Кафедра механики

СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

ПОСТРОЕНИЕ ЭПЮР ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ, ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ И ВЫБОР СЕЧЕНИЙ БАЛОК

Методические указания к расчетно-графической работе

УДК 620.10 (075.83)

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ПОСТРОЕНИЕ ЭПЮР ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ, ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ И ВЫБОР СЕЧЕНИЙ БАЛОК: Методические указания к расчетно-графической работе / Санкт-Петербургский горный ин-т. Сост.: *Л.К.Горшков, А.А.Яковлев, Г.Г.Зарецкий-Феоктистов.* СПб, 2004. 33 с.

В методических указаниях изложены правила построения эпюр перерезывающих сил, изгибающих моментов и требования к выбору сечений балок, рассмотрены примеры практического расчета шарнирно опертых и жестко защемленных балок.

Предназначены для студентов горных, шахтостроительных, геологоразведочных, горно-электромеханических и других специальностей.

Табл. 1. Ил. 31. Библиогр.: 2 назв.

Научный редактор проф. *Л.К.Горшков*

ВВЕДЕНИЕ

Учебной программой курсов «Прикладная механика», «Сопротивление материалов» предусматривается изучение методов прочностного расчета балок при изгибе для студентов всех специальностей.

Цель расчетно-графической работы состоит в том, чтобы научить будущих специалистов правильно выбирать конструктивные формы, обеспечить высокие показатели надежности, создавать эффективные и экономичные конструкции.

Задачей расчетно-графической работы является привитие студентам правильного расчета горизонтальных балок при любом сочетании внешних нагрузок и разных видах закрепления концов балки, строить эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов и по полученным данным выбирать рациональные размеры сечений балок.

1. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ЭПЮР ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ

Плоским поперечным называется деформация под действием сил, расположенных в одной из главных плоскостей инерции балки и перпендикулярных к ее продольной оси.

Внешние силы, действующие на балку, вызывают в ее поперечных сечениях нормальные и касательные напряжения. Нормальные напряжения могут быть приведены к паре сил – изгибающему моменту, касательные напряжения можно заменить сосредоточенным усилием, называемым перерезывающей силой. Величина изгибающего момента M в каком-либо сечении балки равна алгебраической сумме моментов всех внешних сил, действующих на балку по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно центра тяжести этого сечения. Величина перерезывающей силы Q в каком-либо сечении балки равна алгебраической сумме проекций на нормаль к продольной оси балки всех внешних сил, действующих по одну сторону от рассматриваемого сечения.

При вычислении Q и M сил принято считать положительными: момент, изгибающий балку выпуклостью вниз независимо от места его приложения, и поперечную силу, направленную вверх, если рассматривается часть балки слева от проведенного сечения, и поперечную силу, направленную вниз, если рассматривается часть балки справа от рассматриваемого сечения.

В общем случае, изгибающий момент и перерезывающая сила меняются по длине балки. Чтобы иметь наглядное представление об изменении этих величин, строят графики, называемые эпюрами перерезывающих сил и изгибающих моментов. Чтобы построить эпюры Q и M, надо составить уравнения этих эпюр на каждом грузовом участке балки, т.е. на отрезке балки, на котором внешняя нагрузка изменяется по некоторому закону. Границами грузовых участков являются сечения, в которых характер вешней нагрузки изменяется.

При построении эпюр перерезывающих сил и изгибающих моментов следует:

1). для упрощения расчета рассматривать часть балки по ту сторону от проведенного сечения, на которую действует меньшее число внешних сил;

2). распределенную нагрузку заменить силой, численно равной площади эпюры этой нагрузки в пределах рассматриваемой части балки и приложенной в центре тяжести этой площади;

3). по определению перерезывающей силы в сечении, в котором приложена сосредоточенная сила, на эпюре Q должен быть скачок на величину этой силы в направлении ее действия;

4). по определению изгибающего момента в сечении, в котором приложен сосредоточенный момент, на эпюре M должен быть скачок на величину этого момента в направлении его действия;

5). Эпюра Q не меняется в точках приложения сосредоточенных моментов.

При построении эпюр Q и M следует руководствоваться дифференциальными зависимостями между Q и M интенсивностью распределенной нагрузки q [1]:

$$Q = \frac{dM}{dx}; \quad q = \frac{dQ}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2},$$

а также следующими положениями, вытекающими из них:

1. На участках балки, где нет распределенной нагрузки ($q=0$) эпюра Q ограничена прямой, параллельной нулевой линии эпюры

(Q=const), а эпюра M – наклонной прямой, тангенс угла наклона которой к нулевой линии равен Q.

2. На грузовых участках балки, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой (q=const), эпюра Q ограничена наклонной прямой, тангенс угла наклона которой к нулевой линии равен q, а эпюра M - квадратичной параболой, направленной своей выпуклостью навстречу действия распределенной нагрузки.

3. В сечении балки, где перерезывающая сила равна нулю (Q=0), изгибающий момент имеет экстремум (максимум или минимум): если Q меняет знак с плюса на минус (при рассмотрении балки слева направо), то $M=max$, если с минуса на плюс, то $M=min$.

4. Если на границе соседних участков балки эпюра Q имеет скачок, то линии, ограничивающие эпюру M на этих участках, сопрягаются с переломом, т.е. не имеют общей касательной в точке сопряжения.

5. Изгибающий момент растет на тех участках балки, где перерезывающая сила положительна, и убывает там, где она отрицательна.

6. На каждом участке балки изменение величины M между любыми двумя сечениями равно площади эпюры Q между этими сечениями.

2. ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭПЮР ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ

Пример 1. Построить эпюры Q и M для балки при P = 20 кН; M_0= 20 кН·м; a = 0,5 м; b = 1,5 м, рис.1, а.

Для определения Q и M в любом сечении балки необходимо задать все внешние силы, действующие на балку, т.е. приложенные нагрузки и опорные реакции.

Величину и направление опорных реакций в статически определимых балках определяют из уравнений статики. Начало координат располагают обычно в центре тяжести крайнего левого сечения, например, в точке A (см. рис.1а), ось Y направляют вертикально вверх, а ось X - горизонтально вправо (по оси балки). На шарнирно-неподвижной опоре A неизвестную по величине и направлению реакцию заменим двумя составляющими: Y_A - вертикальной, перпен-

дикулярной оси балки, и X_A - горизонтальной, направленной по оси X. На шарнирно-подвижной опоре B реакция Y_B направлена перпендикулярно оси балки.

Рис.1

Для плоской системы сил, не пересекающихся в одной точке, можно составить, в общем случае, три уравнения статического равновесия. Уравнения статики составляют так, чтобы в каждое из них входила, как правило, только одна неизвестная опорная реакция. В этой задаче нужно спроектировать все силы на ось стержня и определить алгебраические суммы моментов сил относительно точек закрепления A и B. При составлении уравнений равновесия за положительное направление сил и моментов можно принимать любое, так как сумма проекций сил на любую из осей и сумма моментов всех сил относительно любой точки равны нулю. Обычно применяется следующее правило знаков: положительные направления сил соответствуют направлению координатных осей; положительное на-

правление момента соответствует направлению движения часовой стрелки. Сосредоточенный момент M_0, независимо от положения сечения, в котором он приложен, обязательно входит в уравнение моментов. Таким образом, можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} &\sum X = 0, && X_A = 0; \\ &\sum M_A = 0, && Pa - Y_B(a+b) + M_0 = 0; \\ &\sum M_B = 0, && Y_A(a+b) - Pb + M_0 = 0. \end{aligned}$$

Решив ее при заданных исходных данных, получим Y_A = 5 кН; Y_B = 15 кН. Величины опорных реакций положительны, следовательно, выбранные направления их соответствуют действительным.

Для проверки составим уравнение статики, не использованное при расчете реакций, например, сумму проекций всех сил на ось Y:

$$\sum Y = Y_A - P + Y_B = 5 - 20 + 15 = 0.$$

Уравнение удовлетворяется тождественно, следовательно, реакции определены верно.

Для построения эпюр Q и M необходимо определить перерезывающие силы и изгибающие моменты. Данная балка имеет два грузовых участка границами, которых являются опорные сечения и сечение, где приложена сосредоточенная сила P. Чтобы составить выражения для Q и M, для каждого участка проведем произвольные сечения на расстоянии x от начала координат. За начало координат для каждого участка можно принять точку опоры или начало участка.

В качестве первого участка рассмотрим ту часть балки, на которую действует меньшее число приложенных нагрузок, т.е. часть балки слева от сечения. Выражения для Q и M составляем с учетом принятого правила знаков.

На первом участке абсцисса x изменяется в пределах $0 \le x_1 \le a$. Здесь $Q_1 = Y_A$ = 5 кН. Перерезывающая сила на этом участке не зависит от x, т.е. постоянна по длине участка. Изгибающий момент на первом участке равен $M_1 = Y_A x_1$. При $x_1 = 0$ момент он равен нулю ($M_1 = 0$), а при x_1 = a = 0,5 м - $M_1 = Y_A\, a$ = 2,5 кН·м.

На втором участке абсцисса x изменяется в пределах $a \le x_2 \le (a+b)$*. На этом участке $Q_2 = \text{const}$ и $Q_2 = Y_A - P = -15$ кН. На втором участке уравнение моментов имеет вид: $M_2 = Y_A x_2 - P(x_2 - a)$ при $x_2 = a = 0{,}5$ м – $M_2 = 2{,}5$ кН·м; а при $x_2 = a + b = 2$ м – $M_2 = -20$ кН·м.

Эпюры Q и M строим по составленным аналитическим зависимостям, откладывая в рассмотренных сечениях найденные значения ординат; при этом положительные ординаты откладываются вверх от нулевых линий эпюр, отрицательные – вниз (рис.1,б и в).

Как видно из рис.1, в сечениях балки, где приложены сосредоточенные силы Y_A, P и Y_B, на эпюре Q имеют место скачки на величину этих сил; а в опорном сечении, где приложен сосредоточенный момент M_0, на эпюре M - скачок на величину этого момента. Поскольку на границе участков балки эпюра Q имеет скачок, то линии, ограничивающие эпюру M на этих участках, сопрягаются с переломом.

Пример 2. Построить эпюры Q и M для консольной балки при q=10 кН/м; M_0 = 20 кН·м; l = 2 м (рис.2, а).

Построение эпюр Q и M для консольных балок рекомендуется производить, не вычисляя реакций. Если рассечь балку в любом сечении и рассматривать часть балки между сечением и свободным концом, то в выражения для Q и M войдут только приложенные к балке известные нагрузки.

Балка имеет два грузовых участка длиной $l/2$, левый участок назовем первым, правый - вторым. Начало координат расположим в центре тяжести крайнего левого сечения, ось Y направим вертикально вверх, ось X - вправо. Рассечем балку в пределах каждого грузового участка сечениями, расположенными на расстояниях x_1 и x_2 от начала координат (x_2 можно отсчитывать от точки приложения M_0).

На первом участке x_1 изменяется в пределах $0 \le x_1 \le l/2$. Перерезывающая сила на первом участке: $Q_1 = -qx_1$; где $Q_1 = 0$ при $x = 0$ и $Q_1 = -10$ кН при $x_1 = l/2 = 1$ м.

* Абсцисса x_2 может отчитываться и от границ участка 2 (справа или слева), тогда x_2 будет иметь пределы $0 \le x_2 \le b$.

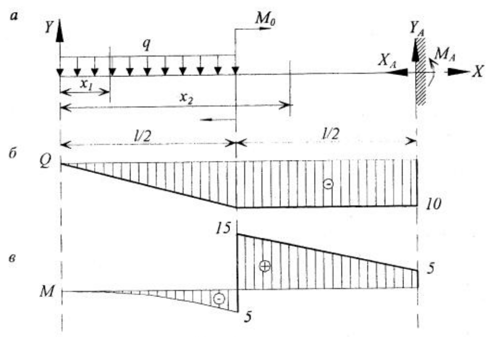

Рис.2

Так как перерезывающая сила зависит от x_1, то изгибающий момент будет зависеть от x_1^2. Для вычисления изгибающего момента заменим равномерно распределенную нагрузку сосредоточенной силой qx_1, численно равной площади эпюры этой нагрузки в пределах рассматриваемой части балки и приложенной в центре тяжести площади эпюры, т.е. на расстоянии $x_1/2$ от рассматриваемого сечения.

В соответствии с принятым выше правилом знаков изгибающий момент на первом участке: $M_1 = -q x_1^2/2$, т.е. закон изменения изгибающего момента на первом участке есть кривая второго порядка; $M_1 = 0$ при $x_1 = 0$ и $M_1 = -5$ кН·м при $x_1 = l/2 = 1$ м. При построении эпюры M на первом участке следует иметь в виду, что выпуклость параболы должна быть направлена навстречу действию распределенной нагрузки.

На втором участке абсцисса x_2 изменяется в пределах $l/2 \le x_2 \le l$. Здесь перерезывающая сила: $Q_2 = -q\,l/2 = -10$ кН. Изги-

бающий момент на втором участке равен алгебраической сумме момента распределенной нагрузки относительно центра тяжести любого сечения, проведенного в пределах этого участка, и сосредоточенного момента. Момент распределенной нагрузки равен равнодействующей этой нагрузки $q \cdot l/2$, умноженной на расстояние от точки ее приложения до центра тяжести проведенного сечения $x_2 - l/4$. Следовательно, на втором участке: $M_2 = -ql(x_2 - l/4) + M_0$, при $x_2 = l/2$ – $M_2 = 15$ кН·м; а при $x_2 = l$ – $M_2 = 5$ кН·м.

Для проверки правильности построения эпюр Q и M (см. рис.2, б и в) используем изложенные выше правила построения эпюр. Площади эпюр Q на каждом из грузовых участков должны быть равны разности моментов в граничных сечениях этих участков. На первом участке площадь эпюры Q равна 5 кН·м, разность моментов в граничных сечениях этого участка также равна 5 кН·м. На втором участке площадь эпюры Q равна 10 кН·м, что равно разности моментов на границах этого участка. Следовательно, построение эпюр удовлетворяет указанному правилу. В сечении, где приложен сосредоточенный момент, на эпюре M виден скачок, равный величине этого момента в направлении его действия.

Пример 3. Построить эпюры Q и M для балки с промежуточным шарниром в пролете при $P_1 = 20$ кН; $M_0 = 20$ кН·м; $q = 10$ кН/м; $l = 4$ м, рис.3, а.

Для построения эпюр необходимо определить четыре опорные реакции X_A, Y_A, M_A и Y_B. Статика позволяет написать только три уравнения равновесия. В данном случае опорные реакции можно определить двумя способами.

<u>Вариант 1</u>: Четвертое уравнение, необходимое для определения реакций, составим из условия, что шарнир C по свойству конструкции не может передать момента, так как не препятствует повороту одной части балки AC относительно другой CB. Следовательно, сумма моментов относительно точки C сил, приложенных слева или справа от шарнира, равняется нулю.

Составим уравнения статики и дополнительное уравнение:

$$\sum X = 0,\ X_A = 0;$$

$$\sum M_A = 0,\ -M_A + Y_A l - P_1 \frac{3l}{4} - \frac{ql}{2}\frac{l}{4} + M_0 = 0;$$

$$\sum M_C^{слева} = 0,\ -M_A + Y_A \frac{l}{4} = 0.$$

Рис.3

Последнее уравнение получено приравниванием к нулю суммы моментов относительно шарнира (точки C) внешних сил, расположенных слева от шарнира. Решив эту систему уравнений, получим значения опорных реакций: $X_A = 0$; $Y_A = 20$ кН; $Y_B = 20$ кН; $M_A = 20$ кН·м. Проверка:

$$\sum Y = 0; \qquad Y_A - P_1 - q\frac{l}{2} + Y_B = 20 - 20 - 10 \cdot 2 + 20 = 0.$$

Вариант 2: Опорные реакции, действующие на балку AB, определяем, расчленив эту балку на участки AC и BC (см. рис.4, б). Балка BC опирается в точке C шарнирно на свободный конец балки AC, другой конец которой заделан, а в точке B – на шарнирно-подвижную опору. Поэтому всю балку AB можно рассматривать как комбинацию из двух балок. При этом балка AC, которая может работать самостоятельно, без балки CB, называется основной: балка CB, которая не может работать самостоятельно, называется вспомогательной или подвесной.

Подвесная балка BC воспринимает в шарнире C реакцию Y_C от свободного конца балки AC, давит на этот конец с такой же, но противоположно направленной силой Y_C. Рассматривая сначала равновесие подвесной балки BC, найдем ее опорные реакции с помощью уравнений статики:

$$\Sigma X = 0, \qquad X_C = 0;$$

$$\Sigma M_B = 0, \qquad Y_C \frac{3l}{4} - P_1 \frac{3l}{4} - \frac{ql}{2}\frac{l}{4} + M_0 = 0;$$

$$\Sigma M_C = 0, \qquad \frac{ql}{2}\frac{l}{2} + M_0 - Y_B \frac{3l}{4} = 0$$

Решив эти уравнения, получим Y_B=20 кН и Y_C=20 кН. Затем прикладываем известную силу Y_C к свободному концу балки АС. Составив уравнения статики для балки АС, найдем реакции M_A и Y_A:

$$\Sigma X = 0, \qquad X_A = 0;$$

$$\Sigma Y = 0, \qquad Y_A - Y_C = 0, \qquad Y_A = Y_C = 20\text{кН};$$

$$\Sigma M_A = 0, \qquad -M_A + Y_C \frac{l}{4} = 0, \qquad M_A = Y_C \frac{l}{4} = 20\text{кН·м}.$$

Значения реакций те же, что и при первом варианте. В данном решении сила P_1 была учтена при подсчете реакции Y_C, действующей на подвесную балку. Можно было бы поступить и иначе: реакцию Y_C определить без учета силы P_1, а свободный конец основной балки нагрузить силами P_1 и Y_C.

Теперь определим поперечные силы и изгибающие моменты. При составлении выражений для Q и M балка AB рассматривается как единое целое (без учета шарнира). Балка имеет четыре грузовых участка, которые пронумеруем слева направо. Важно помнить, что шарнир C является точкой раздела участков только в том случае, если в нем приложена внешняя нагрузка, как в нашем случае.

Для составления уравнений перерезывающей силы и изгибающего момента, как и в предыдущих случаях, проведем произвольные сечения в пределах каждого участка. При этом для первого и второго участков абсциссу x будем отсчитывать от опоры А, для третьего и четвертого – от опоры В. Для удобства все вычисления сведем в следующую таблицу:

№ п/п	x, м	Формула для Q	Q, кН	Формула для M	M, кН·м
1	0; 1	$Q_1 = Y_A$	20	$M_1 = -M_A + Y_A x_1$	-20: 0
2	1; 2	$Q_2 = Y_A - P_1$	0	$M_2 = -M_A + Y_A x_2 -$ $-P_1 (x_2 - 1)$	0
3	1; 2	$Q_3 = -Y_B + qx_3$	-10; 0	$M_3 = Y_B x_3 - \frac{qx_3^2}{2} -$ $-M_0$	-5; 0
4	0; 1	$Q_4 = -Y_B - qx_4$	-20; -10	$M_4 = Y_B x_4 - \frac{qx_4^2}{2}$	0; 15

По полученным значениям перерезывающей силы и изгибающего момента построим их эпюры (см. рис3, в и г).

3. ПОДБОР ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ БАЛОК ПО НОРМАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Условие прочности при изгибе по нормальным напряжениям

$$\sigma_{\max} = M_{\max} z_{\max} / I_y \le [\sigma],$$

где $M_{\max}$ - максимальный изгибающий момент, определенный по эпюре (момент в опасном сечении балки); $z_{\max}$ - расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленного волокна; I_y - момент инерции сечения относительно нейтральной оси.

Для сечений, симметричных относительно нейтральной оси, условие прочности имеет вид

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / W_y \le [\sigma],$$

где W_y - момент сопротивления сечения относительно нейтральной оси, $W_y = I_y / z_{\max}$.

Из условия прочности можно определить необходимый момент сопротивления

$$W_y = M_{\max} / [\sigma].$$

При заданной форме поперечного сечения, зная W_y, можно установить необходимые размеры сечения.

Для балок, изготовленных из пластичного материала, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию: $[\sigma]_{сж} = [\sigma]_p = [\sigma]$.

Если балка изготовлена из хрупкого материала, различно сопротивляющегося растяжению и сжатию, то необходимая величина W_y определяется из условий прочности для наиболее растянутого и наиболее сжатого волокон

$$W_y' = M_{\max} / [\sigma]_p; \qquad W_y'' = M_{\max} / [\sigma]_{сж}.$$

Из двух найденных значений момента сопротивления для определения размеров поперечного сечения выбирается максимальное.

Пример 4. Подобрать диаметр деревянной балки круглого сечения, изображенной на рис.1, а. Для инженерных расчетов можно считать, что дерево одинаково сопротивляется растяжению и сжатию, т.е. $[\sigma]$ =10 МПа.

Абсолютная величина максимального изгибающего момента равна 20 кН·м (см. рис.1, в). Тогда необходимый момент сопротивления

$$W_y = 20 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^6) = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3.$$

Момент сопротивления круглого поперечного сечения относительно центральной оси равен $W_y = \pi \cdot d^3 / 32$, тогда необходимый диаметр балки: $d = \sqrt[3]{32 W_y / \pi} = \sqrt[3]{32 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / \pi}$ =0,28 м.

Пример 5. Подобрать размеры стальной балки прямоугольного поперечного сечения с отношением высоты к ширине балки $h/b = 2$. Расчетная схема балки, а также эпюры Q и M приведены на рис.2; . $[\sigma]$ =160 МПа.

Абсолютная величина максимального изгибающего момента M_{max} = 15 кН·м. Необходимая величина момента сопротивления $W_y = 15 \cdot 10^3 / (160 \cdot 10^6) = 0{,}94 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3$. Момент сопротивления прямоугольника относительно нейтральной оси $W_y = bh^2/6 = h^3/12$, откуда размеры сечения балки $h = \sqrt[3]{12 W_y} = \sqrt[3]{12 \cdot 0{,}94 \cdot 10^{-4}} = 0{,}104$ м, $b = h/2 = 0{,}052$ м.

Пример 6. Двутавровая стальная балка нагружена так, как показано на рис.3а; $[\sigma]$ =160 МПа. Подобрать номер двутавра.

Из рис.3г видно, что M_{max} =20 кН·м. Необходимая величина момента сопротивления: $W_y = 20 \cdot 10^3 / (160 \cdot 10^6) = 0{,}125 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3$.

По сортаменту прокатной стали [2] выбираем двутавровый профиль, у которого величина момента сопротивления близка к требуемой. Таких профилей два: № 18 с моментом сопротивления несколько больше требуемого ($W_y = 143 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^3$) и № 16 с моментом сопротивления, несколько меньшим ($W_y = 109 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^3$).

Максимальные напряжения в двутавровой балке № 18

$$\sigma_{\max} = 20 \cdot 10^3 / (143 \cdot 10^{-6}) = 140\ \text{МПа} < 160\ \text{МПа}$$

Недонапряжение составляет (160 – 140)/(160·100) = 12,5%.

Можно выбрать двутавр с моментом сопротивления меньшим, чем требуется, при условии, если перенапряжение в нем не превышает 5%. В нашем случае для двутавровой балки № 16: $\sigma_{\max}$ = $20 \cdot 10^3 / (109 \cdot 10^{-6})$ = 183,5 МПа. Перенапряжение материала составляет (183,5 – 160)/(160·100) = 14,7%, что не допустимо. Окончательно выбираем двутавр № 18.

ПРИЛОЖЕНИЕ

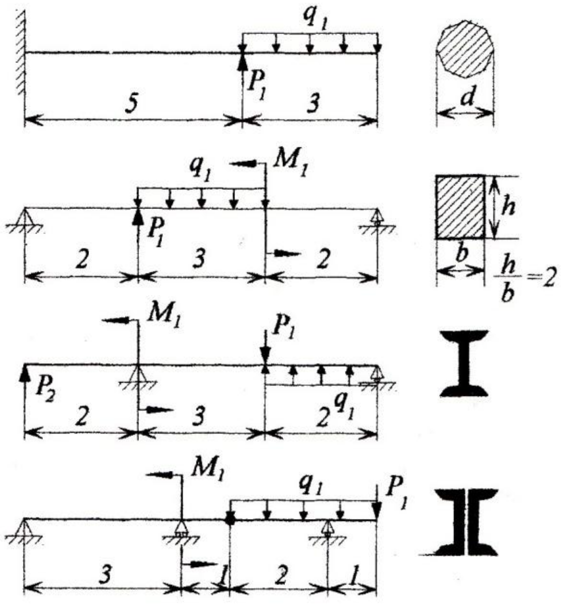

Рис. 4

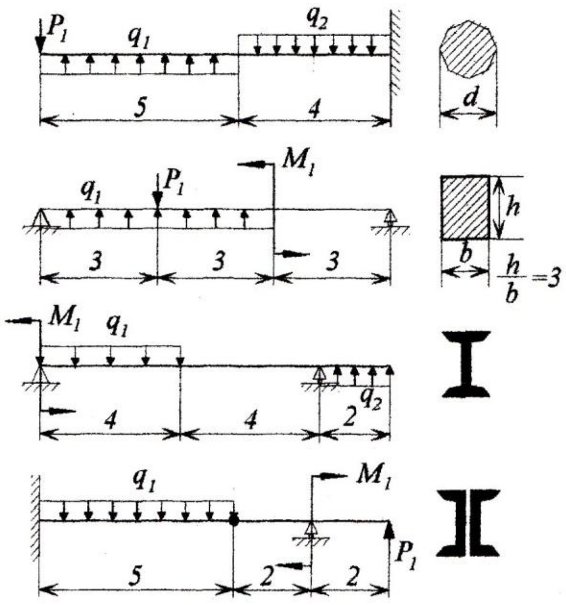

Рис. 5

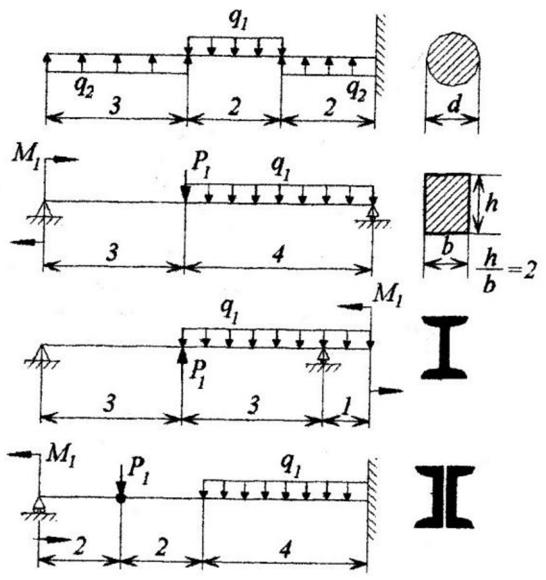

Рис. 6

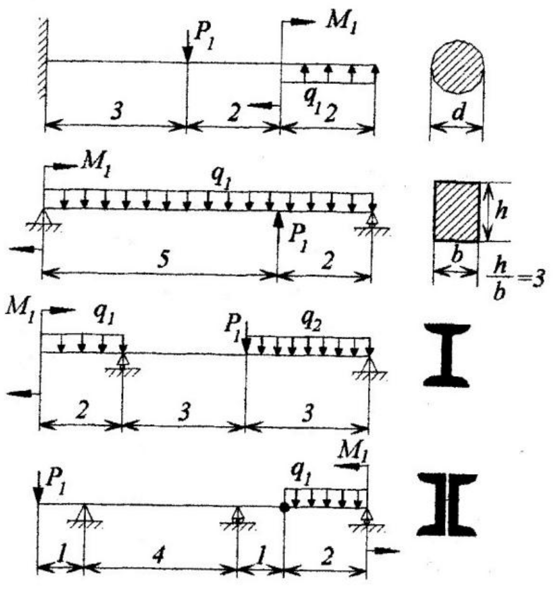

Рис. 7

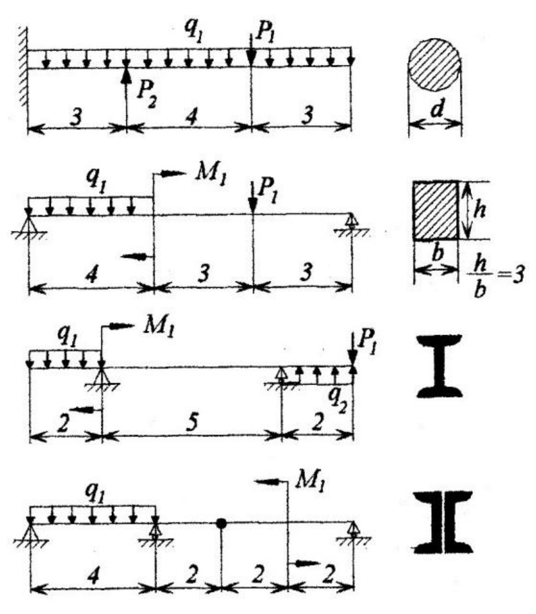

Рис. 8

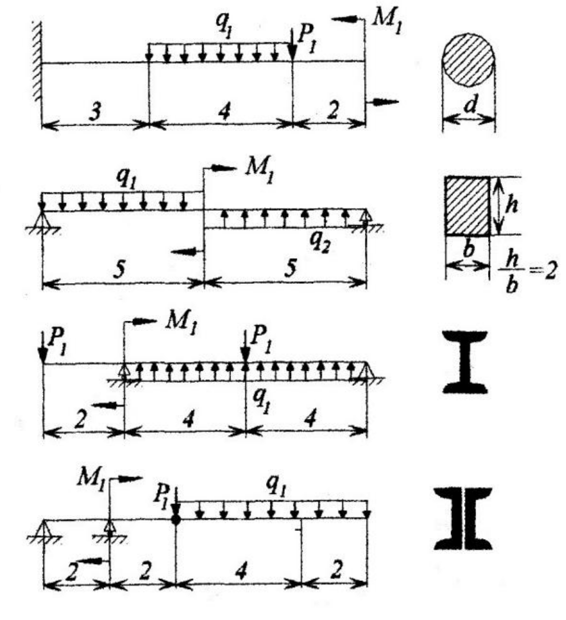

Рис. 9

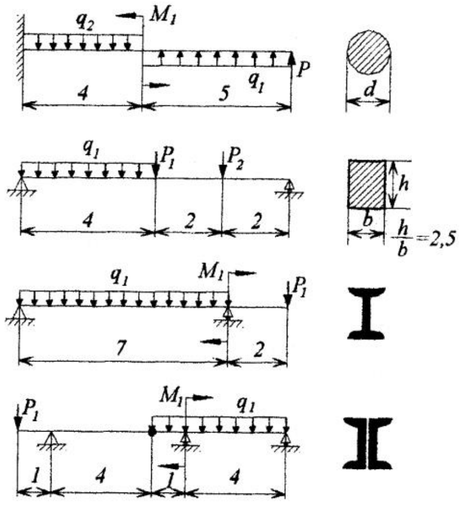

Рис. 10

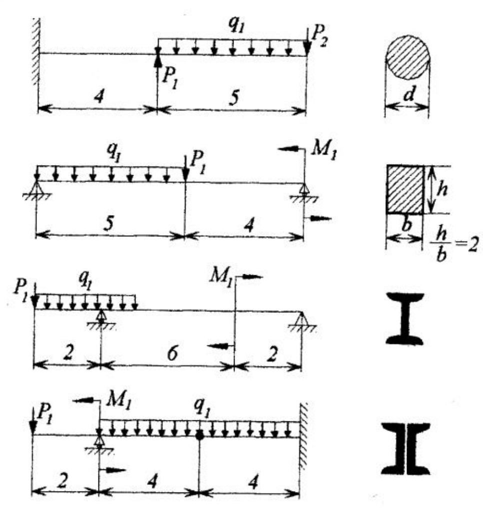

Рис. 11

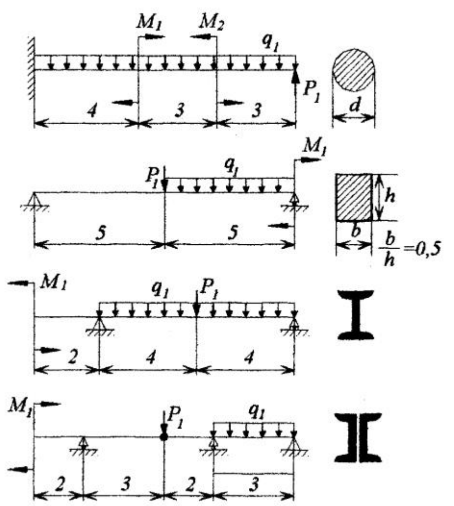

Рис. 12

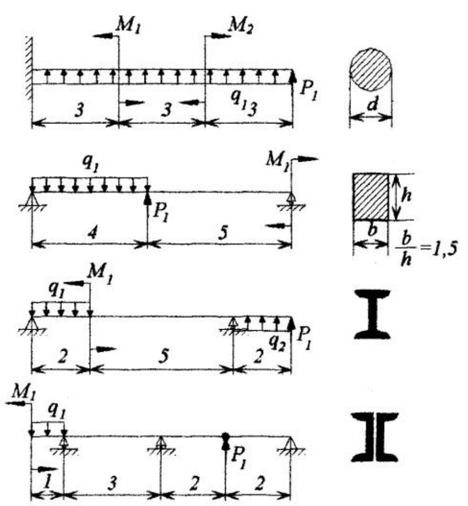

Рис. 13

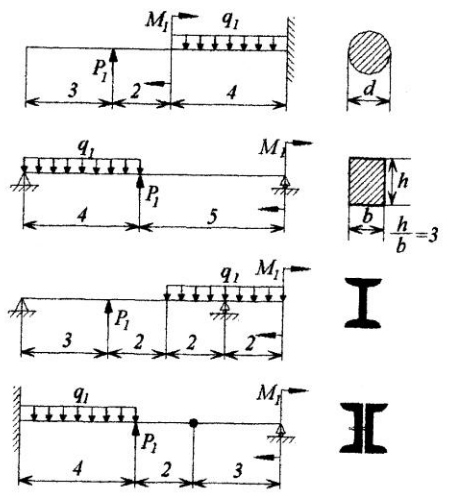

Рис. 14

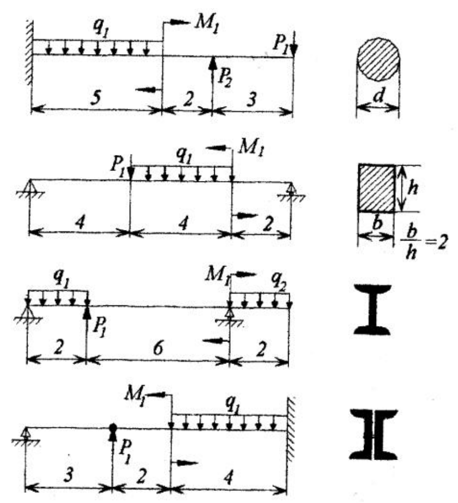

Рис. 15

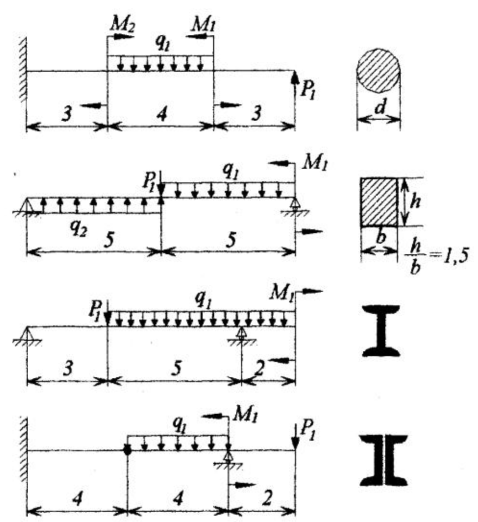

Рис. 16

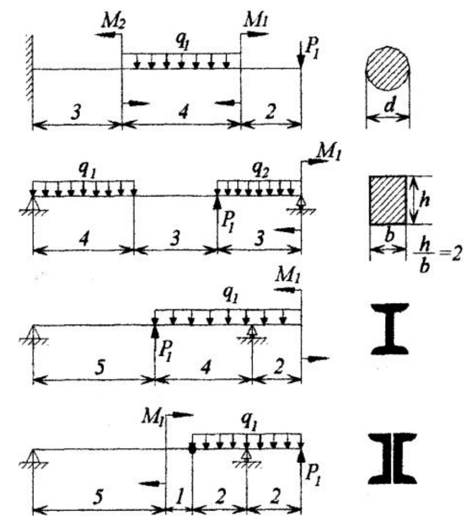

Рис. 17

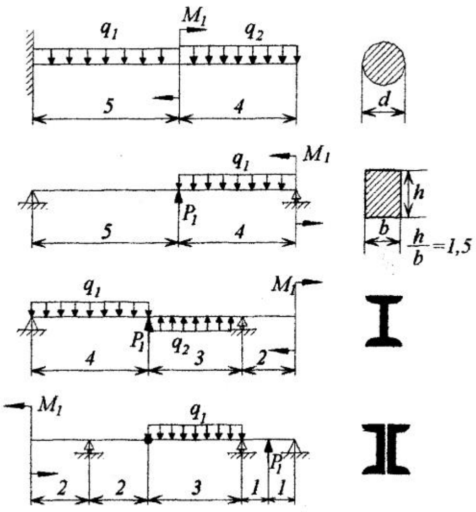

Рис. 18

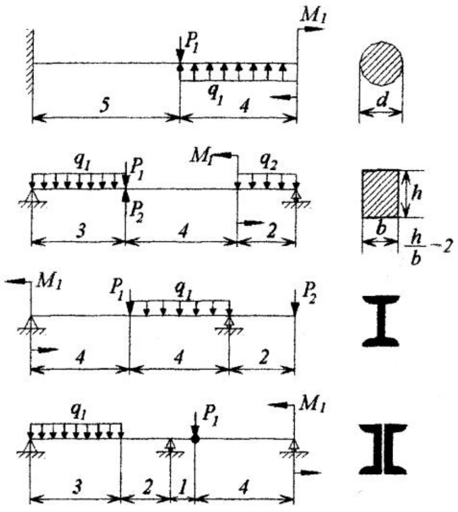

Рис. 19

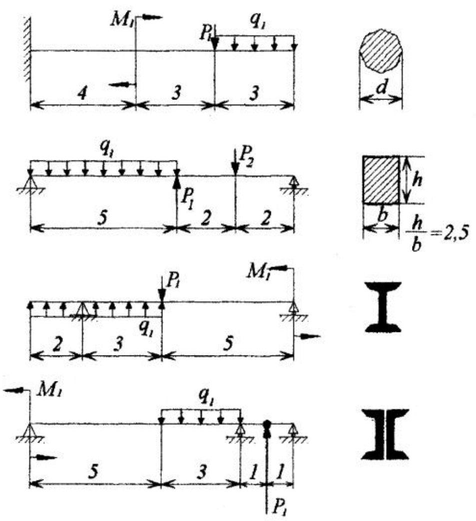

Рис. 20

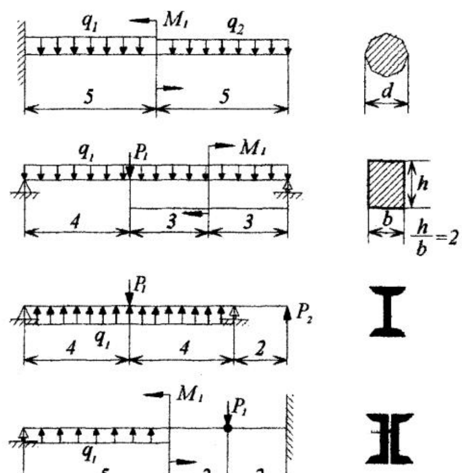

Рис. 21

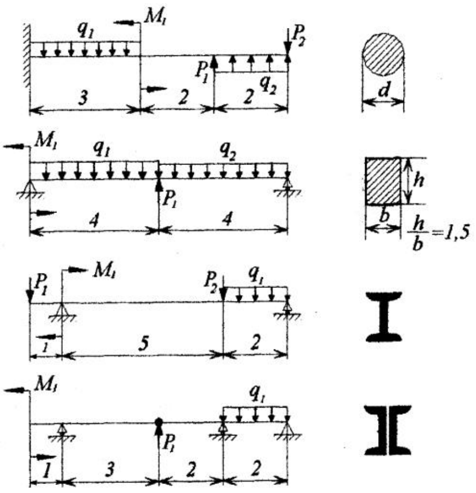

Рис. 22

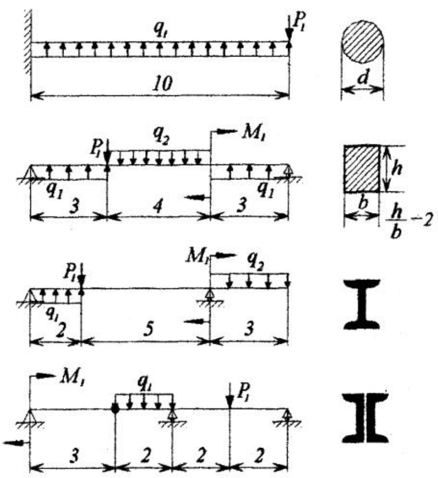

Рис. 23

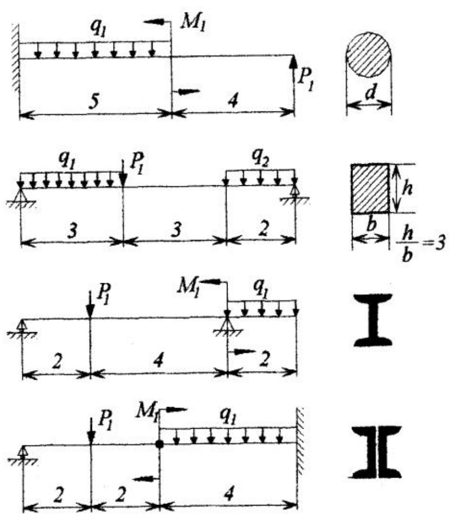

Рис. 24

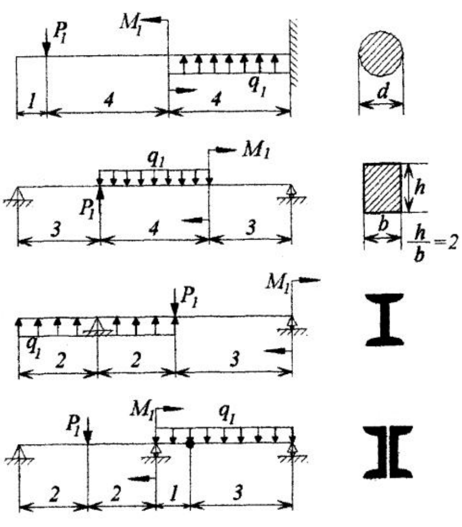

Рис. 25

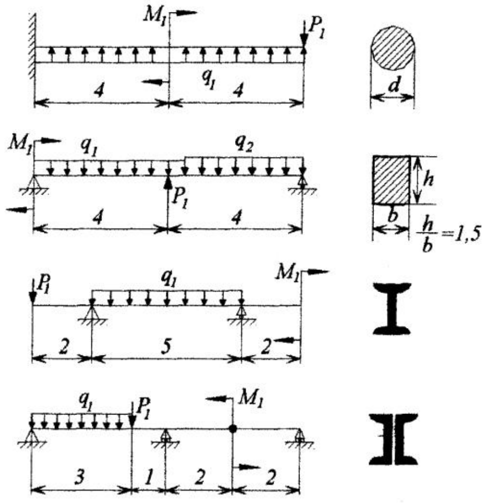

Рис. 26

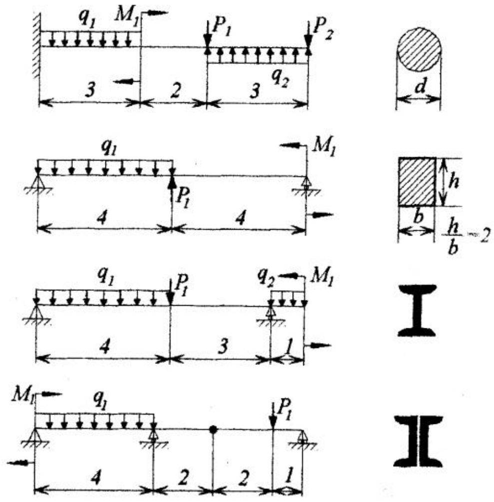

Рис. 27

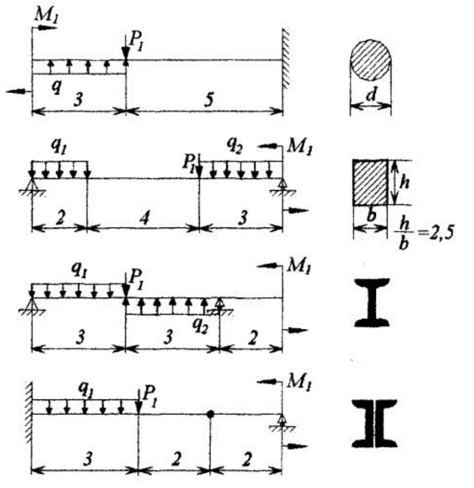

Рис. 28

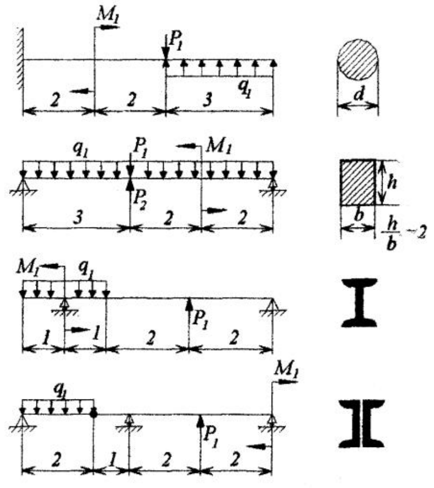

Рис. 29

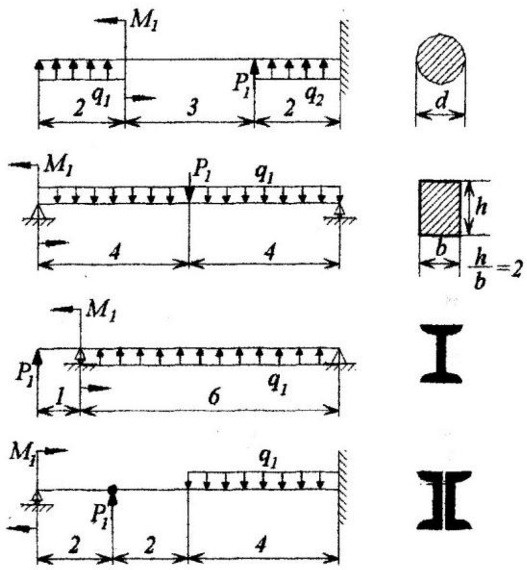
M1
q1
P1
q2
2
3
2
d
M1
P1
q1
4
4
h
b
h/b = 2
M1
P1
1
6
q1
M1
q1
P1
2
2
4

Рис. 30

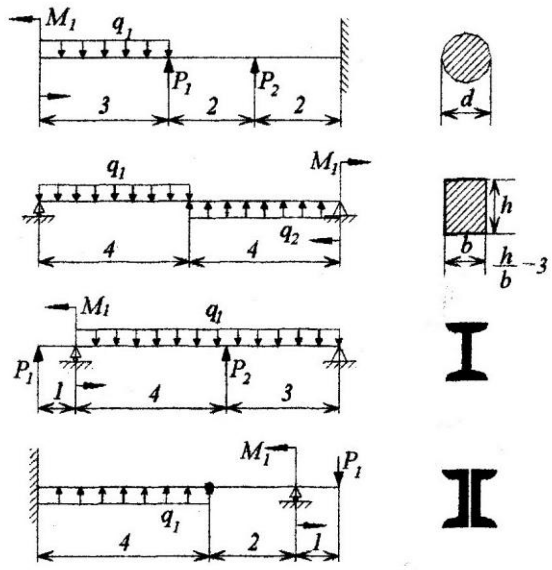
M1
q1
P1
P2
3
2
2
d
q1
M1
q2
4
4
h
b
h/b = 3
M1
q1
P1
P2
1
4
3
M1
P1
q1
4
2
1

Рис. 31

Таблица 3.1

Варианты контрольного задания

Вариант	Номер рисунка	q_1, кН/м	q_2, кН/м	P_1, кН	P_2, кН	M_1, кН·м	M_2, кН·м
1	4	5	-	10	-	20	-
2	5	10	5	5	-	30	-
3	6	15	20	15	-	25	-
4	7	10	5	20	-	15	-
5	8	5	15	10	20	20	-
6	9	5	10	15	-	25	-
7	10	10	5	5	15	10	-
8	11	15	-	10	20	15	-
9	12	5	-	5	-	30	20
10	13	5	15	15	-	20	30
11	14	10	-	20	-	25	-
12	15	15	5	10	5	20	-
13	16	5	10	5	-	15	20
14	17	10	5	15	-	25	20
15	18	10	15	20	-	30	-
16	19	5	10	20	15	35	-
17	20	5	-	10	20	40	-
18	21	5	10	10	20	30	-
19	22	10	15	5	10	20	-
20	23	15	5	15	-	25	-
21	24	10	5	5	-	35	-
22	25	5	-	10	-	30	-
23	26	15	10	15	-	40	-
24	27	10	5	20	15	45	-
25	28	5	15	10	-	40	-
26	29	5	-	5	20	30	-
27	30	10	5	15	-	35	-
28	31	15	10	20	15	25	-
29	4	5*	-	10	-	20*	-
30	5	10*	5*	5	-	30*	-