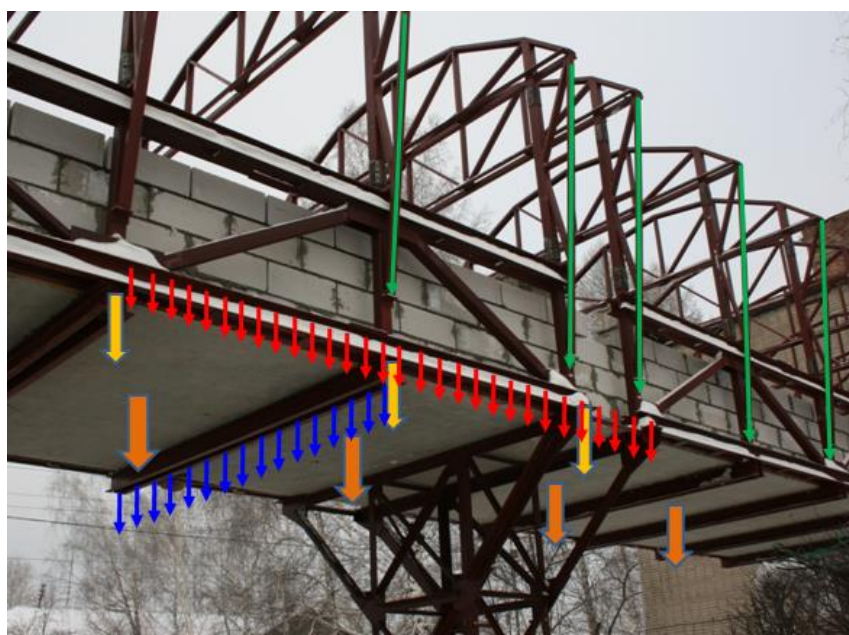




ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
Инженерный институт

МЕХАНИКА

Задания и методические указания для практических занятий



Новосибирск 2024

Кафедра теоретической и прикладной механики

Механика: задания и метод. указания для практических занятий. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т.; сост. Е.А. Пшенов, И.В. Тихонкин, С.А. Булгаков. – Новосибирск, 2024. – 48 с. изд. перераб. и доп.

Методическая разработка содержит задания для практических занятий со студентами по разделам Статика, Кинематика, Динамика, Сопротивление материалов дисциплин Механика и Прикладная механика, выполняемых индивидуально каждым студентом в аудитории под руководством преподавателя.

Содержание заданий формируется в соответствии с изучаемыми темами согласно рабочим программам дисциплины.

Предназначена для студентов очной формы обучения всех направлений подготовки при изучении и закреплении соответствующих разделов и тем дисциплин Механика и Прикладная механика, согласно утвержденным учебным планам и рабочим программам дисциплин.

Утверждена и рекомендована к изданию учебно-методическим советом Инженерного института (протокол от 30 января 2024 г. № 6)

© ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
Инженерный институт, 2024

ВВЕДЕНИЕ

При освоении учебного материала, особенно в самостоятельной работе студентов по дисциплинам Механика и Прикладная механика, в соответствии с учебным планом и рабочей программой целесообразно придерживаться следующей последовательности изучения:

- ознакомиться с содержанием программы и подобрать рекомендованную учебную литературу и информационные ресурсы;
- внимательно и вдумчиво прочитать материал всей темы (не производя выводов и доказательств),
- разобраться в основных понятиях, определениях, законах правилах, следствиях и в их логической взаимосвязи;
- тщательно и подробно изучить материал, конспектируя основные положения, определения, доказательства и правила;
- проанализировать исходные данные, схемы приложения сил и решить типовые задачи в аудитории под руководством преподавателя;
- закрепить усвоение материала путем разбора решенных задач, приведенных в учебной литературе, а также самостоятельным решением возможно большего числа задач;
- выполнить, оформить контрольную или расчетно-графическую работу и защитить ход решения;
- подготовиться к сдаче экзамена;
- уметь применять полученные навыки расчетов при выполнении курсовых работ и проектов по общепрофессиональным и специальным дисциплинам, а также конструкторской части выпускных квалификационных работ

Приступая к решению задач, следует предварительно повторить и вопросы ранее изученных тем, касающиеся содержания данной задачи.

Изучение учебного материала предусматривает закрепление умений решения ряда задач по темам раздела «Статика», «Кинематика», «Динамика»:

- Задание 1. Равновесие плоской системы сходящихся сил
- Задание 2. Равновесие произвольной плоской системы сил
- Задание 3. Определение центра тяжести плоской фигуры
- Задание 4. Преобразование простейших движений тел
- Задание 5. Динамика механической системы.

1. Общие указания к оформлению решений заданий

Каждая задача должна содержать расчётную схему, исходные данные и решение. Исходные данные и номер расчётной схемы выбираются в зависимости от шифра студента из соответствующих таблиц.

Решение каждой задачи следует начинать на новой странице. Необходимо указать номер задачи, привести исходные данные и указать величины, подлежащие определению. Затем выполняется расчётная схема и приводится решение. Чертёж должен быть аккуратным, достаточной крупным, все точки, углы, тела и их расположение на схеме должны соответствовать условиям решаемого варианта задачи. Направления векторов скоростей, ускорений, угловых скоростей и угловых ускорений должны быть показаны ясно. Решения задач необходимо сопровождать краткими пояснениями. В конце каждого решения необходимо привести ответ в численной форме с указанием размерности.

2. Общие методические указания

Для освоения учебной дисциплины «Механика», «Прикладная механика» следует иметь соответствующую математическую подготовку. Нужно уметь вычислять проекции векторов на координатные оси, находить геометрически и аналитически сумму векторов, вычислять векторное произведение двух векторов, дифференцировать и интегрировать функции одного переменного, быть знакомым с понятиями о радиусе кривизны линии.

К решению задачи № 1 следует приступать после изучения темы «Плоская система сходящихся сил». Задача решается составлением и последующим решением уравнений равновесия системы сходящихся сил.

Задача № 2 является задачей на исследование равновесия тела под действием произвольной плоской системы сил. При решении этой задачи необходимо также составить уравнения равновесия тела под действием сил.

Задача № 3 посвящена определению положения центра тяжести составной плоской фигуры по формулам и требует знаний положения центров тяжести прямоугольника, треугольника и полукруга.

К решению задачи № 4 следует приступать после изучения раздела «Кинематика». Эта задача посвящена определению кинематических характеристик вращательного движения твёрдых тел, скоростей и ускорений их точек.

Задача № 5 является задачей на исследование динамики механической системы, для решения которой рекомендуется составить общее уравнение динамики. При этом студент должен применить последовательно принципы Даламбера (кинетостатики) и возможных перемещений.

3. Методические указания к решению задачи 1

Систему сил называют сходящейся, если линии их действия пересекаются в одной точке. Система сходящихся сил $\{\overline{F_1}, \overline{F_2}, \dots, \overline{F_n}\}$ эквива-

лентна одной силе \overline{R} , называемой равнодействующей, которая равна геометрической сумме всех сил системы и проходит через точку пересечения линий их действия

$$\overline{R} = \sum_{k=1}^n \overline{F}_k.$$

Величину и направление равнодействующей удобно определять аналитически. Так, если за систему отсчета принять прямолинейные ортогональные оси координат $Oxyz$, то, задачу о сложении сил можно решить с помощью следующих соотношений:

$$R_x = \sum X_k; \quad R_y = \sum Y_k; \quad R_z = \sum Z_k;$$

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

где X_k, Y_k, Z_k - проекции \overline{F}_k соответственно на оси x, y, z ;

Существуют геометрическая и аналитическая формы условий равновесия системы сходящихся сил:

- для равновесия системы сходящихся сил необходимо и достаточно, чтобы ее силовой многоугольник был замкнут;

- для равновесия системы сходящихся сил необходимо и достаточно равенства нулю сумм проекций всех сил системы на оси координат

$$\sum X_k = 0, \quad \sum Y_k = 0, \quad \sum Z_k = 0.$$

Задание 1. Определить усилия в стержнях конструкции. Номер схемы на рисунке 1 соответствует последней цифре шифра. Исходные данные для расчёта выбрать из строки таблицы 1, соответствующей предпоследней цифре шифра.

Последовательность решения задачи:

1. Изобразить на схеме реакции стержней;
2. Составить два уравнения равновесия для точки В;
3. Из уравнений равновесия найти реакции стержней;

Таблица 1. Исходные данные к задаче 1 самостоятельной работы

Предпоследняя цифра шифра	F_1 , кН	F_2 , кН
0	10	20
1	15	5
2	20	10

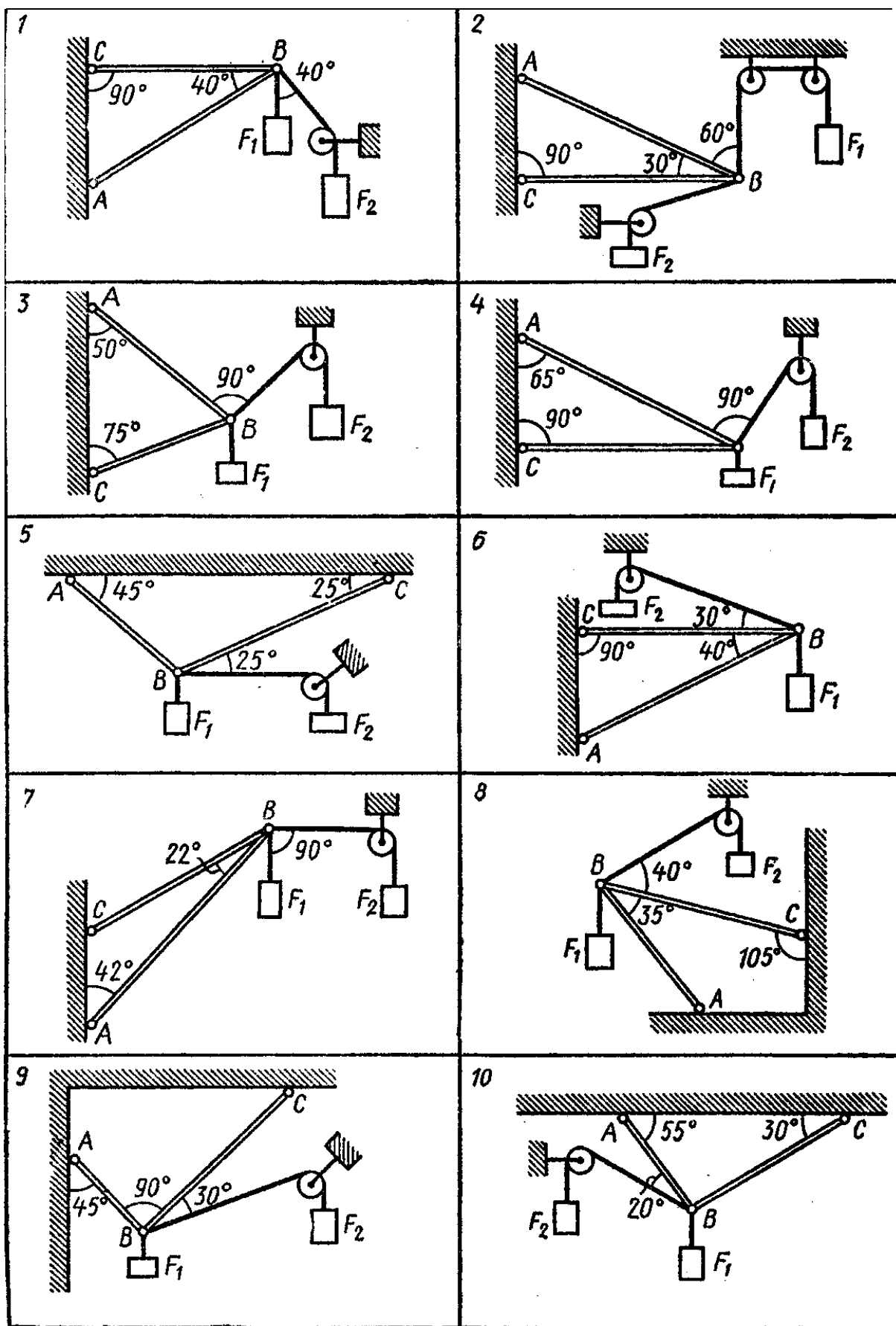


Рисунок 1. Схемы к заданию 1

Пример решения задания 1.

Определить усилия в стержнях АВ и ВС конструкции (Рис. 2), находящейся под действием силы $F=1$ кН.

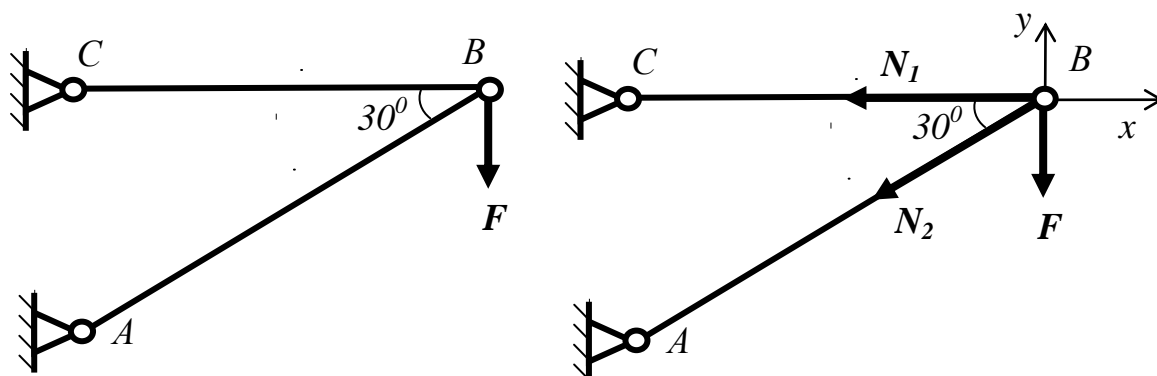


Рисунок 2 к примеру решения задания 1

Реакции стержней N_1 и N_2 направим вдоль стержней из точки В, считая стержни растянутыми. Так как силы F , N_1 и N_2 образуют плоскую систему сходящихся сил, составим условие их равновесия в аналитической форме, указав направление координатных осей x и y :

$$\sum F_{kx} = 0 : -N_1 - N_2 \cdot \cos 30^\circ = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_{ky} = 0 : -F - N_2 \cdot \sin 30^\circ = 0 \quad (2)$$

Из уравнения (2) определим величину реакции N_2 стержня АВ:

$$N_2 = \frac{-F}{\sin 30^\circ} = \frac{-1}{0,5} = -2 \text{ кН}.$$

Знак $(-)$ показывает, что стержень АВ не растянут, как предполагалось изначально, а сжат, т.е. направление реакции N_2 противоположно указанному на схеме.

Величину реакции N_1 стержня ВС находим из уравнения (1):

$$N_1 = -N_2 \cdot \cos 30^\circ = -(-2) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \approx 1,73 \text{ кН}.$$

Ответ: $N_1=1,73$ кН; $N_2=-2$ кН.

4. Методические указания к решению задачи 2

Моментом силы \vec{F} относительно центра О называют векторное произведение радиус-вектора точки приложения силы на вектор силы:

$$\vec{M}_O(\vec{F}) = \vec{r} \times \vec{F},$$

где \vec{r} - радиус-вектор точки А приложения силы \vec{F} .

Модуль (величина) вектора \vec{M}_O определяется выражением

$$M_O(\vec{F}) = rF \sin \alpha = F \cdot h.$$

Здесь h - плечо силы, равное кратчайшему расстоянию от точки O до линии действия силы \vec{F} .

α - угол между векторами \vec{r} и \vec{F} .

Для плоской системы сил удобно пользоваться алгебраическим значением момента. Алгебраическая величина момента равна произведению модуля силы на плечо, взятому со знаком плюс или минус. При этом момент считается положительным, если сила стремится повернуть свое плечо против хода часовой стрелки, и отрицательным в противном случае.

$$M = \pm Fh$$

Сумму векторов моментов всех сил системы относительно произвольного центра O называют главным моментом системы относительно этого центра

$$\vec{M}_0 = \sum_{k=1}^n \vec{M}_0(\vec{F}_k).$$

Согласно теореме Пуансо система сил, действующая на твердое тело, эквивалентна главному вектору системы, приложенному к произвольному центру (точке тела), и ее главному моменту относительно этого центра.

Для равновесия тела, находящегося под действием произвольной системы сил, необходимо и достаточно, чтобы одновременно выполнялись условия равенства нулю главного вектора и главного момента этой системы:

$$\vec{R}_0 = 0, \quad \vec{M}_0 = 0.$$

Необходимые и достаточные условия равновесия плоской системы сил могут быть представлены в трех формах:

$$\begin{aligned} \sum X &= 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M_0 = 0, \\ \sum M_A &= 0, \quad \sum M_B = 0, \quad \sum M_C = 0, \\ \sum M_A &= 0, \quad \sum M_B = 0, \quad \sum X_k = 0. \end{aligned}$$

Задание 2. Определить реакции опор двухопорной балки. Номер схемы на рисунке 5 соответствует последней цифре шифра. Данные для расчёта выбрать из строки таблицы 2, соответствующей предпоследней цифре шифра.

Последовательность решения задачи:

1. Изобразить на схеме реакции опор;
2. Составить три уравнения равновесия для балки;
3. Из уравнений равновесия найти реакции опор;
4. Выполнить проверку расчётов, составив четвёртое уравнение равновесия. Погрешность вычислений допускается не более 3%.

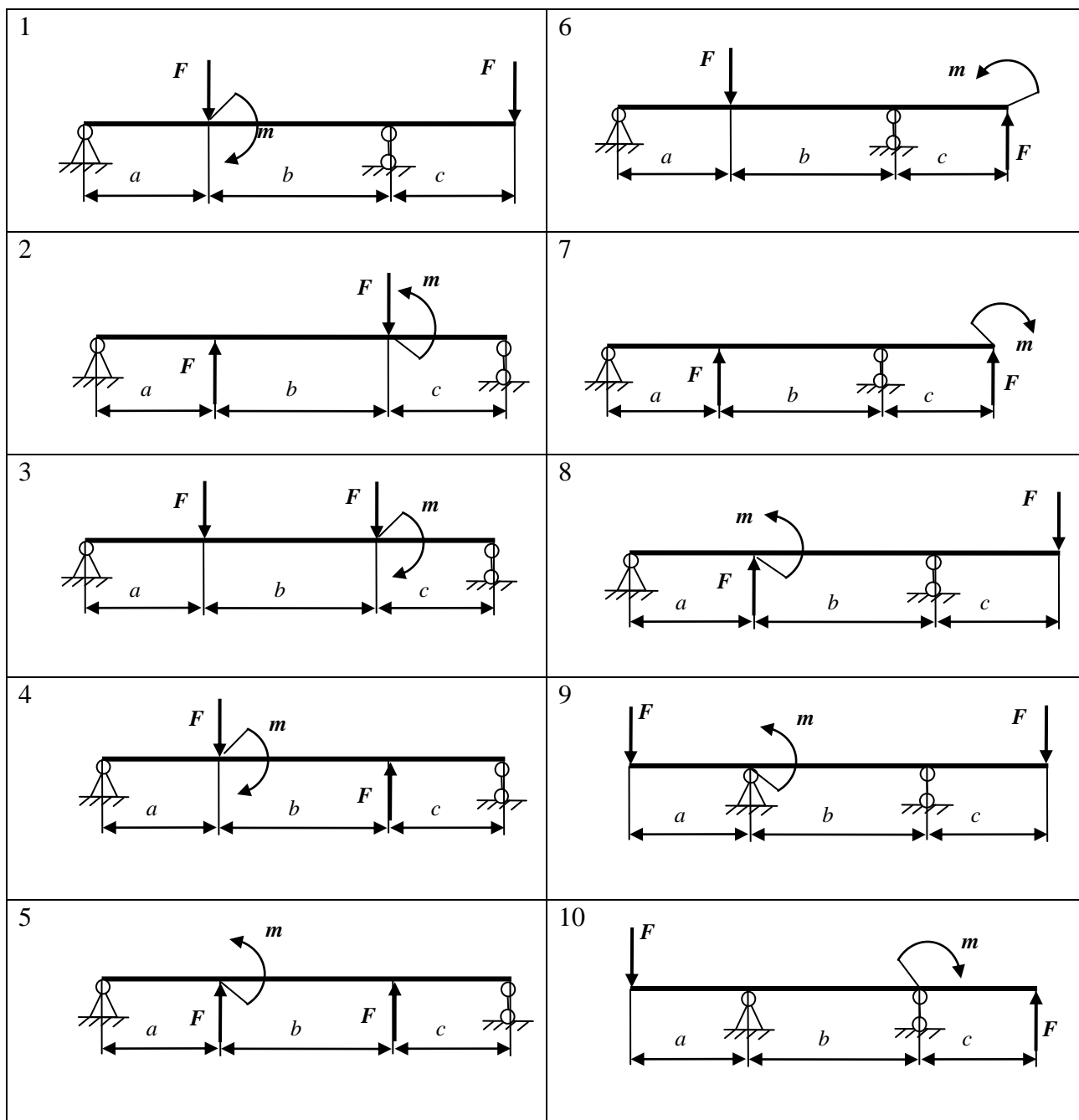


Рисунок 3. Схемы к заданию 2

Таблица 2 - Исходные данные к заданию 2

№ строки	$a, м$	$b, м$	$c, м$	$F, кН$	$m, кНм$
0	2	4	3	10	5
1	4	3	2	8	10
2	3	2	4	12	3
3	5	3	2	5	8

Пример выполнения задания 2.

Для балки, изображенной на рисунке 4, определить реакции связей, удерживающих ее в равновесии.

Исходные данные: $\alpha=30^\circ$, $q=26$ кН/м, $F=12$ кН, $M=8$ кНм, $a=0,8$ м, $b=1,2$ м, $c=0,6$ м.

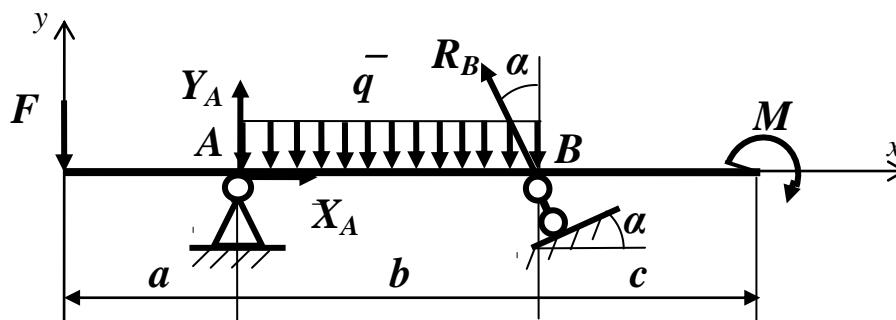


Рисунок 4 к примеру решения задачи 2

Заменив опоры их реакциями X_A , Y_A и R_B , составим уравнения равновесия балки:

$$\sum X = 0: X_A - R_B \sin \alpha = 0 ;$$

$$\sum M_B = 0: F \cdot (a + b) + q \cdot b \cdot \frac{b}{2} - M - Y_A \cdot b = 0 ;$$

$$\sum M_A = 0: F \cdot a - q \cdot b \cdot \frac{b}{2} - M + R_B \cos \alpha \cdot b = 0 .$$

Решая уравнения равновесия, определим реакции опор:

$$R_B = \frac{-F \cdot a + q \cdot b \cdot \frac{b}{2} + M}{b \cdot \cos \alpha} = \frac{-12 \cdot 0,8 + 26 \cdot 1,2 \cdot 0,6 + 8}{1,2 \cdot 0,866} = 16,47 \text{ кН}$$

$$X_A = R_B \sin \alpha = 16,474 \cdot 0,5 = 8,23 \text{ кН}$$

$$Y_A = \frac{F \cdot (a + b) + q \cdot b \cdot \frac{b}{2} - M}{b} = \frac{12 \cdot 2 + 26 \cdot 1,2 \cdot 0,6 - 8}{1,2} = 28,93 \text{ кН}$$

Для проверки правильности решения составим еще одно уравнение равновесия:

$$\begin{aligned} \sum Y = 0: Y_A + R_B \cos \alpha - q \cdot b - F &= 28,93 + 16,47 \cdot 0,866 - 26 \cdot 1,2 - 12 = \\ &= 43,19 - 43,2 = 0,01.. \end{aligned}$$

Погрешность вычислений составляет $\frac{0,01}{43,2} \cdot 100\% \triangleleft 1\%$,

что допускается.

Ответ: $X_A=8,237$ кН; $Y_A=28,934$ кН; $R_B=16,474$ кН.

5. Методические указания к решению задачи 3

Центром тяжести твердого тела называют неизменно связанную с этим телом точку C , через которую проходит линия действия равнодействующей сил тяжести частиц данного тела при любых его положениях в пространстве.

Ограничимся рассмотрением метода определения центра тяжести плоской фигуры. Для однородного тела, имеющего форму тонкой пластины постоянной толщины, существуют следующие формулы для определения координат ее центра тяжести

$$x_c = S_y / A, \quad y_c = S_x / A,$$

где S_x , S_y – осевые статические моменты плоской фигуры относительно осей x и y , лежащих в ее плоскости;

$$S_x = \sum_{k=1}^n y_k A_k, \quad S_y = \sum_{k=1}^n x_k A_k$$

где $A = \sum A_k$ – площадь фигуры;

A_k , x_k , y_k – площади и координаты центров тяжести частей, составляющих фигуру.

Задание 3. Для однородной пластины сложной формы, изображенной на схеме (рис. 5), найти и указать положение центра тяжести. Данные выбрать из столбца табл. 3 в соответствии с предпоследней цифрой шифра.

Последовательность решения задачи:

1. Изобразить плоскую фигуру в масштабе;
2. Разделить плоскую фигуру на простейшие;
3. Определить для каждой простейшей фигуры площадь и координаты центра тяжести в принятой системе координат;
4. Вычислить статические моменты инерции простейших фигур относительно координатных осей
5. Определить координаты центра тяжести составной фигуры по формулам: $x_c = S_y / A$, $y_c = S_x / A$

Таблица 3 - Исходные данные для задания 3

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3
a (дм)	12	6	8	9
b (дм)	4	12	9	6
c (дм)	6	9	6	12

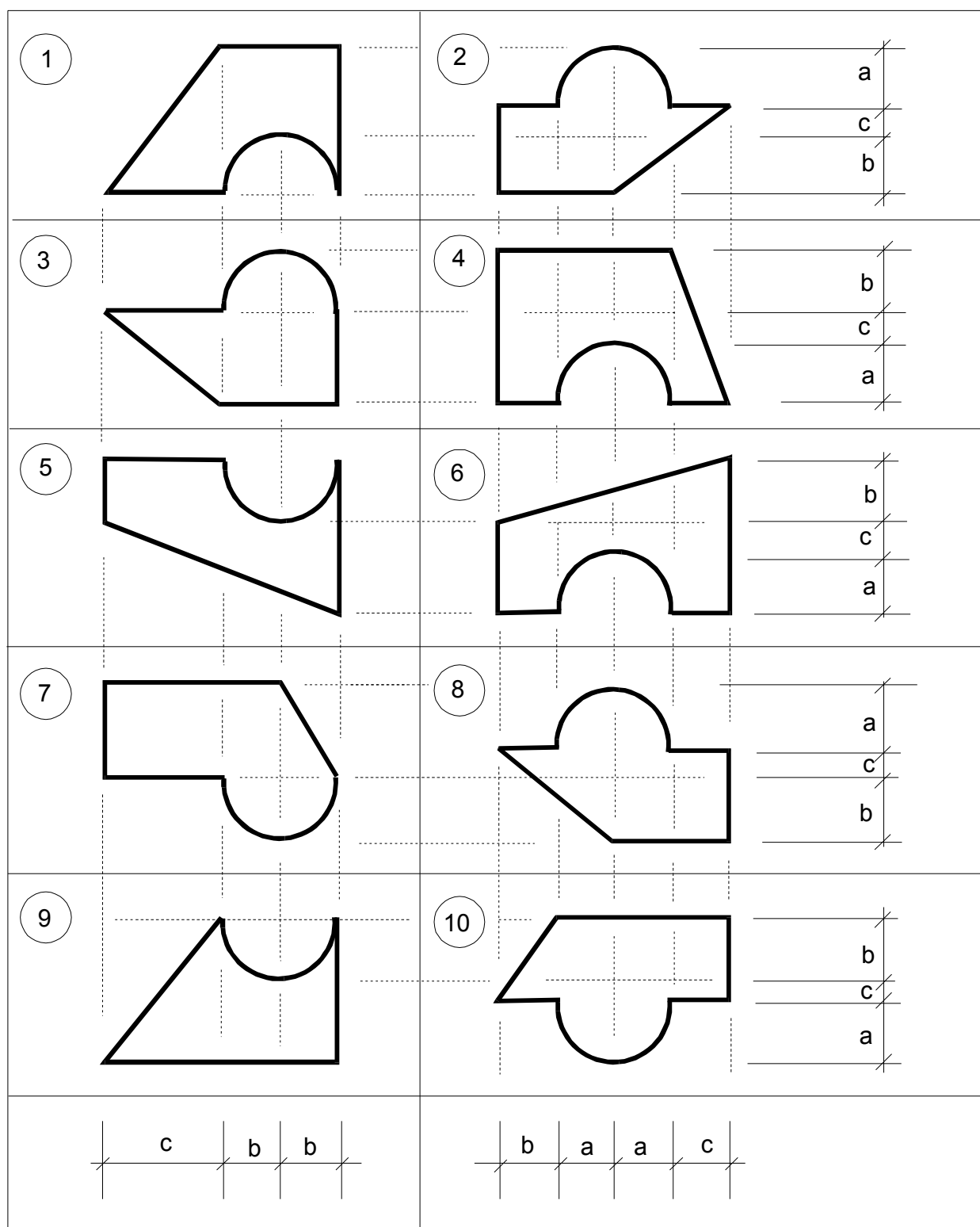


Рисунок 5. Схемы к заданию 3

Пример выполнения задания 3. Определить положение центра тяжести плоской фигуры (рис. 6).

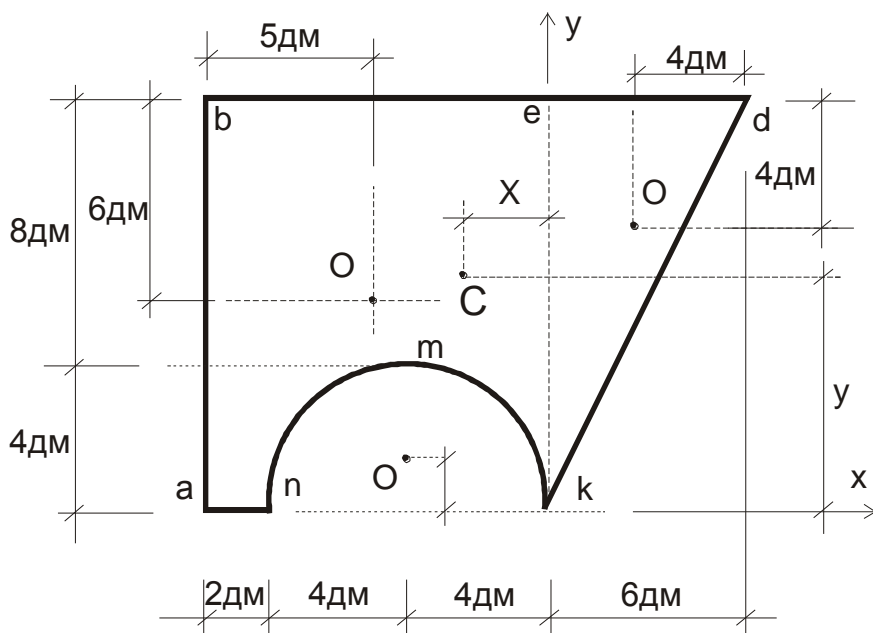


Рисунок 6 к примеру решения задачи 3

Разобьём данную фигуру на составляющие ее части: прямоугольник *abek*, треугольник *ked* и полукруг *mnk*, зафиксировав на рисунке положения их центров тяжести (точки O_1 , O_2 , O_3). При этом ординату центра тяжести полукруга вычисляем по формуле:

$$y_{O_3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{r}{\pi} \approx 0,425r \approx 0,425 \cdot 4 \approx 1,7(\text{дм}).$$

Положение центра тяжести фигуры определим относительно произвольно выбранной системы координат xKy с помощью формул

$$x_c = S_y / A, \quad y_c = S_x / A.$$

Обозначим через x_i , y_i , A_i - координаты центров тяжести и площади составляющих фигуру частей.

Результаты расчётов удобно представить в форме таблицы:

Номер части	x_i , дм	y_i , дм	A_i , дм ²	$x_i A_i$, дм ³	$y_i A_i$, дм ³
1	-5	6	120	-600	720
2	-4	1,7	-25,13	100,5	-42,72
3	2	8	36	72	288

Так как $A = \sum A_i = 120 - 25,13 + 36 \approx 130,9 \text{ дм}^2$,

$$S_x = \sum y_i A_i = 720 - 42,72 + 288 = 965,3 \text{ дм}^3,$$

$$S_y = \sum x_i A_i = -600 + 100,5 + 72 = -427,5 \text{ дм}^3,$$

Окончательно получим:

$$x_c = -427,5 / 130,9 \approx -3,27 \text{ дм}, \quad y_c = 965,3 / 130,9 \approx 7,37 \text{ дм}.$$

Положение центра тяжести отметим на чертеже фигуры.

6. Методические указания к решению задачи 4

К простейшим движениям относят поступательное движение тела и вращение его вокруг неподвижной оси (вращательное).

При поступательном движении любой отрезок прямой, проведённый в теле, остаётся параллельным самому себе. Все точки тела движутся по идентичным траекториям, а их скорости и ускорения одинаковы. Поэтому изучение поступательного движения тела сводится к исследованию движения любой из его точек.

При вращательном движении точки тела движутся по окружностям в параллельных плоскостях, причём центры окружностей расположены на оси вращения. Такое движение вполне определяется углом поворота тела относительно некоторого начального положения $\varphi = \varphi(t)$.

Угловая скорость тела в момент времени t определяется как производная от угла его поворота по времени:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Угловое ускорение тела в момент времени t равно производной от угловой скорости или второй производной угловой координаты по времени:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

При определении скорости и ускорений точки вращающегося тела можно применить формулы:

$$V = \omega R,$$

$$a_n = \omega^2 R,$$

$$a_\tau = \varepsilon R,$$

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = R \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}.$$

Задание №4 Ведущее звено 1 (Рис. 7) вращается по закону $\varphi_1 = \varphi_1(t)$. Радиусы колёс равны R_1, R_2, r_2, R_3, r_3 . В момент времени $t=1$ С определить угловые скорости и ускорения всех колёс, скорость и ускорение груза 4, передаточное отношение привода U_{13} , ускорение точки Д. направления скоростей и ускорений указать на схеме.

Исходные данные для задачи выбрать из строки таблицы 4, соответствующей последней цифре шифра. Схему на рисунке выбрать в соответствии с предпоследней цифрой шифра (для вариантов 01-10 - схема 1, для вариантов 11-20 - схема 2, для вариантов 21-30 - схема 3, для вариантов 31 и далее - схема 4)

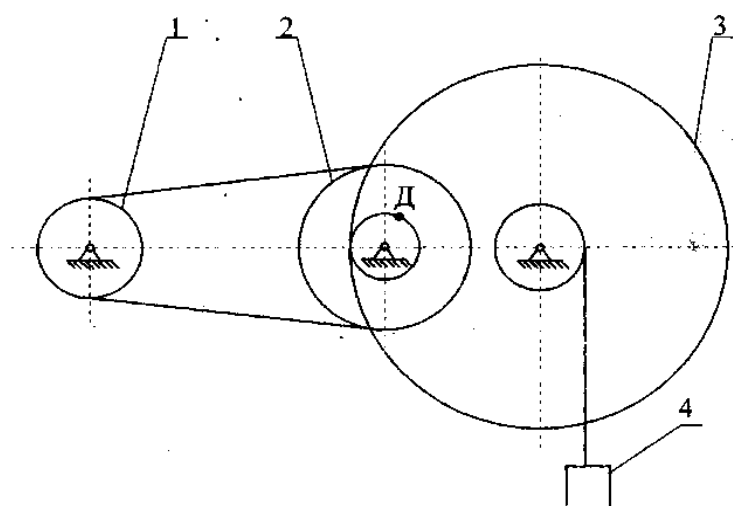


Схема 1

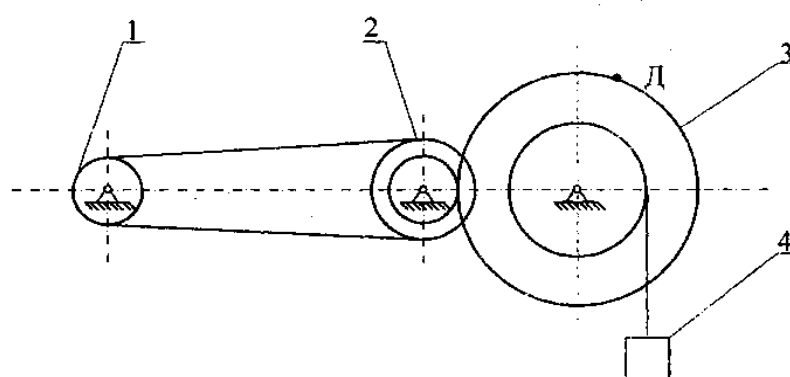


Схема 2

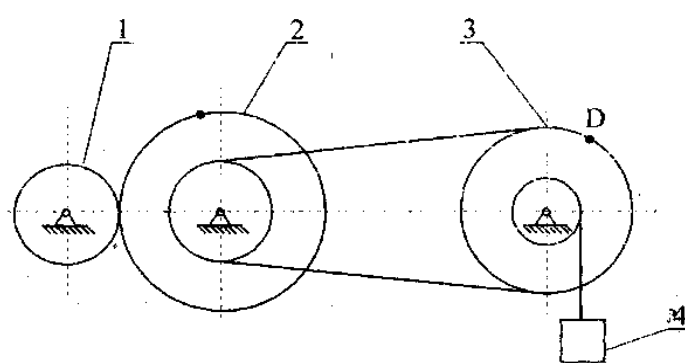


Схема 3

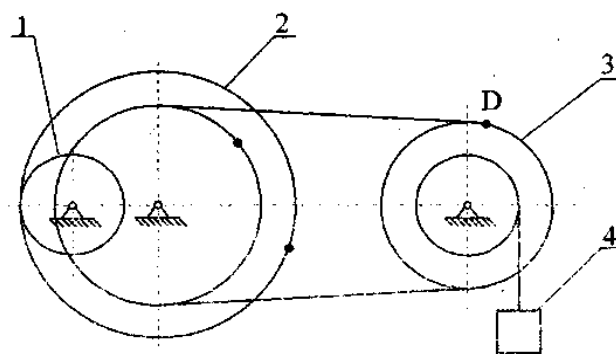


Схема 4

Рисунок 7. Схемы к заданию 4

Таблица 4. Исходные данные к задаче 4

№ строки	R_1 , см	R_2 , см	r_2 , см	R_3 , см	r_3 , см	$\varphi_1(t)$
1	10	16	10	30	15	$4(t^2-t)$
2	20	30	10	24	20	$3t^2-8t$
3	15	30	20	40	25	$6t^3-12t^2$
4	15	20	10	25	10	t^2-2t^3
5	20	24	12	30	15	$10t^2-5t^3$
6	10	16	10	30	15	$2(t^2-t)$
7	20	30	10	24	20	$5t-4t^2$
8	15	30	20	40	25	$15t-3t^3$
9	15	20	10	25	10	$2t^3-11t$
0	20	24	12	30	15	$6t^2-3t^3$

Пример выполнения задания 4.

Движение груза 1 с помощью грузоподъемного устройства (Рис.8) происходит по закону $x = At^2 + Bt + C$. В начальный момент времени ($t=0$) положение груза измеряется координатой $x_0 = 8\text{см}$, а его скорость $v_0 = \dot{x}_0 = 5\text{см}/\text{с}$. В заданный момент времени $t_2 = 3\text{с}$ координата груза $x_2 = 347\text{см}$. Параметры грузоподъемного устройства:

$$r_2 = 20\text{см}; R_2 = 45\text{см}; r_3 = 15\text{см}; R_3 = 40\text{см}; R_4 = 5\text{см}$$

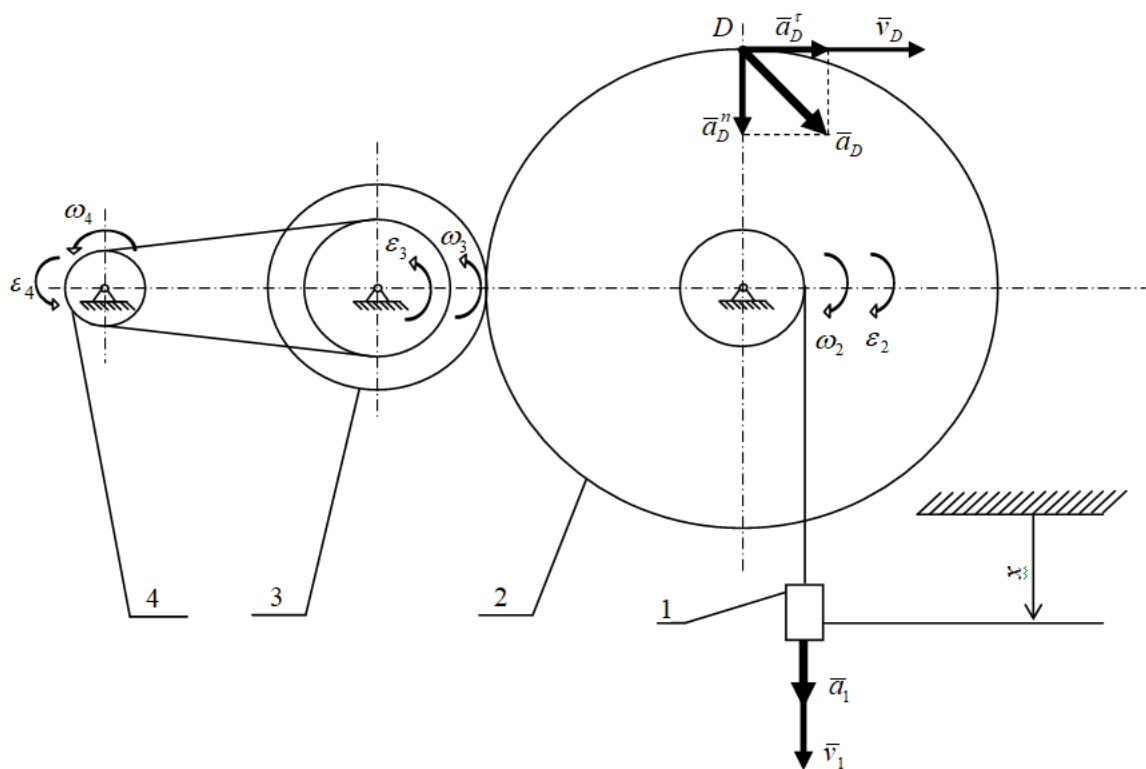


Рисунок 8 к примеру решения задачи 4

Определить коэффициенты A , B и C уравнения движения груза; найти скорость и ускорение груза; угловые скорости и ускорения всех звеньев механизма; скорость и ускорение точки D механизма в момент времени $t_1 = 2c$.

Подставив в уравнение движения груза начальные значения $t = 0$ и $x = x_0 = 8cm$, получим: $C = 8cm$.

Скорость движения груза $V = \dot{x} = 2At + B$.

Подставив начальные значения, определим $B = 5cm/c$.

Подставив в уравнение движения груза значения $t_2 = 3c$ и $x_2 = 347$, получим $A = 36cm/c^2$.

Окончательно уравнение движения груза имеет вид:

$$x = 36t^2 + 5t + 8.$$

Скорость груза $V = 72t + 5$. При $t_1 = 2c$ $V_1 = 72 \cdot 2 + 5 = 149cm/c$.

Ускорение груза найдём как производную скорости груза по времени

$$a = \dot{V} = 72cm/c^2.$$

Так как по условию задачи координата x груза увеличивается, груз движется вниз. Скорость и ускорение груза имеют положительные знаки, следовательно, направлены в сторону положительного движения груза (вниз), что показано на схеме.

Угловую скорость колеса 2 найдём через линейную скорость каната

$$\omega_2 = \frac{V_1}{r_2} = \frac{72t + 5}{20}.$$

$$\text{При } t_1 = 2c \quad \omega_2 = 7,45 rad/c$$

Направление ω_2 определяем по направлению движения каната (см. схему на рис. 4.2).

Угловую скорость колеса 3 определим по линейной скорости точки контакта колёс 2 и 3; направление вращения легко найти по схеме (рис. 4.2).

$$\omega_3 = \frac{\omega_2 \cdot R_2}{R_3} = \frac{(72t + 5) \cdot 45}{20 \cdot 40}.$$

$$\text{При } t_1 = 2c \quad \omega_3 = 8,38 rad/c.$$

Угловую скорость колеса 4 найдём через линейную скорость ремня

$$\omega_4 = \frac{\omega_3 \cdot r_3}{R_4} = \frac{(72 \cdot t + 5) \cdot 45}{20 \cdot 40} \cdot \frac{15}{5}.$$

$$\text{При } t_1=2 \text{ с } \omega_4 == 25,14 \text{ рад/с}$$

Угловые ускорения звеньев механизма определим как производные угловых скоростей по времени

$$\varepsilon_2 = \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{72}{20} = 3,6 \text{ рад/с}^2,$$

$$\varepsilon_3 = \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{72 \cdot 45}{20 \cdot 40} = 4,05 \text{ рад/с}^2,$$

$$\varepsilon_4 = \frac{d\omega_4}{dt} = \frac{72 \cdot 45 \cdot 15}{20 \cdot 40 \cdot 5} = 12,15 \text{ рад/с}^2.$$

Направления ω и ε совпадают, так как имеют одинаковые знаки.

Точка D находится на колесе 2, на расстоянии $R_2 = 45 \text{ см}$ от оси вращения. В указанный момент времени точка D имеет скорость:

$$V_D = \omega_2 \cdot R_2 = 7,45 \cdot 45 = 335,25 \text{ см/с}.$$

Направление \bar{V}_D определяется направлением ω_2 .

Нормальное ускорение точки D направлено к оси вращения.

$$a_D^n = \omega_2^2 \cdot R_2 = 7,45^2 \cdot 45 = 2497,6 \text{ см/с}^2.$$

Тангенциальное (касательное) ускорение точки D направлено по вектору \bar{V}_D , так как направление углового ускорения ε_2 совпадает по направлению с угловой скоростью ω_2 .

$$a_D^\tau = \varepsilon_2 \cdot R_2 = 3,6 \cdot 45 = 162 \text{ см/с}^2.$$

Полное ускорение точки D

$$a = \sqrt{(a_D^n)^2 + (a_D^\tau)^2} = \sqrt{2497,6^2 + 162^2} = 2502,85 \text{ см/с}^2.$$

Направление полного ускорения точки D указано на схеме (Рис. 8).

6. Методические указания к решению задачи 5

Энергетической характеристикой действия силы на движение материальной точки (тела, механической системы) является работа. Работой называется скалярное произведение вектора силы на вектор перемещения.

Работа постоянной силы на конечном прямолинейном перемещении определяется произведением модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между их направлениями:

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha.$$

Работа силы тяжести не зависит от траектории тела, а зависит лишь от изменения высоты его положения:

$$A = mgh$$

При постоянном моменте его работа на конечном значении угла поворота тела равна

$$A = M\varphi.$$

Кинетической энергией материальной точки называется скалярная величина, равная половине произведения массы точки на квадрат ее скорости.

$$T = \frac{mv^2}{2}.$$

Она характеризует способность движущейся точки (тела) передавать свое движение другим точкам (телам) как в виде механического движения, так и в других видах энергии.

Теорема об изменении кинетической энергии материальной точки в интегральной форме согласно которой **изменение кинетической энергии материальной точки равно алгебраической сумме работ всех действующих на точку сил**, имеет вид:

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \sum A_k.$$

Кинетической энергией механической системы называется арифметическая сумма кинетических энергий всех ее точек (тел).

В случае вращательного движения тела относительно неподвижной оси его кинетическая энергия определяется по формуле

$$T = \frac{J_z \omega^2}{2},$$

где ω -угловая скорость вращения тела,

J_z -момент инерции тела относительно оси вращения.

Для пустотелого цилиндра (тонкостенной оболочки) радиуса R

$$J_z = mR^2,$$

для однородного сплошного цилиндра или диска $J_z = \frac{mR^2}{2},$

для однородного стержня длиной l $J_z = \frac{ml^2}{12}.$

Приведенные формулы справедливы для тех случаев, когда ось вращения совпадает с центральной осью тела (проходит через его центр масс).

В общем случае движения механической системы или тела кинетическая энергия, согласно теореме Кенига, складывается из кинетической энергии поступательного движения со скоростью центра масс C и кинетической энергии вращательного движения относительно оси, проходящей через центр масс:

$$T = \frac{m v_c^2}{2} + \frac{J_c \omega^2}{2}.$$

Равенство $T_I - T_0 = \sum A_k^e + \sum A_k^i$ выражает теорему об изменении кинетической энергии механической системы в интегральной форме, согласно которой **изменение кинетической энергии механической системы при ее некотором перемещении равно алгебраической сумме работ на этом перемещении всех приложенных к системе внешних и внутренних сил.**

Для неизменяемой системы (в которой расстояние между каждыми двумя взаимодействующими точками или телами остается постоянным во время движения) с идеальными связями сумма работ внутренних сил равна нулю и уравнение принимает вид $T_I - T_0 = \sum A_k^e$.

Задание 5. Механическая система (рис. 9) приходит в движение из состояния покоя под действием сил тяжести. Учитывая трение скольжения тела I и пренебрегая другими силами сопротивления и массами нитей, предполагаемых нерастяжимыми, определить скорость тела I в тот момент, когда его перемещение станет равным S_I . В задании приняты следующие обозначения: m_1, m_2, m_3, m_4 – массы соответствующих тел; R_2, R_3 – радиусы окружностей соответствующих шкивов (блоков, катков); α – угол наклона плоскости к горизонту; f – коэффициент трения скольжения; блоки и катки считать однородными сплошными цилиндрами.

Необходимые для решения данные выбрать из таблицы 5 в соответствии с номером шифра. Блоки и катки, для которых радиусы инерции в таблице не указаны, считать однородными сплошными цилиндрами. Наклонные участки нити параллельны соответствующим наклонным плоскостям.

Таблица 5 - Исходные данные к заданию 5

Номер строки	m_1 кг	m_2 кг	m_3 кг	m_4 кг	R_2 , см	R_3 , см	α , град	f	S_I , м
0	4	2	3	5	20	40	15	0,1	0,5
1	5	3	6	8	40	30	20	0,2	0,8
2	10	8	4	6	30	50	30	0,3	0,4
3	6	4	8	5	15	25	15	0,4	0,2
4	3	5	6	4	25	40	20	0,1	1,0
5	2	8	4	6	50	30	30	0,2	0,5
6	8	6	10	5	40	25	15	0,3	0,8
7	5	4	8	6	30	20	20	0,4	0,4
8	4	5	2	3	20	30	30	0,1	0,2
9	8	2	6	4	25	40	15	0,2	1,0

Номер схемы на рисунке 9 выбрать в соответствии с предпоследней цифрой шифра (для вариантов 01-10 схема 1, для вариантов 11-20 схема 2 для вариантов 21-30 схема 3 для вариантов 31 и далее схема 4). Данные для расчёта выбрать из строки таблицы 5, соответствующей последней цифре шифра.

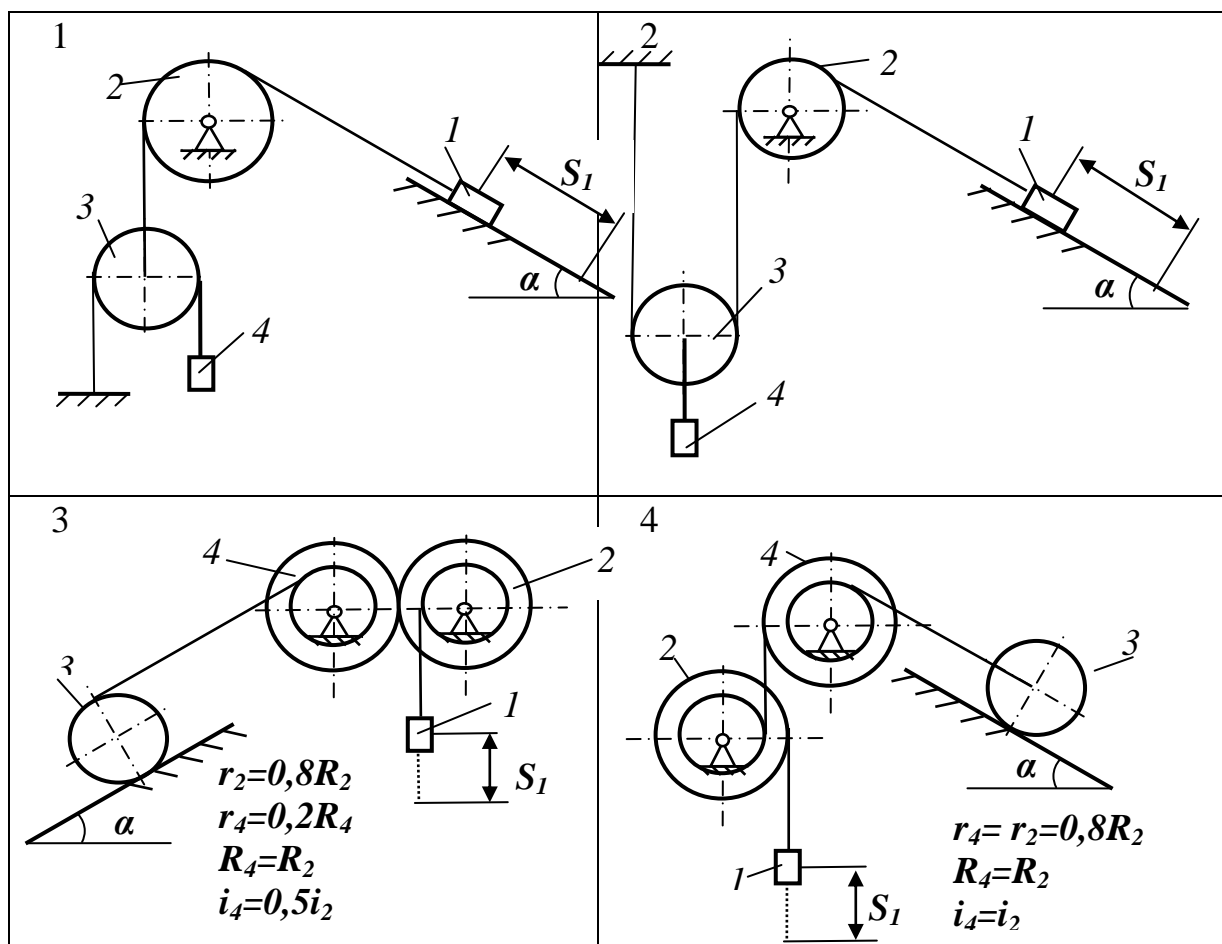


Рисунок 9. Схемы к заданию 5

Пример выполнения задания 5

Механическая система (рис. 10) состоит из сплошного однородного цилиндрического катка 4, невесомого блока 5, подвижного блока 3, ступенчатого шкива 2 и груза 1. Тела системы соединены нерастяжимыми невесомыми нитями, намотанными на шкив 2. Система приходит в движение из состояния покоя под действием сил тяжести. Определить скорость груза 1 в тот момент, когда его перемещение станет равным S_1 .

Исходные данные: $m_1=8$ кг; $m_2=4$ кг; $m_3=6$ кг; $m_4=10$ кг; $R_2=0,3$ м; $r_2=0,1$ м; $i_2=0,2$ м; $R_3=0,1$ м; $\alpha=60^\circ$; $f=0,1$; $k=0,1$ см; $S_1=0,2$ м.

Для определения скорости груза 1 воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии для неизменяемой механической системы с идеальными связями:

$$T - T_0 = \sum A_k^e.$$

Так как в начальный момент времени система находилась в покое, ее кинетическая энергия $T_0=0$. В произвольный момент времени величина T равна арифметической сумме кинетических энергий всех тел системы, имеющих массу:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4.$$

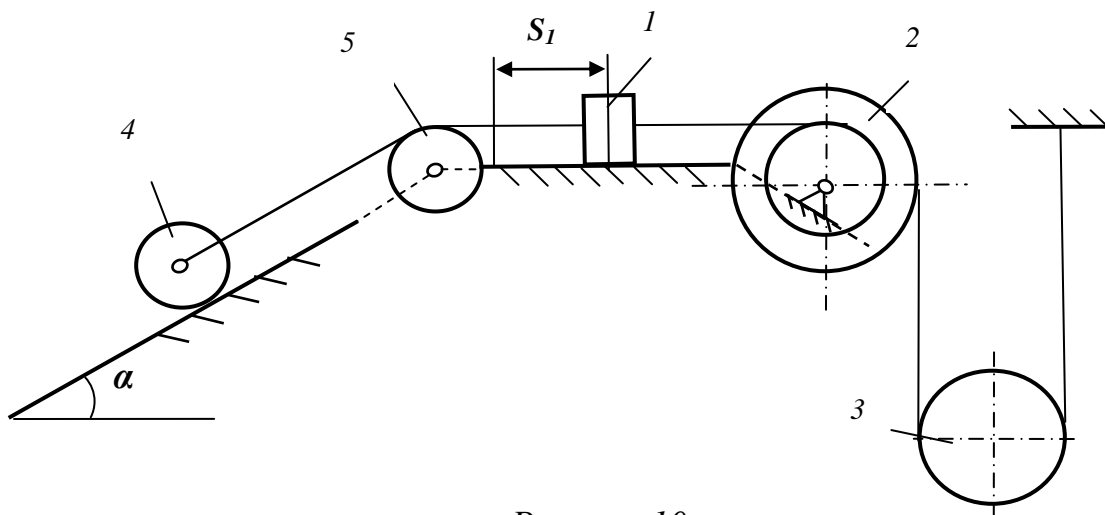


Рисунок 10

Учитывая, что тело 1 движется поступательно, тело 2 вращается вокруг неподвижной оси, а тела 3 и 4 совершают плоскопараллельные движения, получим

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2; \quad T_2 = \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2; \quad T_3 = \frac{1}{2} m_3 v_{C3}^2 + \frac{1}{2} J_{C3} \omega_3^2;$$

$$T_4 = \frac{1}{2} m_4 v_{C4}^2 + \frac{1}{2} J_{C4} \omega_4^2.$$

Все входящие сюда скорости необходимо выразить через искомую величину v_1 .

Угловая скорость вращения шкива 2 определяется через линейную скорость нити, совпадающую с v_1 :

$$\omega_2 = \frac{v_1}{r_2}, \text{ а его момент инерции } J_2 = m_2 i_2^2.$$

Тогда кинетическая энергия этого шкива

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 v_1^2 \frac{i_2^2}{r_2^2}.$$

Для определения угловой скорости подвижного блока 3 заметим, что точка K_3 является мгновенным центром скоростей, и скорость центра масс C_3 блока вдвое меньше скорости нити v_E (рис. 11), величина

которой
$$v_E = \omega_2 R_2 = v_1 \frac{R_2}{r_2}.$$

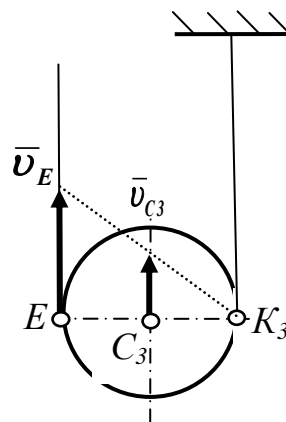


Рисунок 11

Угловая скорость поворота блока 3 $\omega_3 = \frac{v_E}{2R_3} = v_1 \frac{R_2}{2r_2R_3}$,

а его момент инерции как однородного сплошного цилиндра

$$J_{c3} = \frac{m_3 R_3^2}{2}.$$

Окончательно кинетическая энергия блока 3 равна:

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 \frac{1}{2} v_1^2 \frac{R_2^2}{r_2^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{m_3 R_3^2}{2} \cdot v_1^2 \frac{R_2^2}{4r_2^2 R_3^2} = \frac{5}{16} m_3 v_1^2 \frac{R_2^2}{r_2^2}.$$

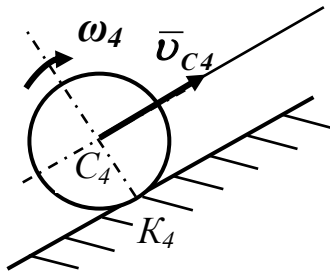


Рисунок 12

Величина скорости центра масс катка 4 C_4 равна скорости груза 1, а его угловая скорость

$$\omega_4 = \frac{v_1}{R_4}, \text{ так как точка } K_4 \text{ — мгновенный центр}$$

скоростей (рис.12). При этом момент инерции катка 4 относительно оси, проходящей через его центр масс, определим как для однородного

сплошного цилиндра по формуле $J_{c4} = \frac{m_4 R_4^2}{2}$.

Кинетическая энергия катка 4 равна

$$T_4 = \frac{1}{2} m_4 v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{m_4 R_4^2}{2} \cdot \frac{v_1^2}{R_4^2} = \frac{3}{4} m_4 v_1^2.$$

Окончательно кинетическая энергия механической системы выражается равенством:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_1^2 \frac{i_2^2}{r_2^2} + \frac{5}{16} m_3 v_1^2 + \frac{3}{4} m_4 v_1^2 = \\ &= v_1^2 \left(\frac{m_1}{2} + \frac{m_2}{2} \cdot \frac{i_2^2}{r_2^2} + \frac{5}{16} m_3 + \frac{3}{4} m_4 \right). \end{aligned}$$

Определим сумму работ всех действующих внешних сил на том перемещении, которое будет иметь система, когда тело 1 пройдет путь S_1 . Изобразим на схеме внешние силы, действующие на тела, входящие в механическую систему (рис.13): активные силы G_1, G_2, G_3, G_4 , реакции связей N_1, N_2, N_4, N_5, T , силы трения $F_{тр.1}$, и $F_{тр.4}$, и момент трения $M_{тр.}$ (сопротивление перекачиванию тела 4 по поверхности). При определении направления сил трения и момента трения предположим, что тело 1 движется вправо.

Выразим перемещения точек приложения сил через S_1 , учитывая при этом, что соотношения между перемещениями такие же, как и между скоростями.

$$S_{C4} = S_1; \quad \varphi_4 = \frac{S_1}{R_4}; \quad \varphi_2 = \frac{S_1}{r_2}; \quad S_E = \varphi_2 R_2 = S_1 \frac{R_2}{r_2}; \quad S_{C3} = \frac{S_E}{2} = S_1 \frac{R_2}{2r_2}.$$

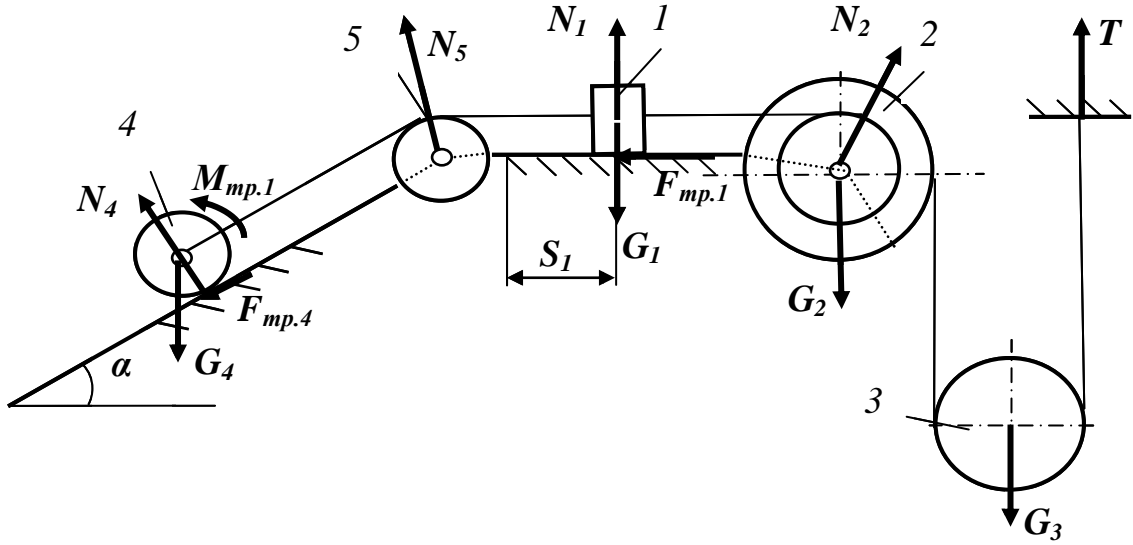


Рисунок 13

Выразим перемещения точек приложения сил через S_1 , учитывая при этом, что соотношения между перемещениями такие же, как и между скоростями.

$$S_{C4} = S_1; \quad \varphi_4 = \frac{S_1}{R_4}; \quad \varphi_2 = \frac{S_1}{r_2}; \quad S_E = \varphi_2 R_2 = S_1 \frac{R_2}{r_2}; \quad S_{C3} = \frac{S_E}{2} = S_1 \frac{R_2}{2r_2}.$$

Отметим, что реакции связей N_1, N_2, N_4, N_5, T , сила трения $F_{mp.4}$, силы тяжести G_1, G_2 работ не производят, так как они либо перпендикулярны направлению перемещения точки приложения, либо перемещение этой точки равно нулю. Работы остальных сил равны

$$A(F_{TP}) = -F_{TP} \cdot S_1 = -fN_1 S_1 = -fm_1 g S_1;$$

$$A(G_4) = G_4 S_{C4} \cos(90^\circ - \alpha) = m_4 g S_1 \sin \alpha;$$

$$A(M_{TP}) = -M_{TP} \varphi_4 = -kN_4 \frac{S_1}{R_4} = -km_4 g \cos \alpha \frac{S_1}{R_4};$$

$$A(G_3) = -G_3 S_{C3} = -m_3 g S_1 \frac{R_2}{2r_2}.$$

Сумма работ внешних сил равна

$$\begin{aligned} \sum A_k^e &= m_4 g S_1 \sin \alpha - fm_1 g S_1 - km_4 g \cos \alpha \frac{S_1}{R_4} - m_3 g S_1 \frac{R_2}{2r_2} = \\ \sum &= g S_1 \left(m_4 \sin \alpha - fm_1 - \frac{km_4 \cos \alpha}{R_4} - \frac{m_3 R_2}{2r_2} \right). \end{aligned}$$

Подставляя выражения, определим величину искомой скорости: $v_1 = 1,47$ м/с.

Задания и методика выполнения по разделу «Сопротивление материалов»

Задание 6. Расчет на прочность при растяжении

Плоская ферма (рисунок 14) состоит из двух стержней квадратного сечения. Материал стержней - сталь **Ст2**. Ферма нагружена силой $F=100$ кН. Определить необходимые размеры сечений стержней.

Значения углов между стержнями фермы взять из таблицы 2 в соответствии с номером варианта.

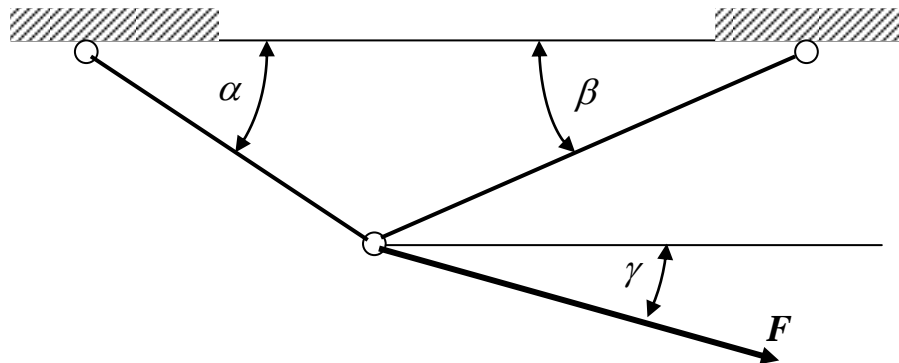


Рисунок 14 – Схема фермы к заданию 6

Таблица 6 – Данные к заданию 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	60°	60°	60°	60°	60°	90°	90°	45°	45°	45°
β	45°	45°	30°	30°	30°	45°	135°	90°	60°	60°
γ	90°	120°	90°	120°	135°	120°	60°	60°	60°	90°

Продолжение таблицы 6

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
α	45°	45°	45°	45°	45°	45°	30°	30°	30°	30°
β	45°	45°	30°	30°	30°	30°	120°	90°	90°	60°
γ	60°	120°	60°	90°	120°	135°	45°	45°	60°	45°

Продолжение таблицы 6

Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
α	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
β	60°	60°	45°	45°	45°	45°	30°	30°	30°	30°
γ	60°	90°	45°	60°	90°	120°	45°	60°	120°	135°

Пример проектировочного расчета на растяжение

Плоская ферма (рисунок 15) состоит из двух стержней круглого поперечного сечения. Материал стержней – сталь **Ст3**. Определить необходимые размеры сечения стержней.

Решение

Определяем продольные силы в стержнях методом сечений. Для этого вырезаем узел B (рисунок 16), наносим векторы продольных сил N_1 и N_2 по направлению от сечений и составляем уравнения равновесия узла в виде сумм проекций сил на любые две взаимно перпендикулярные оси x и y :

$$\begin{cases} \sum X = -N_2 \cdot \cos 30^\circ + N_1 \cdot \cos 60^\circ = 0, \\ \sum Y = N_2 \cdot \sin 30^\circ + N_1 \cdot \sin 60^\circ - F = 0. \end{cases}$$

Решая совместно эти уравнения, получим значения продольных сил:

$$N_1 = 17,3 \text{ кН}; N_2 = 10,0 \text{ кН}.$$

Продольные силы положительные, следовательно, оба стержня работают на растяжение.

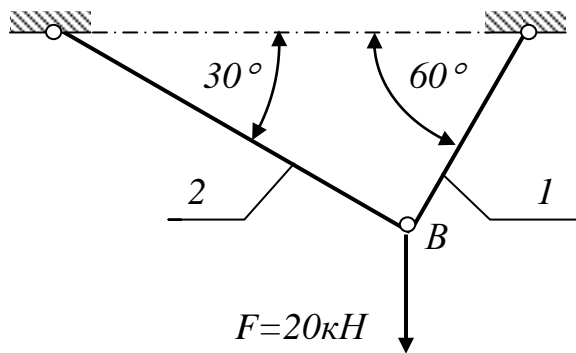


Рисунок 15

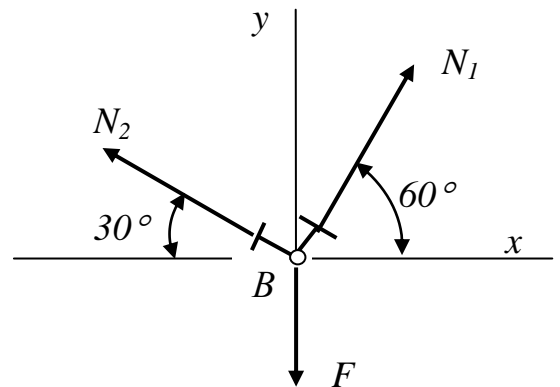


Рисунок 16

В условие прочности при растяжении (2) подставляем выражение площади круглого сечения $A = \pi d^2 / 4$ и из полученного неравенства определяем диаметр сечения

$$d \geq \sqrt{\frac{4N}{\pi[\sigma]_p}}.$$

Из **приложения Б** выписываем величину допускаемых напряжений для стали Ст3 – $[\sigma]_p = 125 \text{ МПа}$ и вычисляем диаметры сечения стержней:

$$d_2 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 10 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 125 \cdot 10^6}} = 0,0102 \text{ м} = 10,2 \text{ мм};$$

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 17,3 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 125 \cdot 10^6}} = 0,0133 \text{ м} = 13,3 \text{ мм}.$$

Полученные значения диаметров округляем до ближайших больших значений из рядов нормальных линейных размеров (**приложение В**).

Окончательно принимаем: $d_2 = 11 \text{ мм}$, $d_1 = 14 \text{ мм}$.

Задание 7 Расчет на прочность при срезе и смятии

Задача 7.1

Стальная полоса сечением 50×5 мм приваривается к фасонному листу комбинированным швом (рисунок 17). Определить необходимую длину фланговых сварных швов, если соединение должно передавать усилие $F=20$ кН.

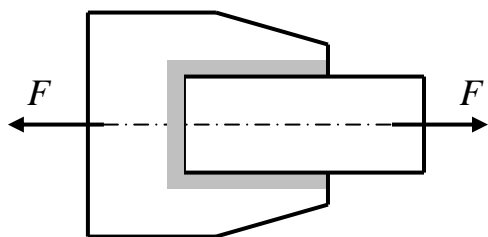


Рисунок 17

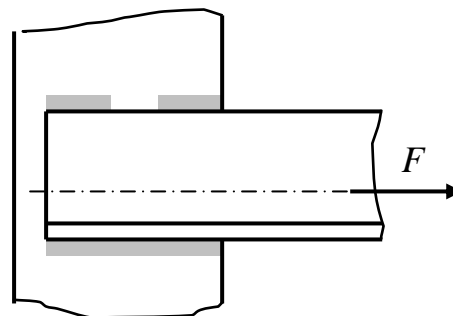


Рисунок 18

Задача 7.2

Равнополочный уголок $50 \times 50 \times 4$ мм, изготовленный из стали **Ст3**, приваривается к опоре двумя фланговыми швами (рисунок 18). Определить длину фланговых сварных швов из условия равнопрочности соединения на срез и уголка на растяжение.

Задача 7.3

Стойка круглого поперечного сечения диаметром $d=40$ мм вставлена в цилиндрическое отверстие опоры и приварена к ней угловым кольцевым швом (рисунок 19). Стойка нагружена сжимающей силой $F=50$ кН. Определить необходимый катет сварного шва.

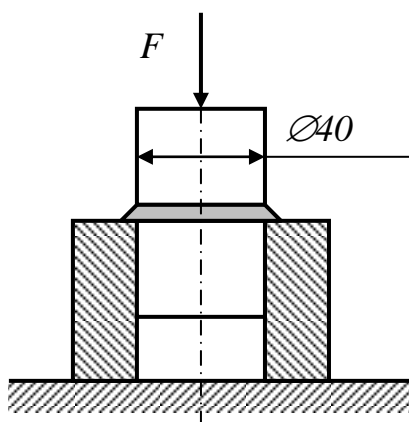


Рисунок 19

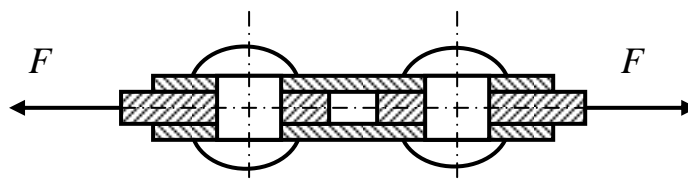


Рисунок 20

Задача 7.4

Стык двух листов толщиной $t=5\text{ мм}$ (рисунок 20) перекрыт двумя накладками толщиной $t_f=3\text{ мм}$ каждая. Соединение растягивается усилием $F=10\text{ кН}$. Определить необходимое количество заклепок и разместить их в плане. Материал всех деталей – сталь **Ст2**.

Задача 7.5

Тяга прямоугольного сечения соединяется с кронштейном цилиндрическим пальцем (рисунок 21). Кронштейн приваривается к основанию угловым швом. Определить все рассчитываемые размеры данного крепежного узла при значении продольной силы в тяге $N=50\text{ кН}$. Материал всех деталей – сталь **30**.

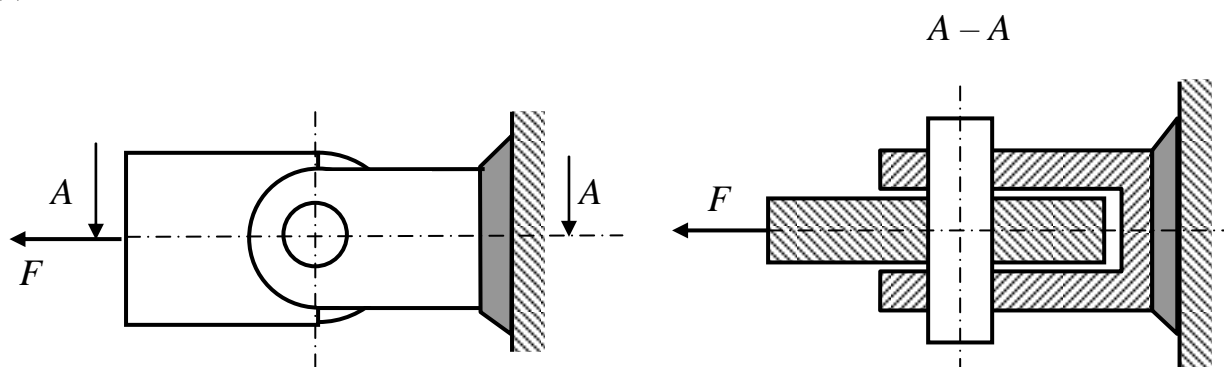


Рисунок 21

Задача 7.6

Кронштейн, изготовленный из толстого стального листа, передает на колонну усилие $F=30\text{ кН}$ (рисунок 22). Соединение кронштейна с колонной – болтовое односрезное. Определить диаметры болтов из условия их прочности на срез. Материал болтов – сталь **Ст2**.

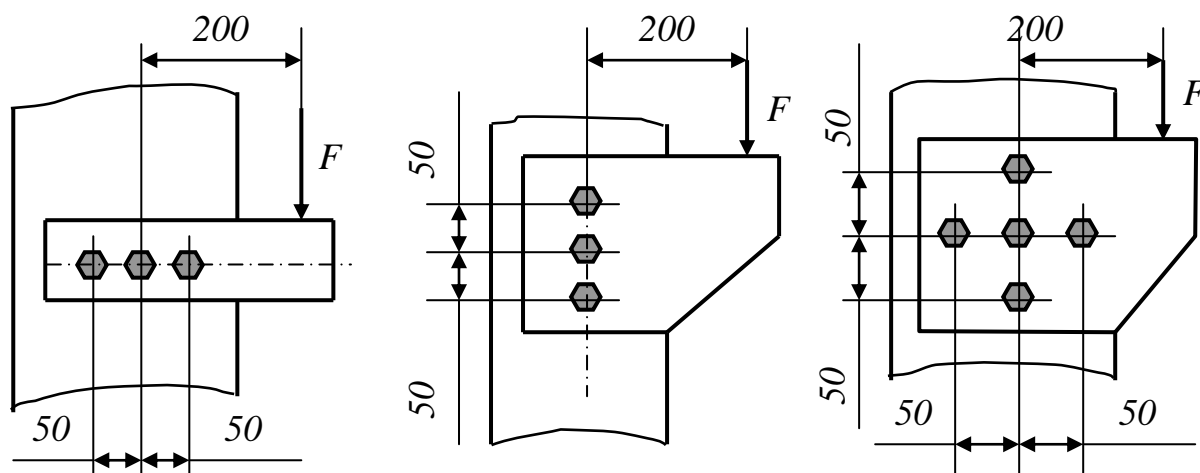


Рисунок 22

Пример расчета цилиндрического шарнира

Тяга соединяется с кронштейном (рисунок 23) при помощи цилиндрического пальца. Материал всех деталей – сталь **Ст3**. Определить необходимые диаметр пальца d и толщину тяги t .

Решение

Палец работает на срез по двум плоскостям и смятие тягой и кронштейном (рисунок 24).

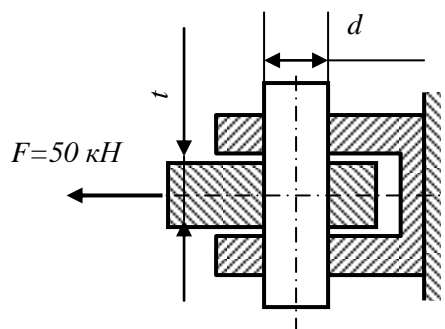


Рисунок 23

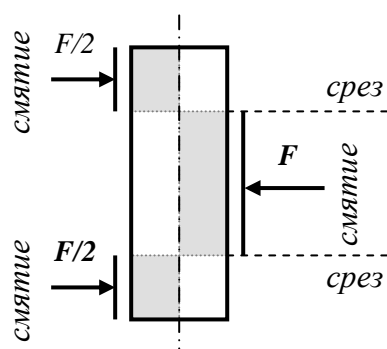


Рисунок 24

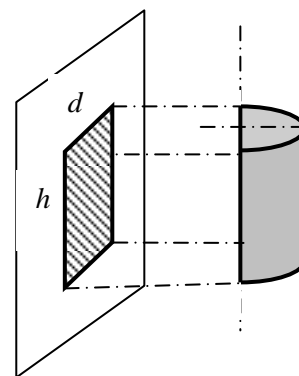


Рисунок 25

Срезающая сила, очевидно, $Q=F$. Общая площадь среза пальца $A_{cp}=(\pi d^2/4) \cdot k$, где d – диаметр сечения пальца; $k=2$ – число плоскостей среза пальца. С учетом этих значений из условия прочности на срез (9) получаем:

$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi k [\tau]_{cp}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 2 \cdot 75 \cdot 10^6}} = 0,0206 \text{ м},$$

где $[\tau]_{cp}=75$ МПа – допускаемые напряжения на срез для стали **Ст3**.

Полученное значение диаметра округляем до нормального размера (**приложение В**): $d = 22$ мм.

Смятие пальца происходит по цилиндрической поверхности (рисунок 25), поэтому в качестве величины $A_{см}$ в условии прочности на смятие (10) принимаем площадь проекции поверхности смятия $A_{см}=d \cdot t$, тогда из (10)

$$t \geq Q/(d [\sigma]_{см}) = 50 \cdot 10^3 / (22 \cdot 10^{-3} \cdot 190 \cdot 10^6) = 0,0120 \text{ м},$$

где $[\sigma]_{см}=190$ МПа для стали **Ст3** (**приложение Б**).

Принимаем в соответствии с рядами нормальных размеров (**приложение В**) $t=12$ мм. Очевидно, что толщина планок кронштейна должна быть в 2 раза меньше: $t/2=6$ мм.

Задание 8 Расчет на прочность и жесткость при кручении

Задача 8.1

На валу (рисунок 26) шкив *I* – ведущий. Моменты на ведомых шкивах: $M_2=200\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_3=300\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_4=400\text{Н}\cdot\text{м}$. Построить эпюру крутящего момента T_K и определить диаметры сечений вала, предполагая его ступенчатым. Данные для расчета взять из таблицы 4 по номеру варианта.

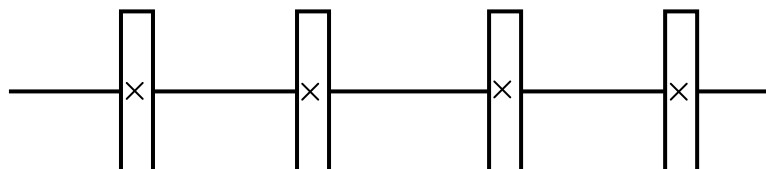


Рисунок 26 - Схема вала к задаче 8.1

Таблица 7 – Данные к задаче 8.1

Номер варианта	1	2	3	4	5
Расположение шкивов на валу	1,2,3,4	1,2,4,3	1,3,2,4	1,3,4,2	1,4,2,3
Сталь	45	40	35	30	25

Продолжение таблицы 7

Номер варианта	6	7	8	9	10
Расположение шкивов на валу	1,4,3,2	2,1,3,4	2,1,4,3	2,3,1,4	2,3,4,1
Сталь	20	15	10	08	08

Продолжение таблицы 7

Номер варианта	11	12	13	14	15
Расположение шкивов на валу	2,4,1,3	2,4,3,1	3,1,2,4	3,1,4,2	3,2,1,4
Сталь	10	15	20	25	30

Продолжение таблицы 7

Номер варианта	16	17	18	19	20
Расположение шкивов на валу	3,2,4,1	3,4,1,2	3,4,2,1	4,1,2,3	4,1,3,2
Сталь	35	40	45	45	40

Продолжение таблицы 7

Номер варианта	21	22	23	24	25
Расположение шкивов на валу	4,2,1,3	4,2,3,1	4,3,1,2	4,3,2,1	2,1,3,4
Сталь	35	30	25	20	15

Продолжение таблицы 7

Номер варианта	26	27	28	29	30
Расположение шкивов на валу	2,4,1,3	3,1,2,4	3,2,1,4	4,1,3,2	4,3,1,2
Сталь	10	10	15	20	25

ЗАДАЧА 8.2

Два соосных вала (рисунок 27) соединены между собой втулочной (четные номера вариантов) или фланцевой (нечетные номера вариантов) муфтой. Соединение передает мощность P при числе оборотов в минуту n . Определить:

- Диаметр вала D из расчета на прочность и жесткость. В расчете на жесткость принять значение допускаемого относительного угла закручивания $[\theta]=0,5$ град/м.
- Катет сварного шва h , предполагая шов замкнутым по окружности вала.
- Диаметр d штифта втулочной муфты или болтов фланцевой (число болтов $k=4$) муфты из условия прочности на срез.
- Толщину t втулки или фланца из условия прочности на смятие.

Данные для расчета взять из таблицы 8 по номеру варианта.

Таблица 8 - Данные для расчета к задаче 8.2

Номер варианта	1	2	3	4	5
P , кВт	1	2	3	4	5
n , об/мин	4	10	14	19	20
Сталь	08	10	15	20	25

Продолжение таблицы 8

Номер варианта	6	7	8	9	10
P , кВт	6	7	8	9	10
n , об/мин	30	30	35	40	45
Сталь	30	35	40	45	45

Продолжение таблицы 8

Номер варианта	11	12	13	14	15
P , кВт	11	12	13	14	15
n , об/мин	50	55	60	65	70
Сталь	40	35	30	25	20

Продолжение таблицы 8

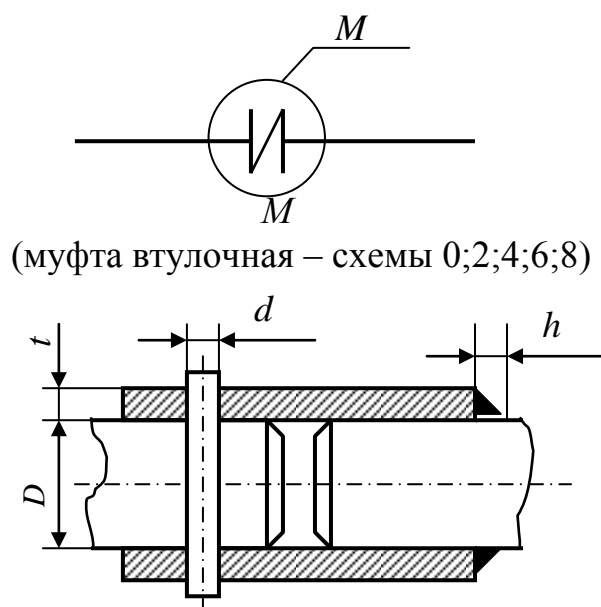
Номер варианта	16	17	18	19	20
P , кВт	16	17	18	19	20
n , об/мин	75	80	85	90	100
Сталь	15	10	08	08	10

Продолжение таблицы 8

Номер варианта	21	22	23	24	25
P , кВт	21	22	23	24	25
n , об/мин	100	105	110	110	120
Сталь	15	20	25	30	35

Продолжение таблицы 8

Номер варианта	26	27	28	29	30
P , кВт	26	27	28	29	30
n , об/мин	125	130	140	140	150
Сталь	40	45	45	40	35



(муфта фланцевая – схемы 1;3;5;7;9)

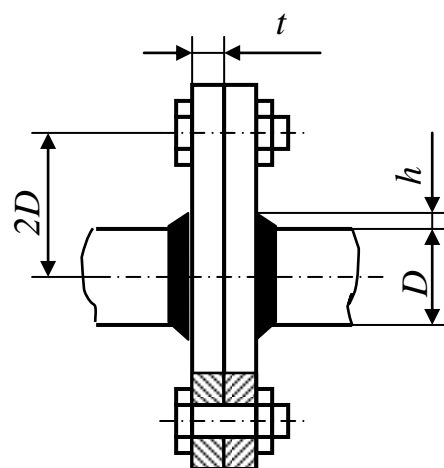


Рисунок 27 - Расчетная схема к задаче 8.2

Пример расчета втулочной муфты

Два соосных вала диаметром $D=50$ мм соединяются между собой втулочной муфтой (рисунок 28). Муфта с одним валом соединяется цилиндрическим штифтом, к другому валу крепится угловым сварным швом. Соединение передает крутящий момент $M=600$ Н·м. Материал валов и муфты – сталь **45**. Определить: диаметр сечения штифта d , толщину втулки t , катет сварного шва h .

Решение

Штифт (рисунок 29) работает на срез и смятие. Срезающая сила Q равна окружному усилию на поверхности вала:

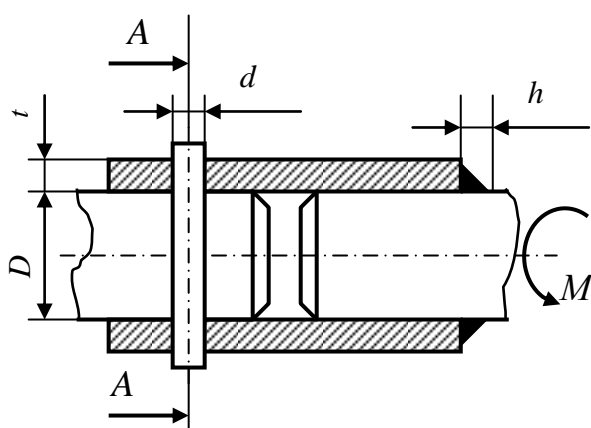


Рисунок 28

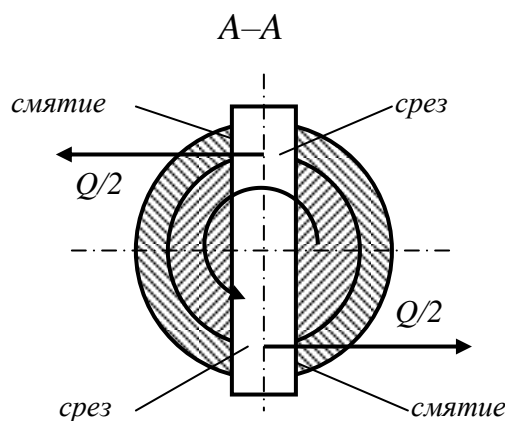


Рисунок 29

$$Q = M/R = 2M/D = 600 \cdot 2/0,050 = 24000 \text{ Н}.$$

Площадь среза штифта $A \approx \pi \cdot d^2 / 4 \cdot k$, где $k=2$.

Из условия прочности на срез (9)

$$d \geq \sqrt{\frac{4Q}{\pi k [\tau]_{cp}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 24000}{3,14 \cdot 2 \cdot 125 \cdot 10^6}} = 0,011 \text{ м},$$

где $[\tau]_{cp} = 125 \text{ МПа}$ для стали **45** (приложение Б).

Полученное значение диаметра штифта соответствует нормальному размеру.

Толщину стенки муфты t определяем из условия прочности на смятие (10), подставив в него выражение $A_{см} = t \cdot d \cdot k$ (смотри предыдущий пример):

$$t \geq Q / (dk [\sigma]_{см}) = 24000 / (0,011 \cdot 2 \cdot 300 \cdot 10^6) = 0,0036 \text{ м},$$

где $[\sigma]_{см} = 300 \text{ МПа}$ для стали **45** (приложение Б).

Принимаем толщину стенки муфты $t = 4 \text{ мм}$.

Катет сварного шва h определяем из условия прочности на срез в наиболее узком месте (по биссектрисе). Площадь среза шва

$$A_{cp} = h \cdot \cos 45^\circ \cdot L = 0,7h \pi D,$$

где $h \cdot \cos 45^\circ = 0,7h$ – наименьшая толщина шва;

$L = \pi D$ – длина шва по окружности вала.

Тогда из условия прочности (9)

$$h \geq Q / (0,7\pi D \cdot [\tau]_s) = 24000 / (0,7 \cdot 3,14 \cdot 0,050 \cdot 80 \cdot 10^6) = 0,0027 \text{ м},$$

где можно принять $[\tau]_s = 80 \text{ МПа}$ для ручной сварки и $[\tau]_s = 110 \text{ МПа}$ для автоматической.

Принимаем величину катета шва $h = 3 \text{ мм}$.

Пример расчета фланцевой муфты

Два соосных вала диаметром $D = 40 \text{ мм}$ соединяются фланцевой муфтой (рисунок 30). Число болтов – 4. Материал деталей – сталь **40**. Соединение передает крутящий момент $M = 1700 \text{ Н·м}$. Определить диаметр болтов d и толщину фланца t .

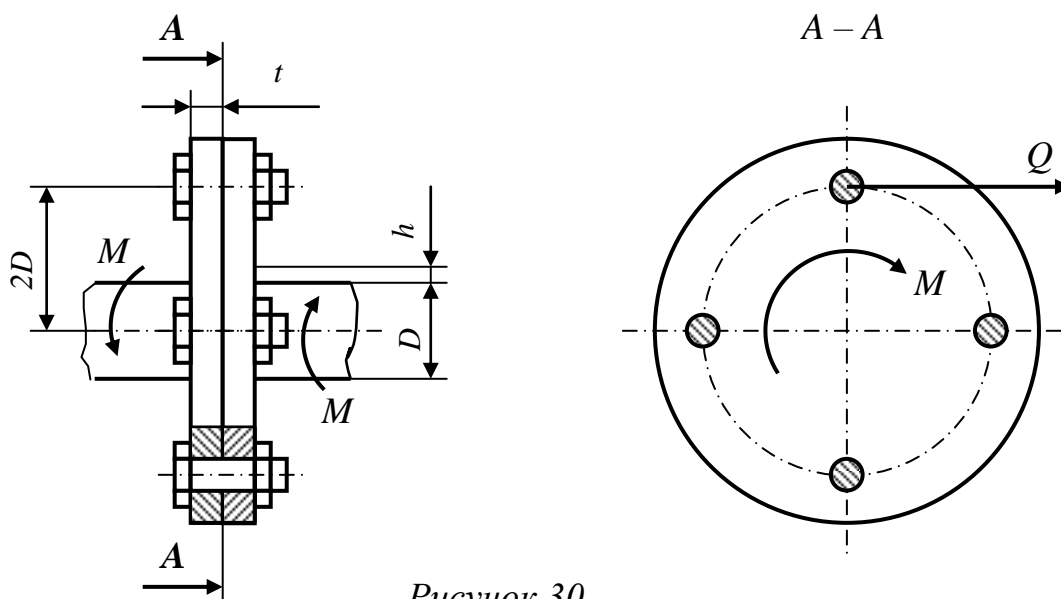


Рисунок 30

Решение

Окружное усилие на удалении $2D$ от оси вала, срезающее болты, равно:

$$Q = M / (2D) = 1700 / (0,04 \cdot 2) = 21250 \text{ Н}.$$

Площадь среза всех болтов

$$A_{cp} = (\pi d^2 / 4) k,$$

где $k = 4$ – число плоскостей среза (число болтов).

Тогда из условия прочности на срез (9):

$$d \geq \sqrt{\frac{4Q}{\pi k [\tau]_{cp}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21250}{3,14 \cdot 4 \cdot 115 \cdot 10^6}} = 7,67 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $[\tau]_{cp} = 115 \text{ МПа}$ для стали **40** (приложение Б).

Принимаем болт с метрической резьбой **M8**.

Толщину фланца t определяем из условия прочности на смятие (10), подставив в него выражение для $A_{cm} = t \cdot d \cdot k$:

$t \geq Q / (d \cdot k \cdot [\sigma]_{cm}) = 21250 / (0,008 \cdot 4 \cdot 280 \cdot 10^6) = 0,0028 \text{ м},$
 где $[\sigma]_{cm} = 280 \text{ МПа}$ для стали **40**.
 Принимаем толщину фланца $t = 4 \text{ мм}$.

Задание 9 Расчет на прочность и определение перемещений при плоском изгибе

Задача 9.1

Консольная балка (рисунок 31, номер схемы соответствует второй цифре варианта) изготавливается из деревянного бруса прямоугольного сечения $b \times h$. Определить размеры сечения бруса из расчета на прочность по нормальным и касательным напряжениям. В расчетах принять соотношение $b/h = 2$ и следующие значения допускаемых напряжений: $[\sigma]_{изг} = 10 \text{ МПа}$; $[\tau]_{ск} = 1 \text{ МПа}$.

Данные для расчета взять из таблицы 6 по первой цифре варианта.

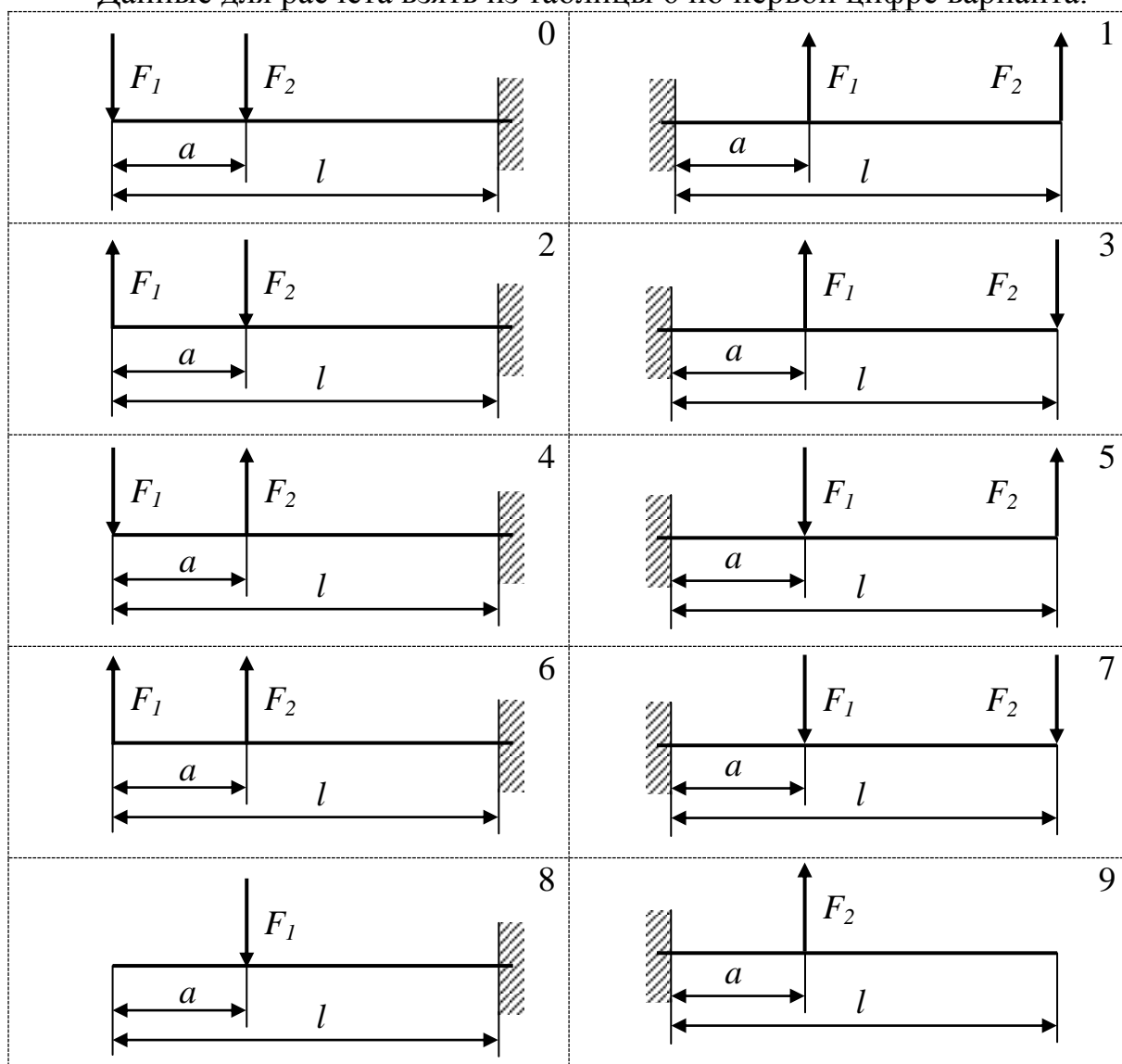


Рисунок 31 – Схема консоли к задаче 9.1

Таблица 9 – Данные к задаче 9.1

Первая цифра варианта	0	1	2	3
l , м	1,5	2,0	2,5	1,0
a , м	0,5	0,8	1,5	0,6
F_1 , кН	2,0	3,0	1,0	5,0
F_2 , кН	3,0	1,0	2,0	2,0

Задача 9.2

Двухопорная балка (рисунок 32, номер схемы соответствует второй цифре варианта) сварена из двух одинаковых швеллеров. Материал – сталь **Ст3**. Построить эпюры изгибающего момента M_x и поперечной силы Q . Найти номер швеллера из расчета на прочность по нормальным напряжениям. Вычислить величину прогиба балки в указанной точке **1** или **2**. Данные для расчета взять из таблицы 9 по первой цифре варианта.

Таблица 10 – Данные к задаче 9.2

Первая цифра варианта	0	1	2	3
l , м	1,0	2,0	3,0	4,0
a , м	0,2	1,0	1,0	1,0
b , м	0,5	0,5	1,5	1,0
F , кН	50	40	30	20
M , кН·м	30	20	20	10
Точка определения прогиба	1	2	1	2

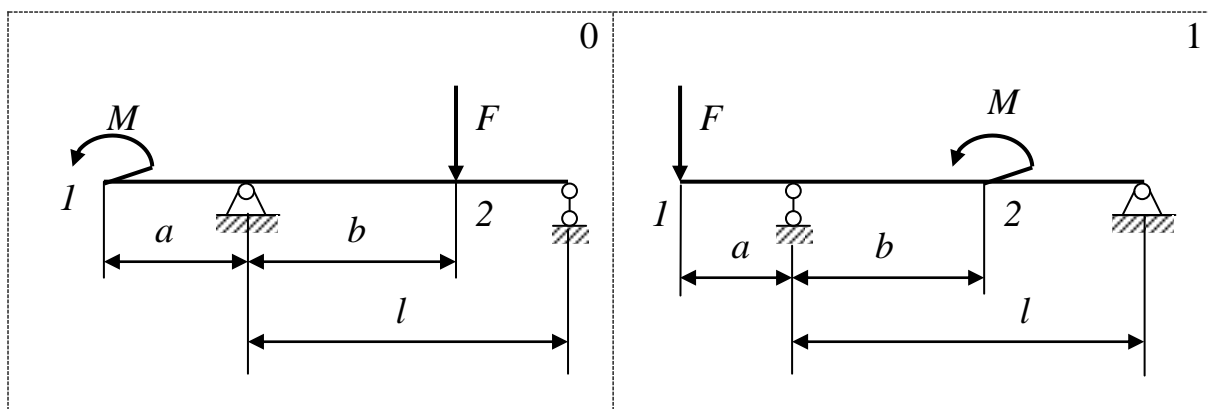
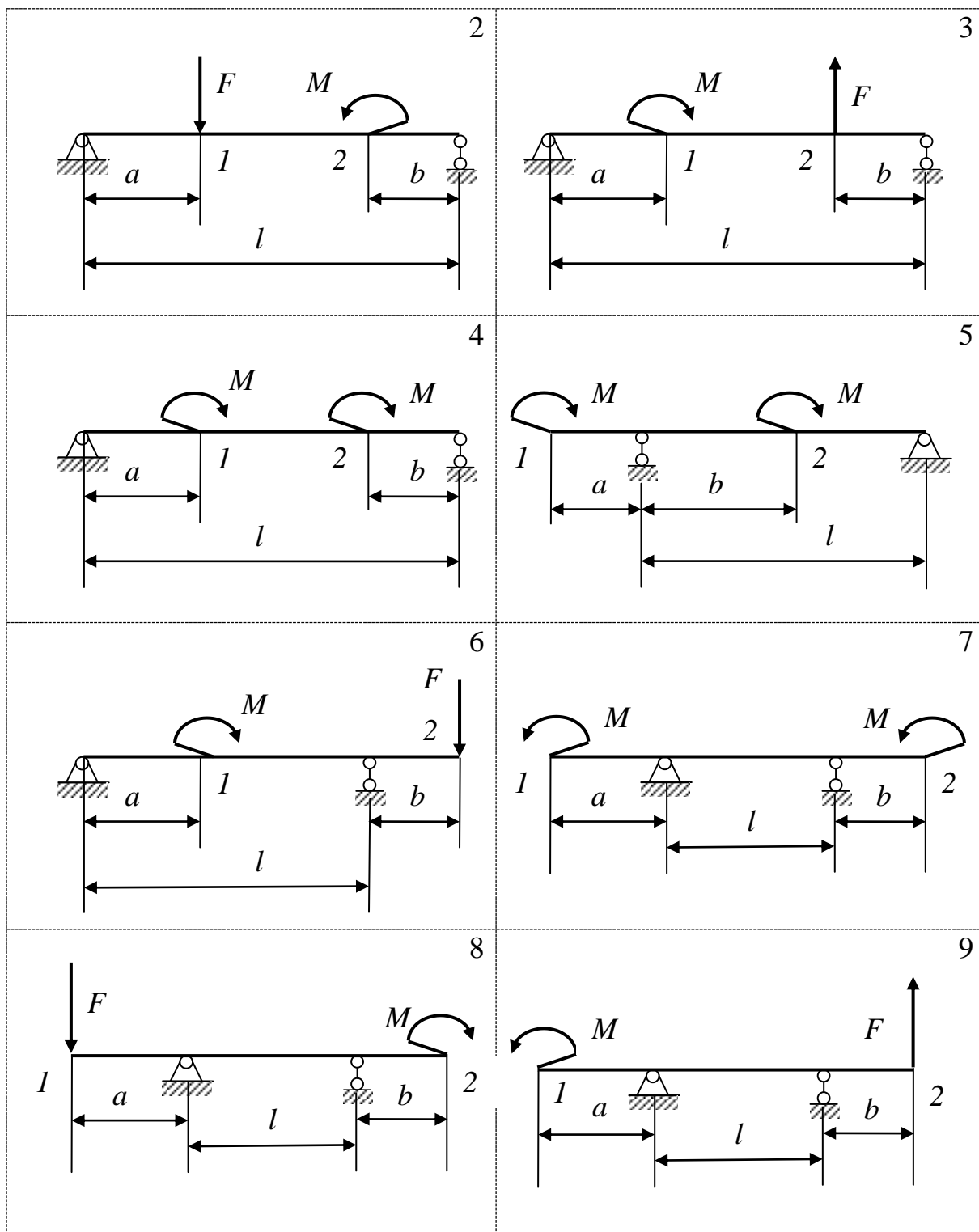


Рисунок 32 – Схема балки к задаче 9.2



Продолжение рисунка 32

Задача 9.3

Для заданной схемы балки (рисунок 33, номер схемы соответствует второй цифре варианта):

- построить эпюру изгибающего момента M_x и поперечной силы Q ;
- определить номер двутавра из расчета на прочность по нормальным напряжениям (материал – сталь **Ст3**);
- вычислить величину прогиба в сечении **C**.

Данные для расчета взять из таблицы 11 по первой цифре варианта.

Таблица 11 – Данные к задаче 9.3

Первая цифра варианта	0	1	2	3
q , кН/м	40	30	20	10
l , м	2,0	3,0	4,0	5,0
a , м	0,5	1,5	2,0	2,0
b , м	1,0	1,0	1,0	2,0

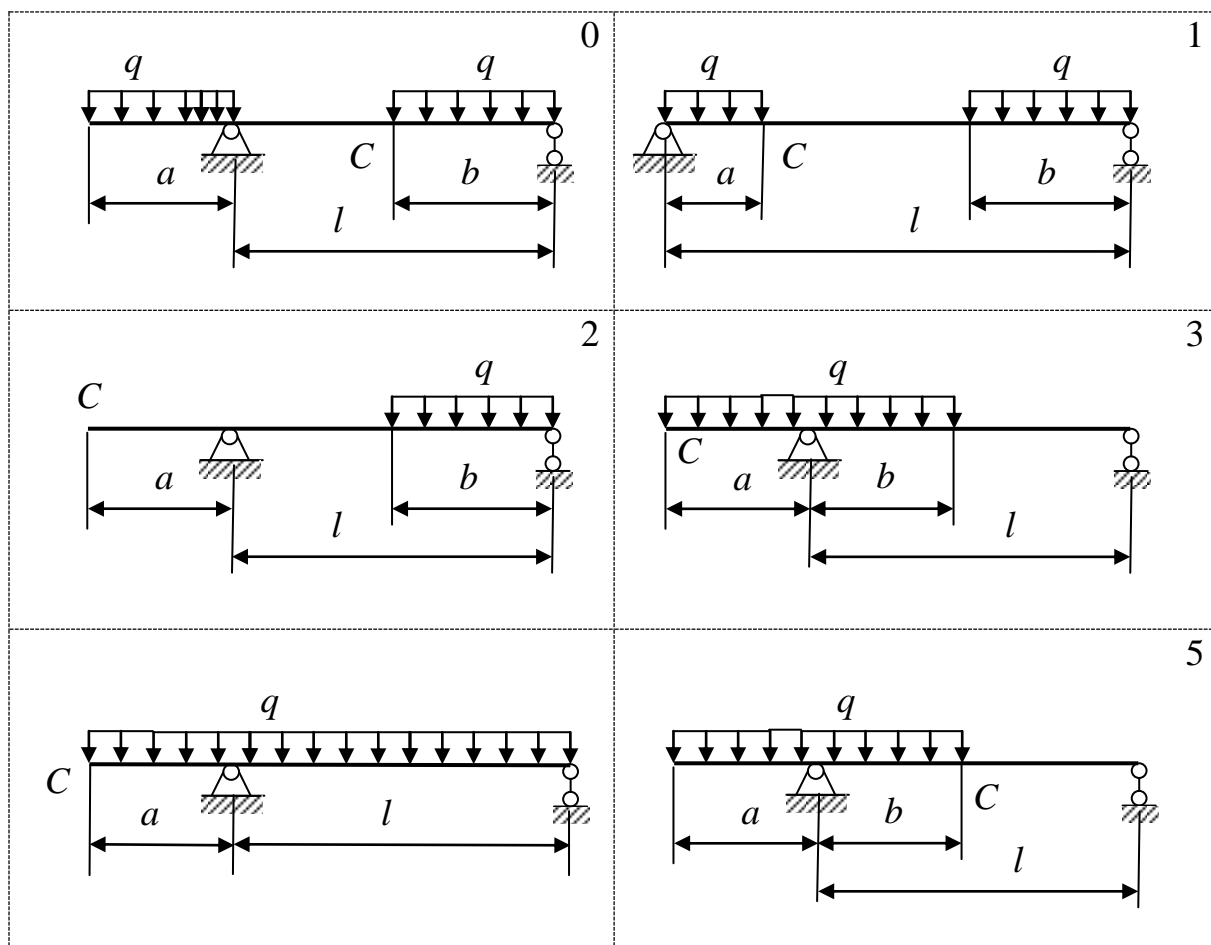
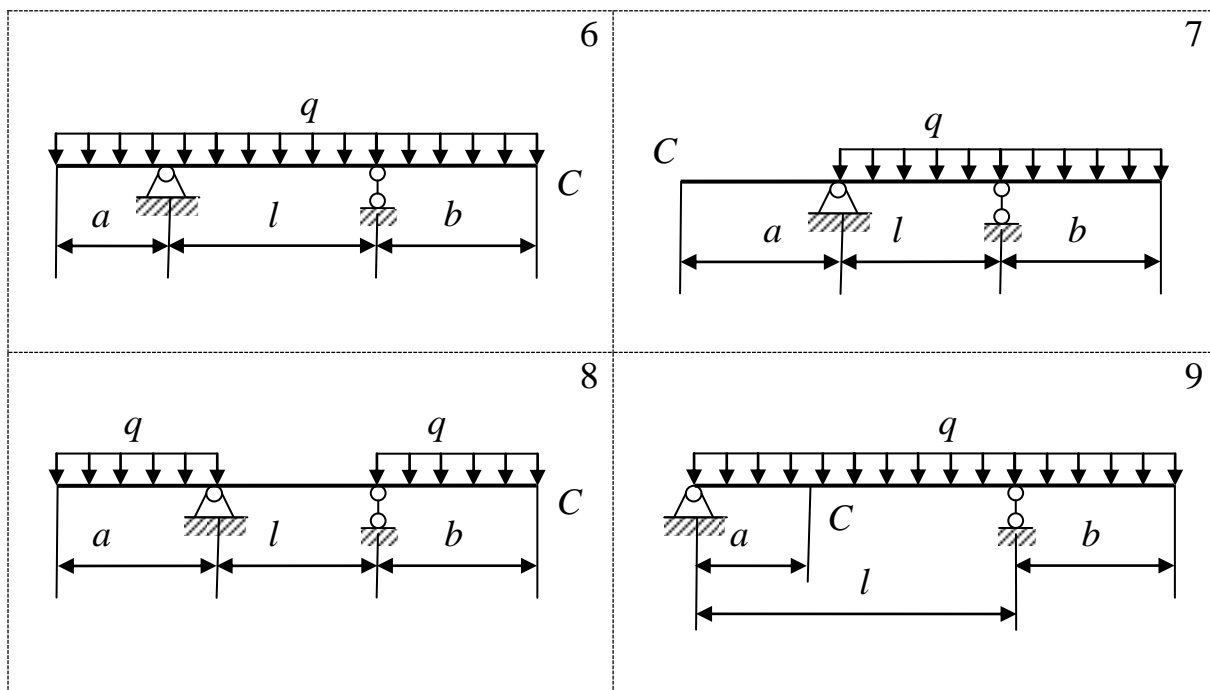


Рисунок 33 – Схема балки к задаче 9.3



Продолжение рисунка 33

Пример расчета двухопорной балки

Определить номер двутавра для двухопорной балки, изображенной на рисунке 34. Материал – сталь **Ст3**.

Решение

Для двухопорной балки в отличие от консоли определение реакций в опорах является обязательным. Составляем два уравнения равновесия в виде сумм моментов относительно опор, тогда в каждом уравнении окажется только по одной неизвестной:

$$\sum m_A = -q \cdot l/2 \cdot l/4 + R_B \cdot l + M = 0;$$

$$\sum m_B = q \cdot l/2 \cdot 3l/4 - R_A \cdot l + M = 0;$$

решая которые, получим: $R_A = +22,5 \text{ кН}$, $R_B = -2,5 \text{ кН}$.

Чтобы убедиться в правильности вычислений, делаем проверку:

$$\sum Y = R_A + R_B - q \cdot l/2 = 22,5 - 2,5 - 10 \cdot 2 = 0.$$

Строим эпюры внутренних силовых факторов M_x и Q .

Участок **I**. Слева. $0 \leq z_1 \leq l/2$ или $0 \leq z_1 \leq 2 \text{ м}$.

Уравнение изгибающего момента

$M_{xI} = R_A \cdot z_1 - q \cdot z_1 \cdot z_1/2 = R_A \cdot z_1 - q z_1^2/2$ – уравнение параболы. Ее значения на границах участка: при $z_1 = 0$ $M_{xI} = 0$; при $z_1 = 2 \text{ м}$ $M_{xI} = 22,5 \cdot 2 - 10 \cdot 2^2/2 = 25 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

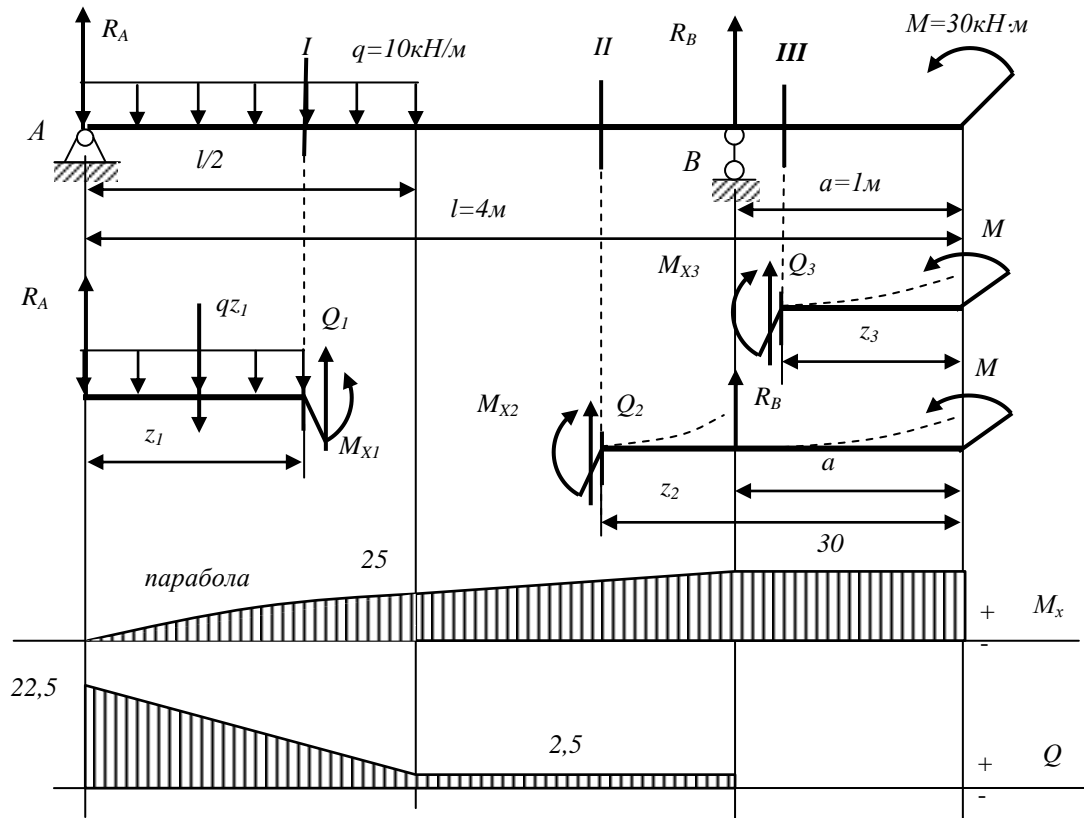


Рисунок 34

Исследуем параболу на экстремум: берем производную, приравниваем к нулю: $dM_X/dz = R_A - qz_1 = 0$, откуда абсцисса экстремума $z = R_A/q = 22,5/10 = 2,25$ м.

Полученное значение z лежит за пределами рассматриваемого участка, поэтому график параболы строим по двум точкам на границах участка в виде плавной кривой без экстремума.

Уравнение поперечной силы

$Q_1 = dM_{X1}/dz = R_A - qz_1$ — уравнение прямой линии, график которой строим по двум точкам на границах участка: при $z_1 = 0$ $Q_1 = R_A = 22,5$ кН; при $z_1 = 2$ м $Q_1 = 22,5 - 10 \cdot 2 = 2,5$ кН.

Участок **III**. Справа. $0 \leq z_3 \leq a$ или $0 \leq z_3 \leq 1$ м.

$M_{X3} = +M = 30$ кН·м = const.

$Q_3 = -dM_{X3}/dz = 0 = \text{const.}$

Участок **II**. Справа. $a \leq z_2 \leq (a + l/2)$ или $1 \text{ м} \leq z_2 \leq 3$ м.

$M_{X2} = M + R_B(z_2 - a)$ — уравнение прямой линии; при $z_2 = 1$ м $M_{X2} = 30$ кН·м; при $z_2 = 3$ м $M_{X2} = 25$ кН·м.

$Q_2 = -dM_{X2}/dz = -R_B = +2,5$ кН = const.

Из эпюр: $|M_X|_{\max} = 30$ кН·м; $|Q|_{\max} = 22,5$ кН.

Из условия прочности по нормальным напряжениям (19)

$$W_x \geq \frac{|M_x|_{\max}}{[\sigma]_{\text{изг}}} = \frac{30 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^6} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 200 \text{ см}^3,$$

где $[\sigma]_{\text{изг}} = 150 \text{ МПа}$ – допускаемые напряжения на изгиб для стали **Ст3**.

По таблице сортамента двутавров (ГОСТ 8239-89) находим ближайшее большее значение момента сопротивления сечения: $W_{\text{табл}} = 203 \text{ см}^3$, что соответствует двутавру №20а.

Проверять стандартный профиль по касательным напряжениям не обязательно.

Приложение Б (справочное)

Таблица Б.1 – Допускаемые напряжения для углеродистых сталей при статической нагрузке

Марка	Допускаемые напряжения, МПа				
стали	растяжение $[\sigma]_p$	изгиб $[\sigma]_{\text{из}}$	кручение $[\tau]_{\text{кр}}$	срез $[\tau]_{\text{ср}}$	смятие $[\sigma]_{\text{см}}$
Ст2	115	140	85	70	175
Ст3	125	150	95	75	190
Ст4	140	170	105	85	210
Ст5	165	200	125	100	250
Ст6	195	230	145	115	290
08	110	130	80	60	165
10	110	145	80	65	165
15	125	150	95	75	185
20	140	170	105	85	210
25	150	180	110	90	220
30	165	200	125	100	240
35	180	210	135	110	270
40	190	230	140	115	280
45	200	240	150	125	300
50	210	250	160	125	310
55	210	250	160	125	310
30Г	180	210	135	110	270
40Г	200	240	150	120	300
50Г	210	260	160	130	320
65Г	240	290	185	145	360

Приложение В (справочное)

Нормальные линейные размеры (по ГОСТ 6636-69) в мм

1,0; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5; 2,6; 2,8; 3,0; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0; 4,2; 4,5; 4,8; 5,0; 5,3; 5,6; 6,0; 6,3; 6,7; 7,1; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 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; 105; 110; 120; 125; 130; 140; 150; 160; 170; 180; 190; 200; 210; 220; 240; 250; 260; 280; 300; 320; 340; 360; 380; 400; 420; 450; 480; 500; 530; 560; 600; 630; 670; 710; 750; 800; 850; 900; 950

Литература

1. Жуков, В.А. Механика. Основы расчёта и проектирования деталей машин: учебное по-сobie / В.А. Жуков, Ю.К. Михайлов. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 349 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-009218-8. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1052199>. – Режим доступа: по подписке. (ЭБС ИНФРА-М)
2. Прикладная механика: учебное пособие / В.Т. Батиенков, В.А. Волосухин, С.И. Евтушенко [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва: РИОР: ИНФРА-М, 2023. – 339 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-369-01660-2. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2079244>. – Режим доступа: по подписке. (ЭБС ИНФРА-М)
3. Механика: учебное пособие / В.И. Батиенков, В.А. Волосухин, С.И. Евтушенко, В.А. Лепихова. – Москва: РИОР: ИНФРА-М, 2020. – 512 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 978-5-369-00757-0. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/1072292>. – Режим доступа: по подписке. (ЭБС ИНФРА-М)
4. Прикладная механика: учебник: в 2 частях. Часть 1. Основы расчета, проектирования и моделирования механизмов / А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов, А.Г. Схиртладзе, Ю.И. Бровкина. – Москва: КУРС: ИНФРА-М, 2024. – 224 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-906818-58-4. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2101422>. – Режим доступа: по подписке. (ЭБС ИНФРА-М)
5. Прикладная механика: учебник: в 2 частях. Часть 2. Основы структурного, кинематического и динамического анализа механизмов / А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов, Ю.И. Бровкина, А.Г. Схиртладзе. – Москва: КУРС: ИНФРА-М, 2024. – 160 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-906818-57-7. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2103171>. – Режим доступа: по подписке. (ЭБС ИНФРА-М)

Составители: Пшенов Евгений Александрович
Тихонкин Игорь Васильевич
Булгаков Сергей Алексеевич

МЕХАНИКА

задания и методические указания для практических занятий

Печатается в авторской редакции
Компьютерная верстка И.В. Тихонкин

Подписано в печать 30 января 2024 г.
Формат 84×108/32. Объем 2,75 уч.-изд. л
Тираж 50 экз. Изд. № . Заказ №

Отпечатано в мини-типографии Инженерного института
630039, г. Новосибирск, ул. Никитина, 147