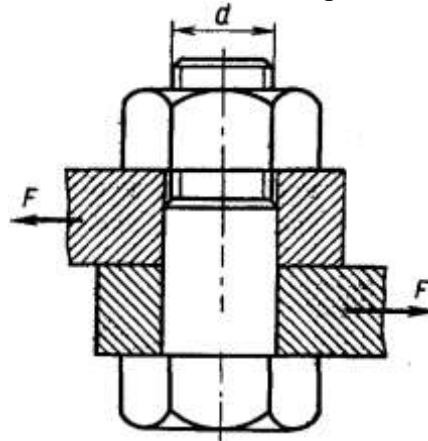


Рис. 2 - Схема задачи

Решение:

1. Определяем диаметр болта используя условие прочности на срез:

$$A_{cp} = Q / [\tau]_{cp}$$

т.к. $k = 1$ и $z = 1$

$$A_{cp} = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot [\tau]_{cp}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 40 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 80 \cdot 10^6}} = 0,0252 \text{ м} = 25,2 \text{ мм}$$

2. Определяем диаметр болта используя условие прочности на смятие:

$$A_{cm} = Q / [\sigma]_{cm}$$

т.к. $z = 1$

$$A_{cm} = d \cdot s_{min}$$

$$d = \frac{F}{s_{min} \cdot [\sigma]_{cm}} = \frac{40 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^6} = 0,03125 \text{ м} = 31,25 \text{ мм}$$

Из двух значений диаметра, найденных по условиям прочности на срез и смятие, следует принять большее, т.е. $d \geq 31,25 \text{ мм}$.

Согласно ГОСТ 24705-2004 Резьба метрическая надо взять болт с номинальным диаметром 32 мм.

Варианты заданий (неразъемные соединения)

№ варианта	Схема	F , кН	D , мм	δ_1 , мм	δ_2 , мм	B , мм
1	2	3	4	5	6	7
1		120	10	6	6	200
2		140	12	6	8	180
3		160	14	8	8	220
4		180	16	8	10	240
5		200	18	6	6	250
6		120	8	6	8	260
7		140	10	8	8	280
8		160	12	8	10	300
9		180	14	6	8	160
10		200	16	6	10	170
11		40	14	8	10	210
12		60	16	6	12	230
13		80	18	8	8	200
14		100	20	10	10	180
15		180	22	8	10	220
16		100	16	8	6	240
17		120	18	10	8	250
18		140	20	12	10	260
19		160	22	10	8	280
20		180	24	12	12	220

1	2	3	4	5	6	7
21		60	10	5	5	180
22		80	12	5	6	200
23		90	14	7	8	220
24		70	16	8	8	230
25		120	18	8	10	210

Приложение 8

Варианты заданий (разъемные соединения)

Исходные данные для выполнения практического занятия обучающийся должен принять в соответствии со своим порядковым номером в журнале (№ варианта).

Задания по вариантам № 1–8

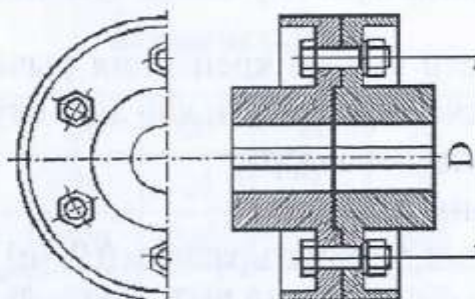


Рис. 52. Схема к расчету болтов фланцевой муфты

Рассчитать болты фланцевой муфты (рис. 52). Передаваемая муфтой мощность — P , частота вращения — n , диаметр окружности центров болтов — d , число болтов — z . Материал муфты — чугун, допускаемое напряжение на срез $[\tau_{ср}] = 50$ МПа. Числовые значения приведены в таблице 10.

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
d , мм	80	85	90	95	100	105	110	115
z , шт.	3	3	3	4	4	4	5	5
P , кВт	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
n , об/мин	705	710	720	730	910	925	930	715

Задания по вариантам № 9–17

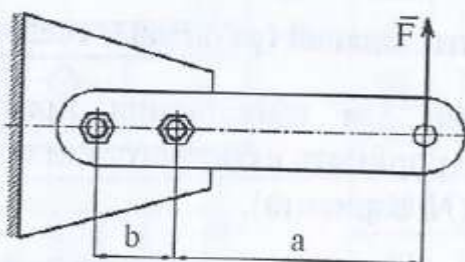


Рис. 53. Схема к расчету болтов крепления рычага

Определить диаметр болтов крепления рычага (рис. 53), нагруженного силой F . Расчет произвести для двух случаев:

- болты поставлены без зазора;
- болты поставлены с зазором.

Коэффициент трения f принять равным 0,2, $[\sigma]_{\text{см}} = 280$ МПа (Н/мм²), $[\tau]_{\text{сп}} = 100$ МПа (Н/мм²), $[\sigma]_{\text{р}} = 140$ МПа (Н/мм²). Числовые значения приведены в таблице 11.

Таблица 11

Варианты заданий

№ варианта	9	10	11	12	13	14	15	16	17
F , кН	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
a , мм	500	510	520	530	540	550	505	515	525
b , мм	80	90	105	110	115	120	125	130	135

Задания по вариантам № 18–25

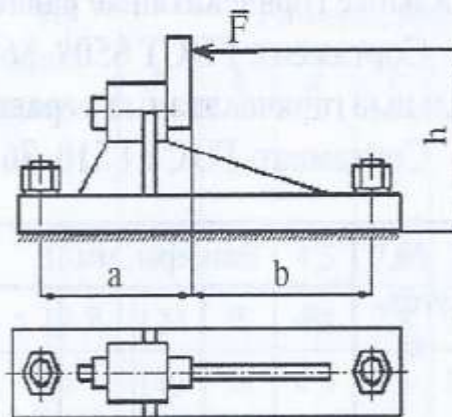


Рис. 54. Схема к расчету болтов, крепящих стойку к бетонному основанию

Определить диаметр фундаментных болтов (рис. 54), крепящих стойку к бетонному основанию. Коэффициент трения основания стойки о бетон f равен 0,4. Болты принять с метрической резьбой, $[\sigma]_{см} = 260$ МПа (Н/мм²), $[\tau]_{ср} = 50$ МПа (Н/мм²), $[\sigma]_p = 120$ МПа (Н/мм²). Числовые значения для расчета приведены в таблице 12.

Таблица 12

Варианты заданий

Вариант	18	19	20	21	22	23	24	25
F , кН	20	22	24	26	28	30	32	34
h , мм	500	520	540	560	580	600	620	640
a , мм	220	230	240	250	260	270	280	290
b , мм	280	300	320	340	360	380	400	420

Практическое занятие №10

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности

Цель: научиться подбирать подшипники качения по динамической грузоподъемности.

Пример: Подобрать подшипник качения для вала редуктора с цапфой $d = 40$ мм. Проверить долговечность при частоте вращения $n = 1000$ об/мин; радиальная нагрузка $F_r = 2500$ Н, осевая нагрузка $F_a = 0$.

Решение: в данных условиях подходит подшипник радиальный однорядный шариковый (см. таблицу 5). Проверим подшипник для посадочного диаметра $d = 40$ мм., начиная с легкой серии - № 208, у которого статическая грузоподъемность (см. каталог):

$$C_0 = 18100 \text{ Н};$$

динамическая грузоподъемность

$$C = 25600 \text{ Н}.$$

Примем по таблицам 9 и 10 – $k_s = 1,4$; $k_T = 1,0$.

Так как $F_a = 0$ и $\frac{F_a}{C_0} = 0$, то из таблицы 11, примечание 1) следует:

$$X=1, Y=0.$$

Эквивалентная динамическая нагрузка:

$$P = (XV F_r + Y F_a) k_s k_T = X V F_r k_s k_T = 1 \cdot 1 \cdot 2500 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,0 = 3500 \text{ (Н)}.$$

Расчетный ресурс в миллионах оборотов:

$$L = (C/P)^3 = (25600/3500)^3 = 390 \text{ (млн. об.)}$$

Расчетная долговечность в часах:

$$L_h = (L \cdot 10^6 / 60 \cdot n) = (390 \cdot 10^6 / 60 \cdot 1000) = 6500 \text{ (час.)}$$

Так как долговечность оказалась меньше минимальной нормы (10000 час.), то проверим подшипник средней серии № 308, у которого

$$C_0 = 22700 \text{ Н}; C = 31900 \text{ Н}.$$

$$L = (C/P)^3 = (31900/3500)^3 = 760 \text{ (млн. об.)}$$

$$L_h = (L \cdot 10^6 / 60 \cdot n) = (760 \cdot 10^6 / 60 \cdot 1000) = 12700 \text{ (час.)}$$

что допустимо.

Задание: Подобрать подшипник качения для опор выходного вала цилиндрического зубчатого редуктора общего назначения.

Исходные данные:

- частота вращения (об./мин.)- n ;
- требуемая долговечность подшипника- L ;
- диаметр посадочной поверхности вала- d ;
- максимальные длительные действующие силы- F_a, F_r .

Исходные данные:

Bap.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
L	10·103	—	—	—	—	—	—	15·103	—	—
d	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
F	682	1181	2800	5754	9968	2178	7000	13020	19040	21000
F_r^a	2000	3300	8400	17000	30000	60000	21000	40000	60000	60000
Bap.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n	1120	1130	2400	1500	1000	900	800	700	600	800
L	—	—	—	—	—	20·103	—	—	—	—
d	70	75	80	85	90	95	95	100	10	12
F	17200	12600	9000	6215	5200	3890	2070	1100	37	87
F_r^a	50000	36000	27000	20000	15000	12000	6000	3000	200	300
Bap.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
n	1000	900	800	1500	3000	3000	800	700	600	800
L	25·103	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d	15	17	10	30	40	45	50	55	60	65
F	213	378	37	2000	6000	37	207	110	370	870
F_r^a	600	1200	150	8000	20000	150	650	550	2000	3000