

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
по изучению тем курса и контрольные задания
для студентов строительных специальностей
заочной формы обучения

Учебное электронное издание

Минск ◊ БНТУ ◊ 2008

УДК: 539.316

Авторы:

*П.В. Шишлаков, А.Е. Кончиц, С.Е. Кравченко,
С.И. Зиневич, М.В. Югова*

Рецензенты:

М.Т. Насковец, заведующий кафедрой «Транспорт леса» БГТУ, кандидат
технических наук, доцент;

Л.Р. Мытько, заведующий кафедрой «Проектирование дорог» БНТУ,
кандидат технических наук, доцент

В пособии даны методические указания к изучению тем курса «Соппротивление материалов», приведён список рекомендуемой литературы и задания к контрольным работам для студентов заочной формы обучения факультетов строительных специальностей.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-67-85 факс (017) 292-71-53
E-mail: CMiTY-FTK@tut.by
Регистрационный № БНТУ/ФТК75 – 1.2008

© БНТУ, 2008

© П. В. Шишлаков, А. Е. Кончиц, С. Е. Кравченко,
С. И. Зиневич, М. В. Югова, 2008

© Е. А. Безносик, компьютерный дизайн, 2008

Содержание

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ КУРСА..... | 4 |
| ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ | 4 |
| ТЕМА 2. РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ..... | 5 |
| ТЕМА 3. СДВИГ | 6 |
| ТЕМА 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ..... | 7 |
| ТЕМА 5. КРУЧЕНИЕ..... | 9 |
| ТЕМА 6. ИЗГИБ | 9 |
| ТЕМА 7. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ..... | 11 |
| ТЕМА 8. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ БАЛКИ..... | 12 |
| ТЕМА 9. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ..... | 14 |
| ТЕМА 10. УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ..... | 16 |
| ТЕМА 11. ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ НАГРУЗКИ..... | 17 |
| УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ..... | 18 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ | 20 |
| ЗАДАЧА 1 | 20 |
| ЗАДАЧА 2 | 21 |
| ЗАДАЧА 3 | 24 |
| ЗАДАЧА 4 | 25 |
| ЗАДАЧА 5 | 28 |
| ЗАДАЧА 6 | 31 |
| ЗАДАЧА 7 | 32 |
| ЗАДАЧА 8 | 34 |
| ЗАДАЧА 9 | 37 |
| ЗАДАЧА 10..... | 38 |
| ЗАДАЧА 11..... | 41 |
| ЗАДАЧА 12..... | 43 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 45 |

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление материалов – наука о прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций, сооружений и деталей машин.

Инженеру любой специальности часто приходится проводить расчеты на прочность. Неправильный расчет любой незначительный, на первый взгляд, детали может привести к разрушению всей конструкции. При проведении расчетов следует стремиться к сочетанию надежности работы конструкции и ее долговечности со стоимостью, добиваться наибольшей прочности при минимальном расходе материала.

Изучение курса «Сопротивление материалов» следует сопровождать составлением конспекта и решением задач. Если при решении задач возникают затруднения, следует воспользоваться имеющимися в литературе указаниями к решению, ознакомиться с решениями подобных задач. Совершенно необходимо научиться решать задачи самостоятельно. Следует также научиться делать выводы формул. При этом необходимо обращать внимание на физическую сущность явлений и на допущения и ограничения, которые приняты при выводе формул. Необходимо хорошо разбираться в чертежах и схемах, которые сопровождают выводы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ КУРСА

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Литература: [1, гл.1]; [2, гл.1]

В этой теме даны основные понятия, которые необходимо хорошо усвоить. Особое внимание необходимо обратить на понятия напряжений и деформаций. Для определения внутренних усилий используется метод сечений. Сущность его заключается в том, что элемент конструкции, находящийся под действием сил в равновесии, мысленно рассекается на две части, отбрасывается одна из частей и ее действие заменяется внутренними силами. Составив уравнения равновесия для оставшейся части, определяют внутренние силы.

Следует обратить внимание на выбор основной системы при расчете элемента конструкции. От правильности выбора основной системы зависит верность расчета элемента конструкции.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем сущность метода сечений?
2. Какие внутренние силы возникают в сечении бруса?
3. Что называется напряжением в сечении?
4. Какие напряжения называются нормальными и касательными?
5. Какие деформации называются остаточными и пластическими?

ТЕМА 2. РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

Литература: [1, гл.2]; [2, гл.2]

При изучении данной темы следует обратить внимание на способы определения в поперечных сечениях продольных сил, напряжений и перемещений не только от внешних сил, но и от действия собственного веса элементов конструкций.

При изучении раздела «Механические характеристики материалов» обратите внимание на то, что предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести и предел прочности получают путем деления соответствующей нагрузки на первоначальную площадь поперечного сечения. В связи с этим получают условные напряжения. Для вычисления истинных напряжений необходимо учитывать изменения площади сечения в процессе растяжения образца и делить соответствующие нагрузки на действительную площадь сечения.

Пользуясь формулами, полученными на основании закона Гука, следует помнить, что они справедливы только до предела пропорциональности.

Расчет элементов строительных конструкций ведется по предельным состояниям. Необходимо знать, как определяется расчетное сопротивление для различных материалов.

При решении статически неопределимых задач обратите внимание на то, что усилия в стержнях статически неопределимых систем зависят не только от внешних нагрузок, но и от соотношения жесткостей стержней, образующих систему.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как строится диаграмма напряжений?
2. Что называется пределом пропорциональности, пределом текучести, пределом прочности?
3. Как получается расчетное сопротивление для пластичных и хрупких материалов?
4. Как формулируется условие прочности?
5. По каким формулам определяется продольная деформация от нагрузок и от собственного веса?
6. Как записывается закон Гука?
7. Что такое модуль упругости материала?
8. Что называется коэффициентом поперечной деформации и в каких пределах он изменяется?
9. Какие задачи называются статически неопределимыми?
10. Каков план решения статически неопределимых задач?

ТЕМА 3. СДВИГ

Литература: [1, гл.6]; [2, гл.4]

Касательные напряжения по двум взаимно перпендикулярным площадкам выделенного элемента всегда равны между собой и направлены навстречу друг другу или друг от друга. Это закон парности касательных напряжений. Под действием касательных напряжений элемент, имеющий форму квадрата, превращается в ромб и диагонали квадрата меняют линейные размеры. Таким образом, явления растяжения, сжатия и сдвига связаны между собой.

Формула закона Гука при сдвиге ($\tau = G\gamma$) аналогична закону Гука при растяжении и сжатии ($\sigma = \epsilon E$).

Следует обратить внимание, что расчеты заклепок, врубок являются условными и что деформация среза зачастую осложнена наличием других видов деформаций.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называется абсолютным и относительным сдвигом?
2. Как формулируется закон Гука при сдвиге?
3. Как определяется модуль сдвига?
4. Как находится условная площадь смятия заклепки?
5. По какому сечению проверяются листы на разрыв в заклепочном соединении?

ТЕМА 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

Литература: [1, гл.7]; [2, гл.6]

Перед изучением этой темы желательно просмотреть материал из учебников по теоретической механике о статических моментах площадей и о нахождении центра тяжести сложной фигуры.

Необходимо уметь вычислять и запомнить величины моментов инерции простых фигур (прямоугольник, круг, треугольник) относительно центральных осей. Нужно знать, что теорема о параллельном переносе осей ($J_{x1} = J_x + m^2A$) справедлива только в том случае, если ось X проходит через центр тяжести фигуры. Если, например, известен момент инерции треугольника относительно оси, проходящей через основание, то нельзя при помощи этой формулы найти момент инерции относительно оси, проходящей через вершину этого треугольника. Для этого необходимо вычислить момент инерции относительно центральной оси и затем относительно оси, проходящей через вершину треугольника. Формула параллельного переноса наглядно показывает, что наименьшим из моментов инерции фигуры относительно нескольких параллельных осей будет момент инерции относительно центральных осей.

Следует помнить, что осевые моменты инерции всегда положительны, центробежный момент инерции фигуры может быть положительным, отрицательным и равным нулю.

В инженерных расчетах очень важную роль играют моменты инерции относительно главных центральных осей. Оси, относительно которых центробежный момент инерции равен нулю, называются главными.

Следует помнить, что через любую точку плоской фигуры можно провести две взаимно перпендикулярные главные оси, но в расчетных формулах должны фигурировать моменты инерции относительно главных центральных осей.

Для несимметричных фигур они вычисляются по следующим схемам:

- сложную фигуру расчленяют на простые и через центр тяжести каждой простой проводят случайные оси;
- вычисляют статические моменты простых фигур относительно двух взаимно перпендикулярных произвольных осей;
- вычисляют положение центра тяжести всей фигуры;
- проводят через центр тяжести всего сечения оси, параллельные случайно выбранным осям, и вычисляют при помощи теоремы о параллельном переносе осей центробежный и осевые моменты инерции;
- находят положение главных центральных осей;
- вычисляют моменты инерции относительно главных центральных осей.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По каким формулам находят положение центра тяжести сложной фигуры?
2. Какие оси называются главными центральными?
3. Для каких фигур можно установить без вычислений положение главных центральных осей?
4. Для каких осей плоской фигуры моменты инерции имеют наибольшее и наименьшее значение?
5. По каким формулам находят осевые и центробежные моменты инерции плоской фигуры относительно осей параллельных центральным?

ТЕМА 5. КРУЧЕНИЕ

Литература: [1, гл.8]; [2, гл.7]

При изучении этой темы следует научиться строить эпюры крутящих моментов, которые показывают изменение крутящих моментов по длине вала.

При выводе формулы касательного напряжения обратите внимание на принятые гипотезы. Касательные напряжения в сечении вала не постоянны, а изменяются по линейному закону – от нуля в центре до максимума на поверхности вала. В связи с этим и возникла мысль о замене сплошного вала полым с целью экономии материала.

Стержни при кручении рассчитываются на прочность и жесткость. Следует запомнить формулы условий прочности и жесткости.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По какой формуле можно определить касательное напряжение в любой точке скручиваемого стержня?
2. Чему равны полярные моменты инерции и сопротивление стержня круглого поперечного сечения?
3. Как определить полярный момент сопротивления кольцевого сечения?
4. Почему нельзя его определить как разность моментов сопротивления наружного и внутреннего кругов?
5. По какой формуле определяется угол закручивания вала?
6. Запишите условие прочности при кручении.
7. Запишите условие жесткости при кручении.

ТЕМА 6. ИЗГИБ

Литература: [1, гл.9]; [2, гл.8]

Эта тема является наиболее важной в курсе сопротивления материалов и при ее изучении особое внимание следует уделить решению задач. Необходимо научиться свободно строить эпюры Q , M , N .

Поперечная сила Q в любом сечении балки равна алгебраической сумме проекций сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, на перпендикуляр к оси балки. При этом, если внешние силы вращают рассматриваемую часть балки относительно исследуемого сечения по часовой стрелке – поперечная сила положительна.

Изгибающий момент M в любом сечении балки равен алгебраической сумме моментов внешних сил, расположенных с одной стороны, относительно центральной оси поперечного сечения.

Следует при этом иметь в виду, что можно рассматривать как одни только левые силы, так и одни правые силы в зависимости от того, с какой стороны проще построить эпюры.

В поперечных сечениях балок действуют два вида напряжений – нормальные и касательные. Следует запомнить формулы для определения этих напряжений. Обратите внимание на характер распределения напряжений по высоте балки. В связи с характером распределения нормальных напряжений в сечении балки возникла мысль о том, что более экономично выполнять балки двутаврового поперечного сечения.

Следует запомнить формулы условий прочности по нормальным и касательным напряжениям при изгибе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как находят поперечную силу в любом сечении балки?
2. В каком случае поперечная сила положительна?
3. Как находят изгибающий момент в любом сечении балки?
4. В каком случае изгибающий момент положителен?
5. Как провести контроль правильности построения эпюр?
6. Что такое нейтральный слой и где он расположен?
7. Как изменяется эпюра нормальных напряжений в балке?
8. Как вычисляются касательные напряжения в балке и где они имеют максимальные значения?
9. Как выгоднее расположить балку прямоугольного сечения при изгибе: на ребро или плашмя?
10. Как вычисляют главные напряжения в балке?

ТЕМА 7. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ

Литература: [1, гл.10]; [2, гл.9]

Под действием внешних сил балка деформируется. Сечения балки поворачиваются и перемещаются. Перемещения балки по направлению перпендикулярному к недеформируемой оси называют прогибом. Угол, на который повернется сечение по отношению к первоначальному положению, называют углом поворота сечения.

Для балок перемещение и углы поворотов сечений определяют с помощью метода начальных параметров. Начало координат в этом методе выбирают на крайнем левом конце балки. Начальные параметры (угол поворота и прогиб на левом конце) определяют из условий на опорах. Обратите внимание, что положительные силовые факторы в формуле метода начальных параметров (момент, сосредоточенная сила, равномерно распределенная нагрузка) изгибают балку вверх, если считать ее закрепленной на правом конце. Если равномерно распределенная нагрузка не доходит до правого конца балки, ее нужно продлить и уравновесить.

Для определения перемещений в стержнях любого очертания (прямолинейные, ломаные, криволинейные) пользуются формулой Мора. Вычисление интегралов, входящих в формулу Мора, является трудоемкой задачей и для простых систем интеграл вычисляют графоаналитическим приемом по правилу Верещагина. Для определения перемещений в простых балках строят эпюру изгибающих моментов от нагрузок. В точке, перемещение которой отыскивается, прикладывают единичную силу и строят эпюру изгибающих моментов от этой силы. Перемножив эпюры от нагрузок и от единичной силы, вычисляют прогиб.

Следует внимательно изучить порядок упрощения сложных эпюр моментов путем их разбиения на простые. Нужно запомнить площади простых эпюр и положение их центров тяжести. Заметьте, что в том случае, когда эпюры

моментов от нагрузок и от единичных сил расположены по одну сторону от оси – результат перемножения положителен. Это означает, что точка переместилась по направлению силы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как записывается общее дифференциальное уравнение изогнутой оси?
2. Как находят начальные параметры для балки, защемленной левым концом? Для балки на двух опорах?
3. Как определить угол поворота крайнего левого конца балки?
4. Куда переместиться исследуемая точка, если в результате решения уравнения метода начальных параметров получен положительный результат?
5. Как определить угол поворота сечения с помощью интеграла Мора?
6. Как определить площадь параболического треугольника?
7. Где у него расположен центр тяжести?
8. Если в результате перемножения грузовой и единичной эпюры получен отрицательный результат, куда переместилось сечение?

ТЕМА 8. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ БАЛКИ

Литература: [1, гл.11]; [2, гл.10]

Балка, способная воспринимать произвольную нагрузку, должна быть закреплена таким образом, чтобы она не могла перемещаться. Минимальное количество связей, необходимых для закрепления балки равно трем. Эти связи являются необходимыми. Поскольку для плоской системы сил можно составить три уравнения равновесия, реакции связей могут быть определены из уравнений статики.

На практике встречаются балки, в которых число положительных связей больше, чем нужно для обеспечения геометрической неизменяемости. Связи, наложенные на балку сверх необходимых, называют лишними. В балках с лишними связями все реакции невозможно определить только из уравнений статики. Такие балки называют статически неопределимыми. В статически неопределимых балках число неизвестных опорных реакций всегда превышает число возможных уравнений равновесия. Для решения таких задач требуется составление дополнительных уравнений. Количество дополнительных уравнений равно числу лишних связей, т.е. степени статической неопределимости балки. Заданную статически неопределимую балку контрольной работы можно решать несколькими способами, но удобнее методом сил. Составляется система канонических уравнений метода сил, количество которых равно степени статической неопределимости балки. Смысл каждого уравнения метода сил в отрицании перемещения соответствующего сечения в заданном направлении. Следует четко знать, что означают свободные члены канонического уравнения и коэффициенты при неизвестных. Нужно знать как их определить. После решения уравнений метода сил вычисляют

неизвестные и строят эпюры изгибающих моментов и поперечных сил обычным способом, приложив к балке численное значение вычисленной опорной реакции. Проверка правильности решения задачи производится путем перемножения полученной эпюры изгибающих моментов на единичную. Если результат перемножения равен нулю – задача решена, верно.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Запишите систему канонических уравнений для дважды статически неопределимой балки.
2. Что означают свободные члены канонических уравнений?
3. Что означают коэффициенты при неизвестных?
4. Каков смысл первого уравнения системы?
5. Каков смысл второго уравнения системы?
6. Как определяются свободные члены канонических уравнений?
7. Как определяются коэффициенты при неизвестных?
8. Как определить правильность построения эпюры изгибающих моментов?

ТЕМА 9. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Литература: [1, гл.12]; [2, гл.9]

В инженерной практике часто встречаются случаи, в которых брус под действием внешних сил испытывает одновременно несколько видов деформаций (растяжение, сжатие, кручение и изгиб). В этом случае говорят, что брус находится в условиях сложного сопротивления.

В условиях сложного сопротивления работают пространственные стержневые системы. Для решения такого рода задач необходимо научиться строить эпюры внутренних сил для таких систем. Напряжения в общем случае действия сил на брус зависят от величин Q_x , Q_y , N , M_x , M_y , T , которые вычисляют следующим образом:

– поперечная сила Q_x равна алгебраической сумме проекций всех сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, на главную центральную ось X ;

– поперечная сила Q_y равна сумме проекций тех же сил на главную центральную ось Y ;

– продольная сила N равна алгебраической сумме проекций тех же сил на перпендикуляр к плоскости сечения;

– изгибающий момент M_x равен алгебраической сумме моментов всех сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно главной центральной оси X сечения;

– изгибающий момент M_y равен алгебраической сумме моментов тех же сил относительно главной центральной оси Y сечения;

– крутящий момент T равен алгебраической сумме моментов тех же сил относительно оси, перпендикулярной плоскости сечения и проходящей через центр тяжести сечения.

Рекомендуется разобрать примеры построения эпюр, изложенные в учебной литературе.

При изучении темы «Косой изгиб» обратите внимание на то, что нейтральная линия уже не перпендикулярна плоскости внешних сил и плоскость, в которой расположены прогибы не совпадают с силовой. Косой изгиб опасен для сечений у которых значительно отличаются величины главных моментов инерции (двутавровые сечения, вытянутые прямоугольные сечения). Балки таких сечений хорошо работают на изгиб в плоскости наибольшей жесткости, но при косом изгибе в них появляются значительные напряжения и деформации. Для балок круглого сечения косой изгиб невозможен, так как все центральные оси являются главными и нейтральный слой всегда перпендикулярен силовой плоскости.

При определении напряжений в сечениях элементов конструкций в случае внецентренного растяжения или сжатия обязательно нужно знать положение главных центральных осей сечения и величины моментов инерции относительно них. В расчетные формулы входят величины радиусов инерции относительно этих осей и координаты точек, в которых определяют напряжения относительно главных центральных осей. Важную роль играет понятие о ядре сечения. Следует обратить внимание на то, что если сжимающая сила приложена в ядре сечения, то все сечение испытывает сжатие, а нейтральная линия располагается вне сечения; если точка расположения силы расположена вне ядра сечения, то нейтральная линия проходит по сечению сжатого элемента и делит его на две части – сжатую и растянутую. Напряжения в точках, наиболее удаленных от нейтральной линии принимают наибольшие значения. В этой связи внецентренное сжатие опасно для элементов конструкций, выполненных из хрупких материалов (чугун, кирпич, бетон), которые слабо сопротивляются растягивающим напряжениям.

При изучении темы «Кручение и изгиб» обратите внимание на то, что материал детали работает в условиях сложного напряженного состояния когда в поперечных сечениях одновременно действуют крутящий и изгибающий моменты. В результате по граням выделенного элемента из детали прямоугольного параллелепипеда одновременно действуют как нормальные, так и касательные напряжения. Это приводит к необходимости решать вопрос о прочности материала с помощью гипотез прочности.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определяются изгибающий и крутящий моменты для стержня с ломаной осью?
2. Как определяется продольная сила для того же стержня?
3. Какой случай изгиба называется косым?
4. Как определяют напряжения при косом изгибе?

5. В каких точках сечения возникают наибольшие напряжения при косом изгибе?
6. Как определяют деформации при косом изгибе?
7. Может ли балка круглого поперечного сечения испытывать косою изгиб?
8. По каким формулам находят напряжения при внецентренном сжатии?
9. По каким формулам определяют координаты угловых точек ядра сечения?
10. По каким формулам определяется положение нейтральной линии при внецентренном сжатии?
11. Чему равно напряжение в центре тяжести поперечного сечения при внецентренном сжатии?
12. Какое положение займет нейтральная линия, если сжимающая сила приложена к вершине ядра сечения?
13. Как находится опасное сечение при изгибе с кручением?
14. В каких точках круглого поперечного сечения возникают опасные напряжения при изгибе с кручением?
15. Чему равны напряжения в центре круглого поперечного сечения при изгибе с кручением?
16. Как пишутся условия прочности по третьей и четвертой гипотезам прочности при изгибе и кручении?
17. Как находится величина расчетного сопротивления при изгибе и кручении стержня круглого поперечного сечения по третьей гипотезе прочности?

ТЕМА 10. УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Литература: [1, гл.12]; [2, гл.9]

Несущая способность коротких сжатых стержней определяется по формулам, изложенным в теме 1 лишь в том случае, когда они обладают высокой жесткостью. У гибких сжатых стержней несущая способность исчерпывается с момента потери устойчивости задолго до потери прочности. Опасность потери устойчивости заключается в том, что она происходит внезапно при напряжениях значительно меньших предела прочности материала. Эти напряжения называются критическими и их определяют как отношение критической силы к площади поперечного сечения стойки. Для стержней большой гибкости критическая сила определяется по формуле Эйлера. Ясинский опытным путем получил формулу для определения критических напряжений в стержнях малой и средней гибкости, для которых формула Эйлера неприменима. При практических расчетах стержней на устойчивость применяют формулу для определения продольной силы с использованием коэффициента продольного изгиба, который берется из таблиц в зависимости от гибкости стойки и материала. Следует обратить внимание на то, что подбор сечения производится не сразу, а методом последовательных приближений.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается явление потери устойчивости сжатого стержня?
2. Какая сила называется критической?
3. По какой формуле определяется критическая сила?
4. Что такое коэффициент приведения длины стержня и чему он равен для различных видов опорных закреплений?
5. Как изменится величина критической силы при увеличении длины стойки в два раза?
6. Что называется гибкостью стержня?
7. Как определяется коэффициент продольного изгиба?
8. Как находится критическое напряжение для стержней малой гибкости?
9. Как подбирается поперечное сечение стойки при расчете на устойчивость?

ТЕМА 11. ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ НАГРУЗКИ

Литература: [1, гл.14]; [2, гл.17]

При расчете элементов конструкций на динамическое действие нагрузок необходимо учитывать силы инерции, с которыми связаны дополнительные напряжения и деформации. Иногда эти дополнительные напряжения весьма велики. На практике влияние динамических нагрузок учитывается с помощью динамического коэффициента. Для определения усилия от динамического действия нагрузок усилия от статической нагрузки увеличивается на динамический коэффициент, который зависит от вида динамической нагрузки, размеров, жесткости и массы сооружения и от других факторов.

Динамический коэффициент при ударе получают приравнивая кинетическую энергию ударяющего тела потенциальной энергии деформации элемента, воспринимающего удар. При этом динамический коэффициент в силу допущений, принятых при выводе формулы, имеет приближенное значение. Напряжения при ударе зависят не только от площади поперечного сечения элемента, но и от его длины, жесткости и массы.

После изучения данной темы нужно знать как определяются динамические коэффициенты при учете сил инерции и при ударе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определяются напряжения в элементах, движущихся с ускорением?
2. Какие допущения принимаются при выводе формулы динамического коэффициента при ударе?
3. Как записывается выражение динамического коэффициента при ударе?
4. Зависит ли напряжение при изгибающем ударе от жесткости балки?

5. В каком случае динамический коэффициент примет большее значение в балке прямоугольного сечения при изгибающем ударе: в положении на ребро или плашмя?

6. Какими мерами можно уменьшить динамический коэффициент при изгибающем ударе?

УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Каждый студент-заочник выполняет то количество контрольных работ, которое предусмотрено учебным планом. Номера задач, входящих в контрольную работу, приведены в следующей таблице.

Таблица

Номера задач контрольных работ

| Количество контрольных работ | Номера задач контрольных работ | |
|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | первая контрольная работа | вторая контрольная работа |
| 2 | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | 7, 8, 9, 10, 11, 12 |
| 1 | 2, 3, 5, 6, 8, 9 | |

Контрольные работы являются индивидуальными. Расчетная схема и числовые данные определяются тремя последними числами личного номера (шифра) студента и первыми тремя буквами русского алфавита, которые располагаются под шифром. Цифры, обозначающие шифр факультета, не используются. Если личный номер состоит менее чем из трех цифр, впереди дописываются нули.

Например: 314315 – 1 3 2
А Б В

312225 – 3

312225 – 0 0 3
А Б В

Номер схемы и числовые данные берутся из таблиц в соответствии с цифрами шифра и буквами, написанными под ними. Для шифра 003 к задаче 1 из таблицы 1 выписываем: схема 3; $A = 13 \text{ см}^2$; $F=200 \text{ кН}$; $a = 2 \text{ м}$; $b = 3,0 \text{ м}$; $c = 1,3 \text{ м}$. Работы, выполненные не в соответствии с шифром, не рецензируются и не допускаются к защите.

Каждая контрольная работа выполняется в отдельной тетради чернилами, четким почерком. На каждой странице отводятся поля 3–4см для замечаний рецензента. Чертежи к задаче выполняются карандашом на отдельной странице тетради или на миллиметровке с соблюдением масштаба.

Решение каждой задачи должно начинаться с новой страницы. Записывается условие задачи и все исходные данные в соответствии с шифром.

Выявленные рецензентом ошибки исправляются студентом на отдельных листах, которые вкладываются в соответствующие места контрольной работы. В самой не зачтенной работе ничего не меняется.

Выполненные и допущенные к защите контрольные работы должны быть представлены на зачете или на экзамене и защищены после ответа на вопросы, связанные с решением задач.

На титульном листе контрольной работы должны быть указаны:

- номер контрольной работы;
- название дисциплины;
- фамилия, имя, отчество студента;
- факультет, номер группы и номер зачетной книжки; почтовый индекс и адрес студента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

ЗАДАЧА 1

Для заданного ступенчатого стержня (рис.1) определить величину напряжения в сечении 1 – 1 и перемещение этого сечения.

Плотность материала стержня $\rho = 7,82 \text{ т/м}^3$, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.
Данные к задаче взять из табл.1.

Таблица 1

Расчетная схема и числовые данные для задачи 1

| Номер строки | Схема | A, см ² | F, кН | a | b | c |
|--------------|-------|--------------------|-------|-----|-----|-----|
| | | | | м | | |
| 1 | 1 | 11 | 110 | 1,1 | 2,1 | 1,1 |
| 2 | 2 | 12 | 120 | 1,2 | 2,2 | 1,2 |
| 3 | 3 | 13 | 130 | 1,3 | 2,3 | 1,3 |
| 4 | 4 | 14 | 140 | 1,4 | 2,4 | 1,4 |
| 5 | 5 | 15 | 150 | 1,5 | 2,5 | 1,5 |
| 6 | 6 | 16 | 160 | 1,6 | 2,6 | 1,6 |
| 7 | 7 | 17 | 170 | 1,7 | 2,7 | 1,7 |
| 8 | 8 | 18 | 180 | 1,8 | 2,8 | 1,8 |
| 9 | 9 | 19 | 190 | 1,9 | 2,9 | 1,9 |
| 0 | 10 | 20 | 200 | 2,0 | 3,0 | 2,0 |
| | В | В | Б | А | Б | В |

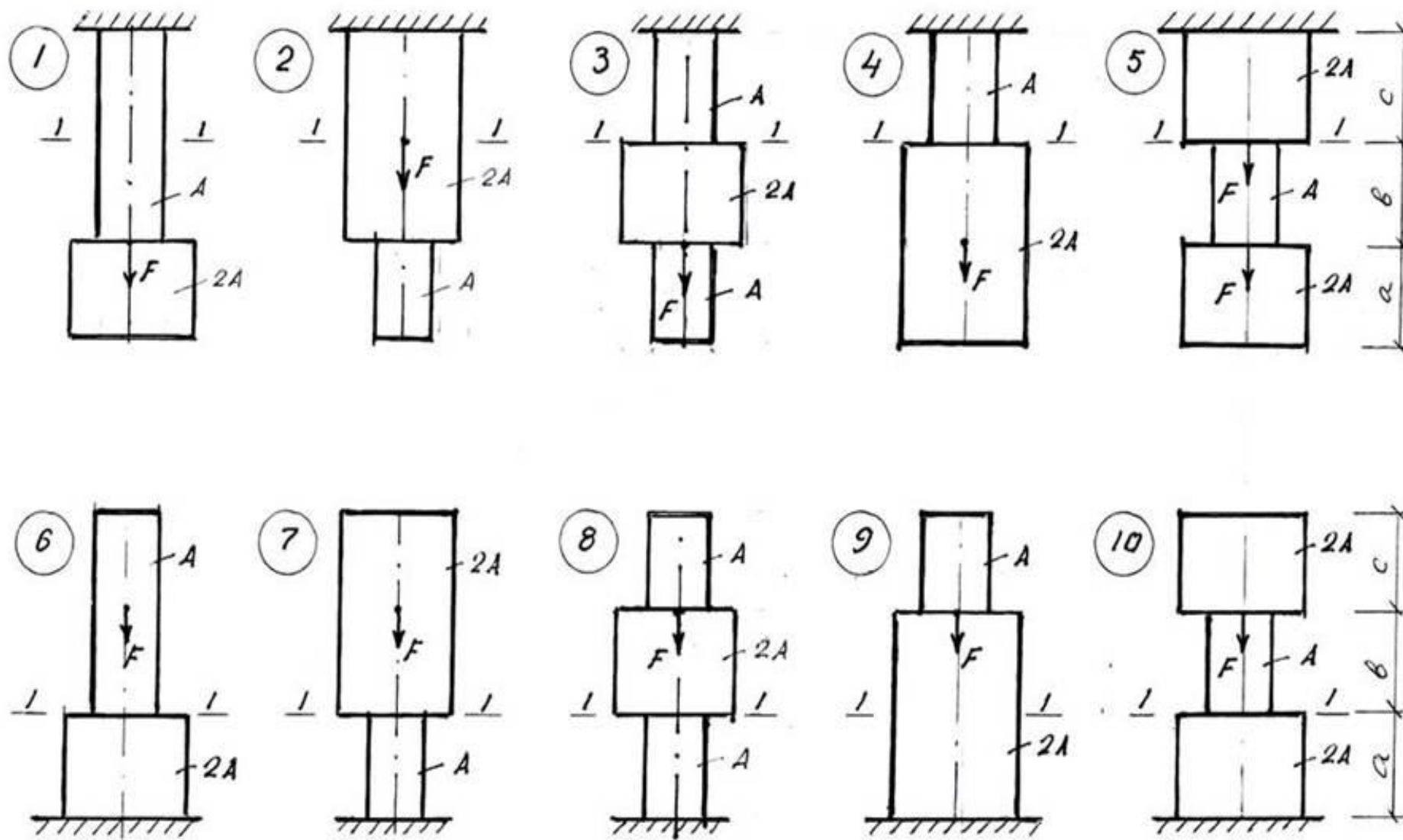


Рис. 1. Схема ступенчатого стержня

ЗАДАЧА 2

Абсолютно жесткий брус опирается на шарнирно-неподвижную опору и поддерживается двумя стальными стержнями (рис.2).

Требуется:

1. Определить усилия и напряжения в стержнях, выразив их через силу F ;
2. Определить максимальную нагрузку F , которую можно приложить к системе, если расчетное сопротивление стали $R = 210$ МПа. Определить предельную грузоподъемность системы $F_{\text{пред}}$, если предел текучести $\sigma_y = 240$ МПа и запас прочности $k = 1,5$.

Данные к задаче взять из табл.2

Таблица 2

Расчетная схема и числовые данные для задачи 2

| Номер строки | Схема | $A, \text{см}^2$ | а | в | с |
|--------------|-------|------------------|-----|-----|-----|
| | | | м | | |
| 1 | 1 | 11 | 1,1 | 2,1 | 3,1 |
| 2 | 2 | 12 | 1,2 | 2,2 | 3,2 |
| 3 | 3 | 13 | 1,3 | 2,3 | 3,3 |
| 4 | 4 | 14 | 1,4 | 2,4 | 3,4 |
| 5 | 5 | 15 | 1,5 | 2,5 | 3,5 |
| 6 | 6 | 16 | 1,6 | 2,6 | 3,6 |
| 7 | 7 | 17 | 1,7 | 2,7 | 3,7 |
| 8 | 8 | 18 | 1,8 | 2,8 | 3,8 |
| 9 | 9 | 19 | 1,9 | 2,9 | 3,9 |
| 0 | 10 | 10 | 2,0 | 2,0 | 3,0 |
| | В | А | Б | В | А |

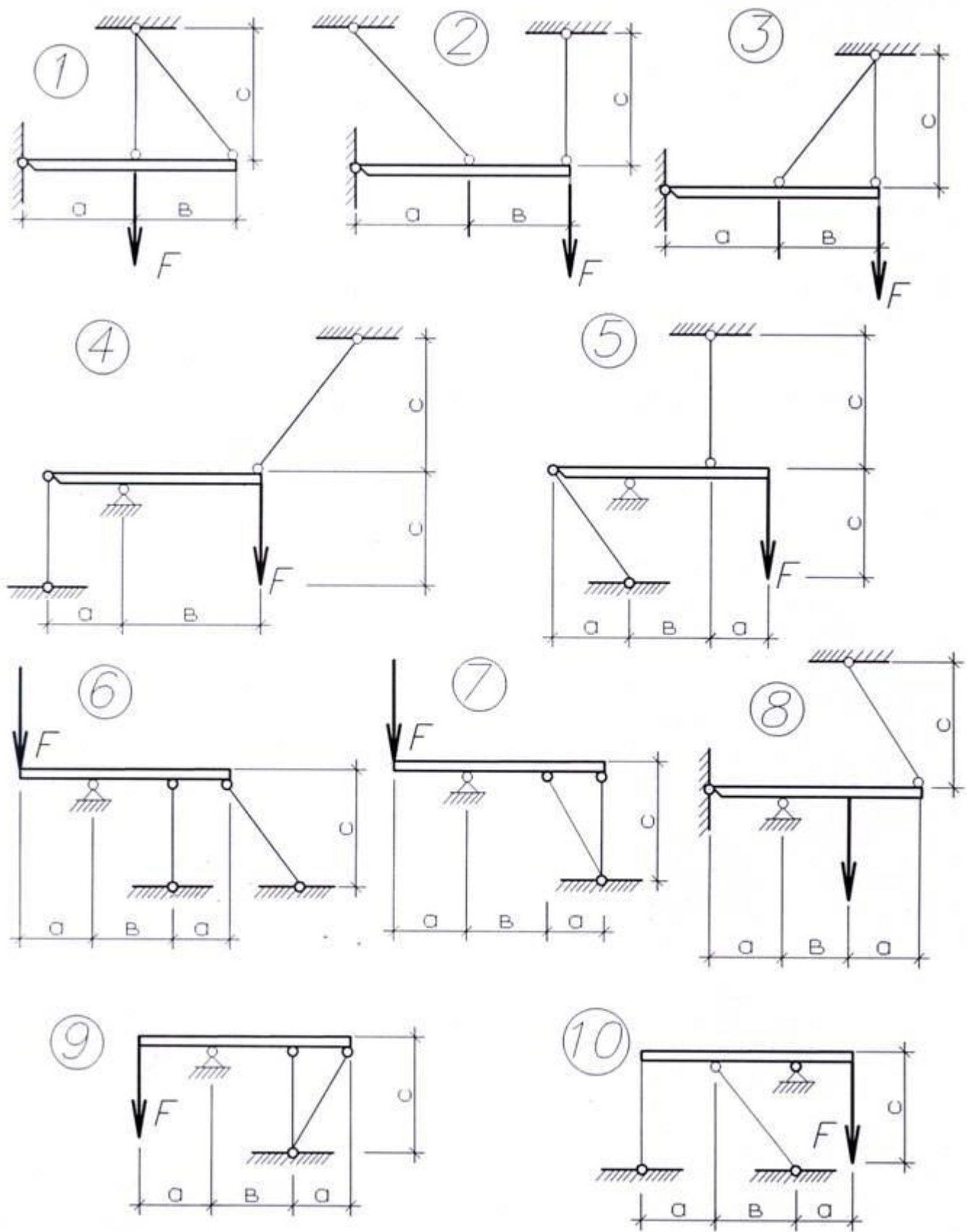


Рис. 2. Схема стержневой системы

ЗАДАЧА 3

Для заданного поперечного сечения, составленного из прокатных профилей (рис.3) требуется:

1. Определить положение центра тяжести;
 2. Определить величины осевых и центробежного моментов инерции относительно осей, проходящих через центр тяжести сечения;
 3. Определить положение главных центральных осей и величины моментов инерции относительно их;
 4. Вычертить сечение в масштабе 1:2 и указать на нем все размеры и оси.
- Данные к задаче взять из табл.3

Таблица 3

Расчетная схема и числовые данные для задачи 3

| Номер строки | Схема сечения | Швеллер | Двутавр | Равнополочный уголок |
|--------------|---------------|---------|---------|----------------------|
| 1 | 1 | 10 | 14 | 80x80x8 |
| 2 | 2 | 12 | 16 | 90x90x8 |
| 3 | 3 | 14 | 18 | 100x100x10 |
| 4 | 4 | 16 | 20 | 110x110x8 |
| 5 | 5 | 18 | 22 | 120x120x12 |
| 6 | 6 | 20 | 24 | 125x125x8 |
| 7 | 7 | 22 | 27 | 140x140x10 |
| 8 | 8 | 24 | 30 | 160x160x10 |
| 9 | 9 | 27 | 40 | 180x180x12 |
| 0 | 10 | 30 | 50 | 200x200x12 |
| | В | А | Б | В |

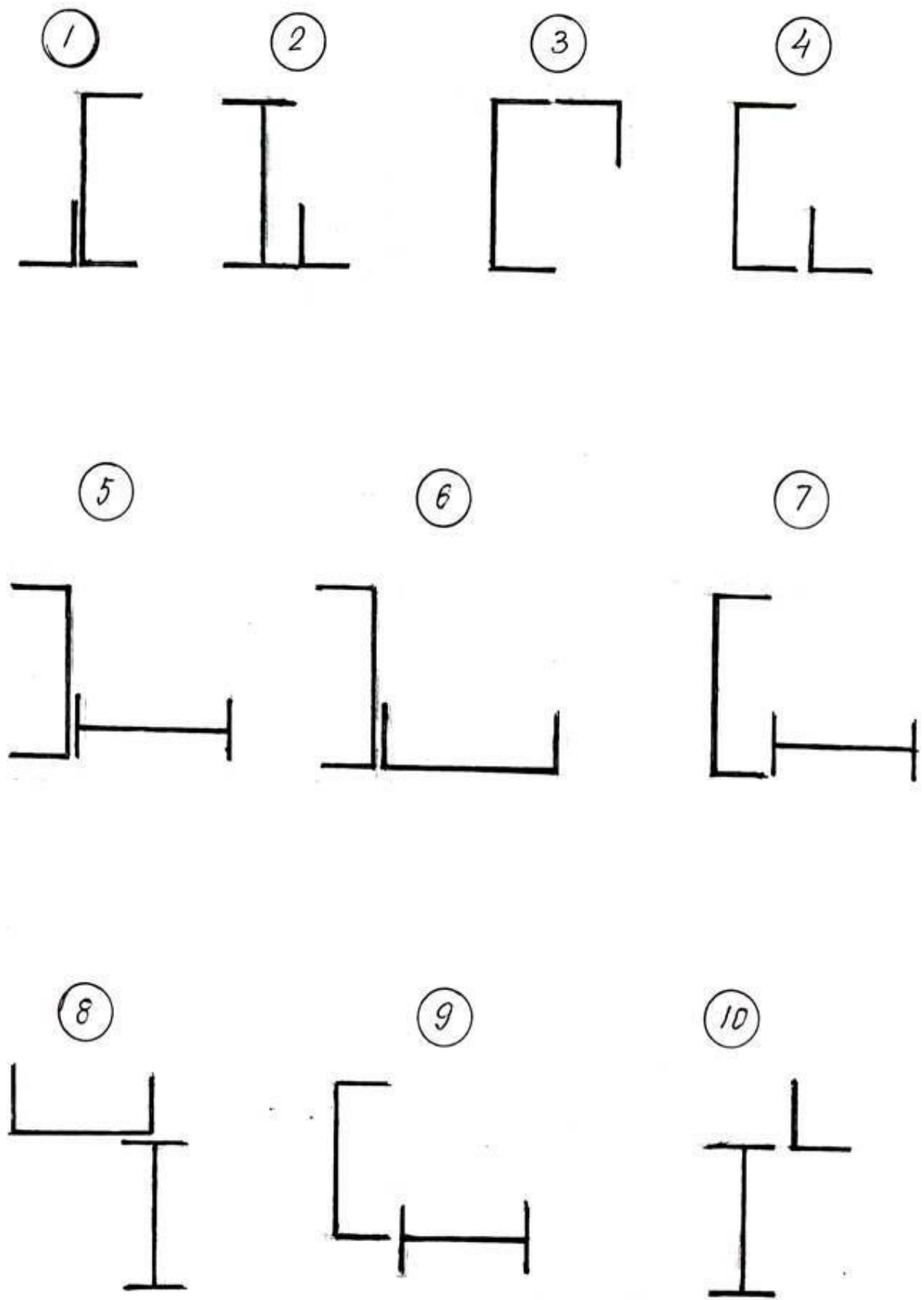


Рис. 3. Схема поперечного сечения

ЗАДАЧА 4

К стальному валу приложены крутящие моменты (рис.4).

Требуется:

1. Определить величину реактивного момента в одной из опор;
2. Построить эпюру крутящих моментов;
3. Определить диаметр вала из расчета на прочность, приняв $R_s = 100$ МПа и округлить его согласно стандарту ($d = 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 140, 160, 170, 200$ мм);
4. Вычислить деформации на участках вала и построить эпюру углов поворота сечений, приняв модуль при сдвиге $G = 80$ ГПа;
5. Проверить жесткость вала, если $\theta_{adm} = 2$ °/м.

Данные к задаче взять из табл.4

Таблица 4

Расчетная схема и числовые данные для задачи 4

| Номер строки | Схема | Размеры, м | | | Моменты, кНм | | |
|--------------|-------|------------|-----|-----|--------------|-------|-------|
| | | а | в | с | M_1 | M_2 | M_3 |
| 1 | 1 | 1,1 | 2,1 | 1,1 | 2,1 | 3,1 | 4,1 |
| 2 | 2 | 1,2 | 2,2 | 1,2 | 3,2 | 3,2 | 4,2 |
| 3 | 3 | 1,3 | 2,3 | 1,3 | 3,3 | 3,3 | 4,3 |
| 4 | 4 | 1,4 | 2,4 | 1,4 | 2,4 | 3,4 | 2,4 |
| 5 | 5 | 1,5 | 2,5 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 2,5 |
| 6 | 6 | 1,6 | 2,6 | 1,6 | 2,6 | 3,6 | 2,6 |
| 7 | 7 | 1,7 | 2,7 | 1,7 | 3,7 | 3,7 | 2,7 |
| 8 | 8 | 1,8 | 2,8 | 1,8 | 2,8 | 3,8 | 2,8 |
| 9 | 9 | 1,9 | 2,9 | 1,9 | 2,9 | 3,9 | 2,9 |
| 0 | 10 | 1,0 | 2,0 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
| | В | А | Б | А | Б | В | А |

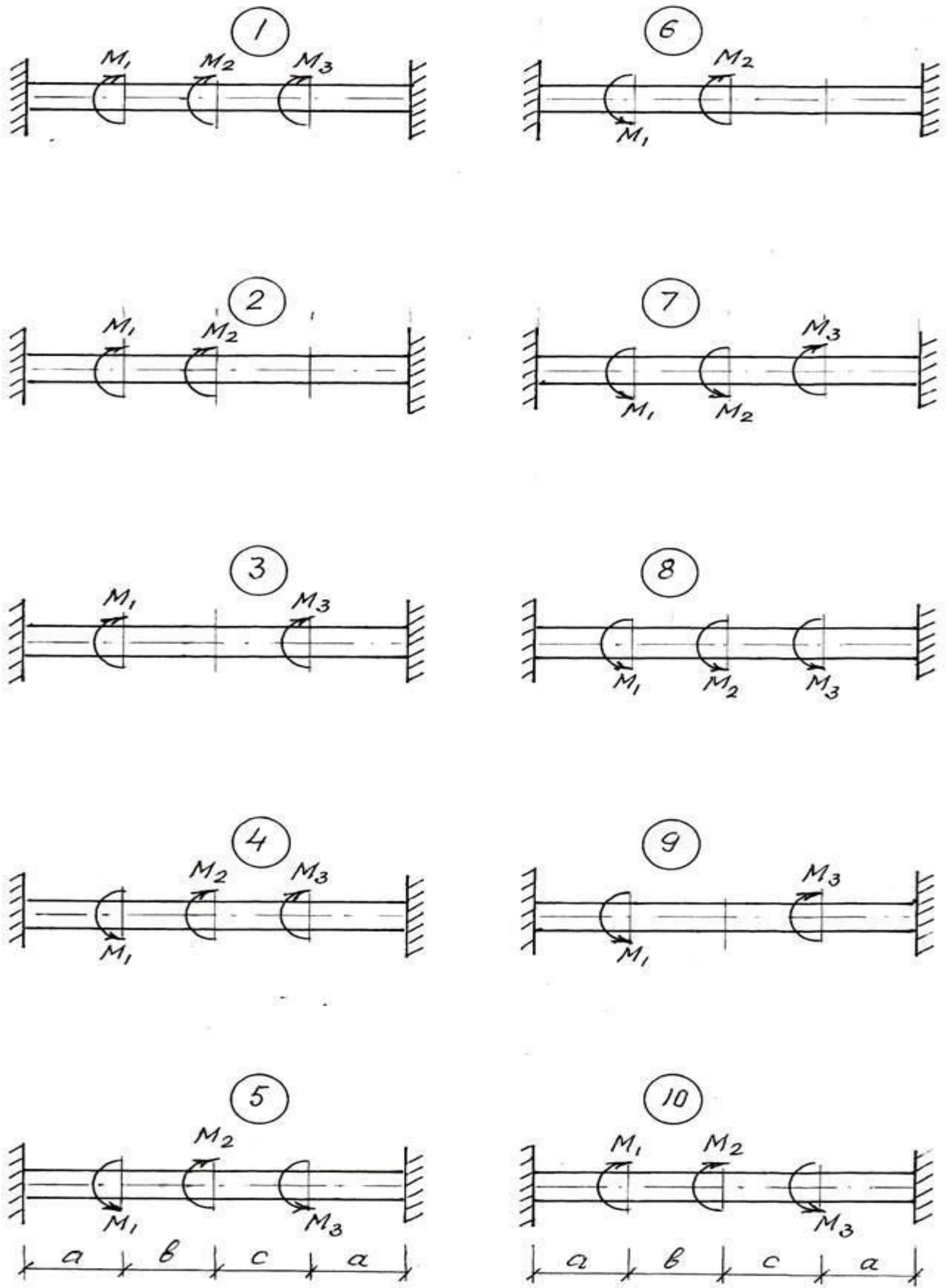


Рис. 4. Схема вала с применными к нему крутящими моментами

ЗАДАЧА 5

Для заданных двух схем балок (рис.5, рис.5а) требуется:

1. Записать выражения Q и M для каждого участка балки в общем виде и построить эпюры Q и M .

2. Подобрать поперечные сечения балок.

Для схемы по рис.5 деревянную балку прямоугольного поперечного сечения при $h : b = 2$ и $R = 13$ МПа.

Для схемы по рис.5а стальную двутавровую балку при $R = 210$ МПа.

Данные взять из табл.5

Таблица 5

Расчетная схема и числовые данные для задачи 5

| Номер строки | Схема | Размеры, м | | | F, кН | q, кН/м | M, кНм |
|--------------|-------|------------|-----|-----|-------|---------|--------|
| | | a | b | c | | | |
| 1 | 1 | 1,1 | 2,1 | 3,1 | 11 | 3,1 | 5,1 |
| 2 | 2 | 1,2 | 2,2 | 3,2 | 12 | 3,2 | 5,2 |
| 3 | 3 | 1,3 | 2,3 | 3,3 | 13 | 3,3 | 5,3 |
| 4 | 4 | 1,4 | 2,4 | 3,4 | 14 | 3,4 | 5,4 |
| 5 | 5 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 15 | 3,5 | 5,5 |
| 6 | 6 | 1,6 | 2,6 | 3,6 | 16 | 3,6 | 5,6 |
| 7 | 7 | 1,7 | 2,7 | 3,7 | 17 | 3,7 | 5,7 |
| 8 | 8 | 1,8 | 2,8 | 3,8 | 18 | 3,8 | 5,8 |
| 9 | 9 | 1,9 | 2,9 | 3,9 | 19 | 3,9 | 5,9 |
| 0 | 10 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 20 | 3,0 | 5,0 |
| | В | А | Б | В | А | Б | В |

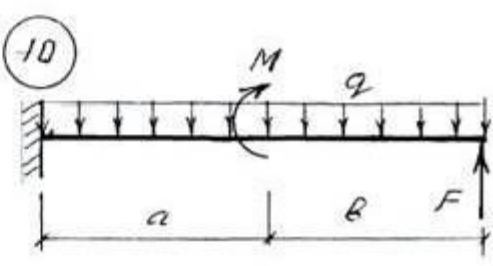
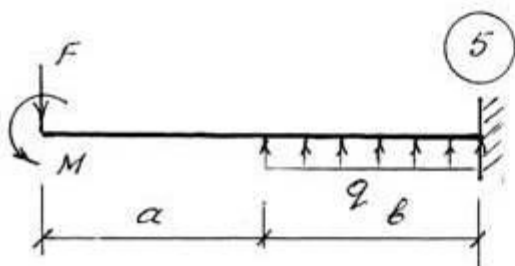
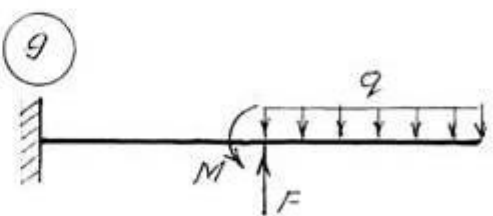
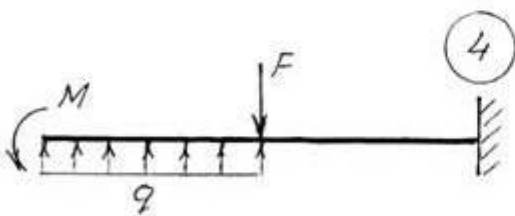
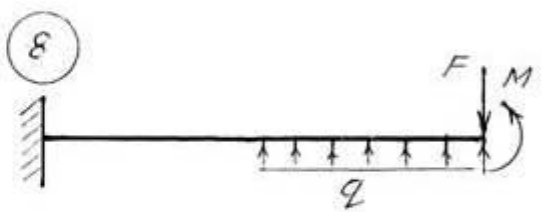
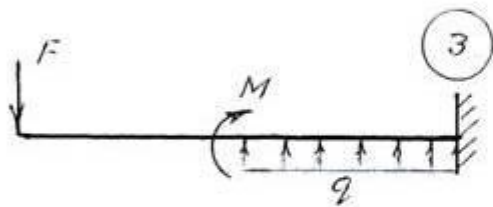
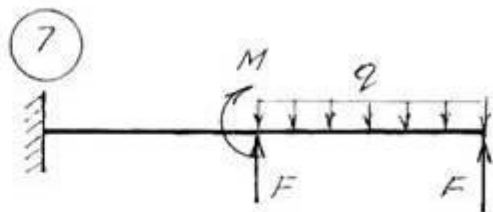
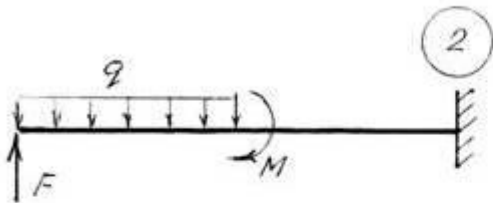
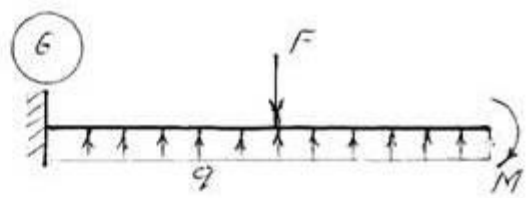
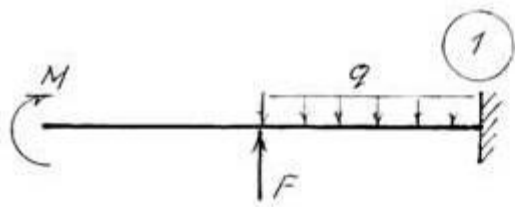


Рис. 5. Схема деревянной балки

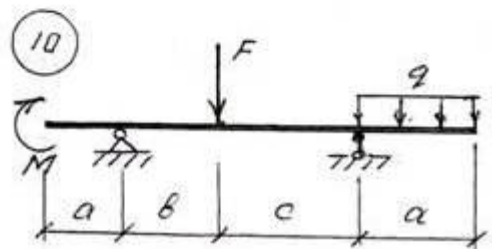
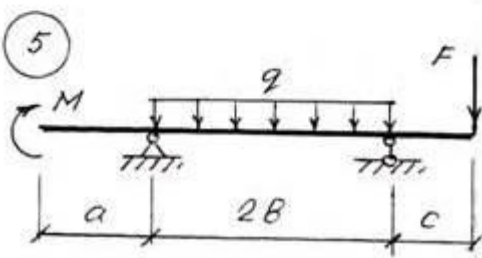
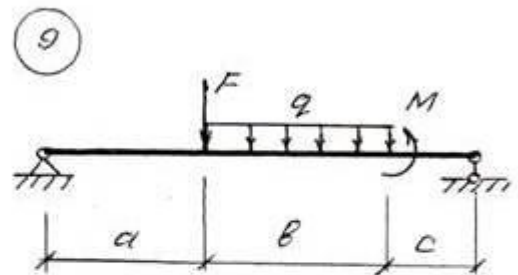
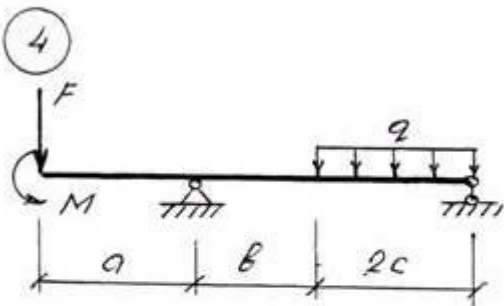
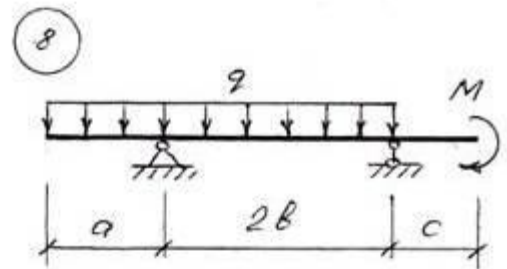
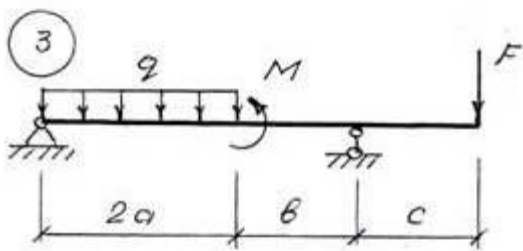
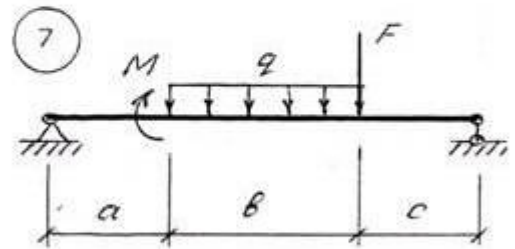
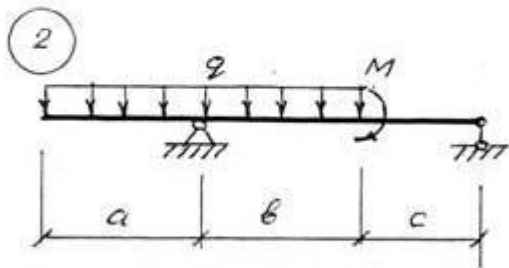
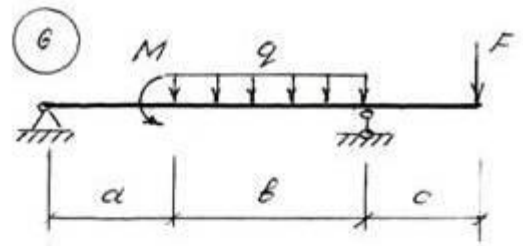
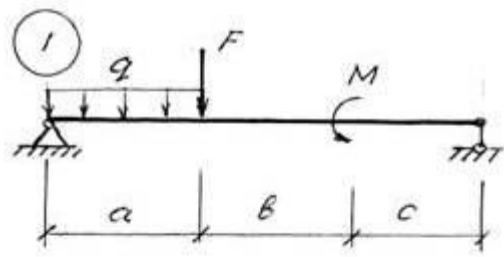


Рис. 5а. Схема стальной двутавровой балки

ЗАДАЧА 6

Для рамы, изображенной на рис.6, построить эпюры Q, M, N и подобрать двутавровое сечение при $R = 210$ МПа.

Данные взять из табл.6

Таблица 6

Расчетная схема и числовые данные для задачи 6

| Номер строки | Схема | Размеры, м | | | F, кН | q, кН/м |
|--------------|-------|------------|-----|-----|-------|---------|
| | | a | b | c | | |
| 1 | 1 | 2,1 | 3,1 | 4,1 | 21 | 41 |
| 2 | 2 | 2,2 | 3,2 | 4,2 | 22 | 42 |
| 3 | 3 | 2,3 | 3,3 | 4,3 | 23 | 43 |
| 4 | 4 | 2,4 | 3,4 | 4,4 | 24 | 44 |
| 5 | 5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 25 | 45 |
| 6 | 6 | 2,6 | 3,6 | 4,6 | 26 | 46 |
| 7 | 7 | 2,7 | 3,7 | 4,7 | 27 | 47 |
| 8 | 8 | 2,8 | 3,8 | 4,8 | 28 | 48 |
| 9 | 9 | 2,9 | 3,9 | 4,9 | 29 | 49 |
| 0 | 10 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 20 | 40 |
| | В | А | Б | А | Б | В |

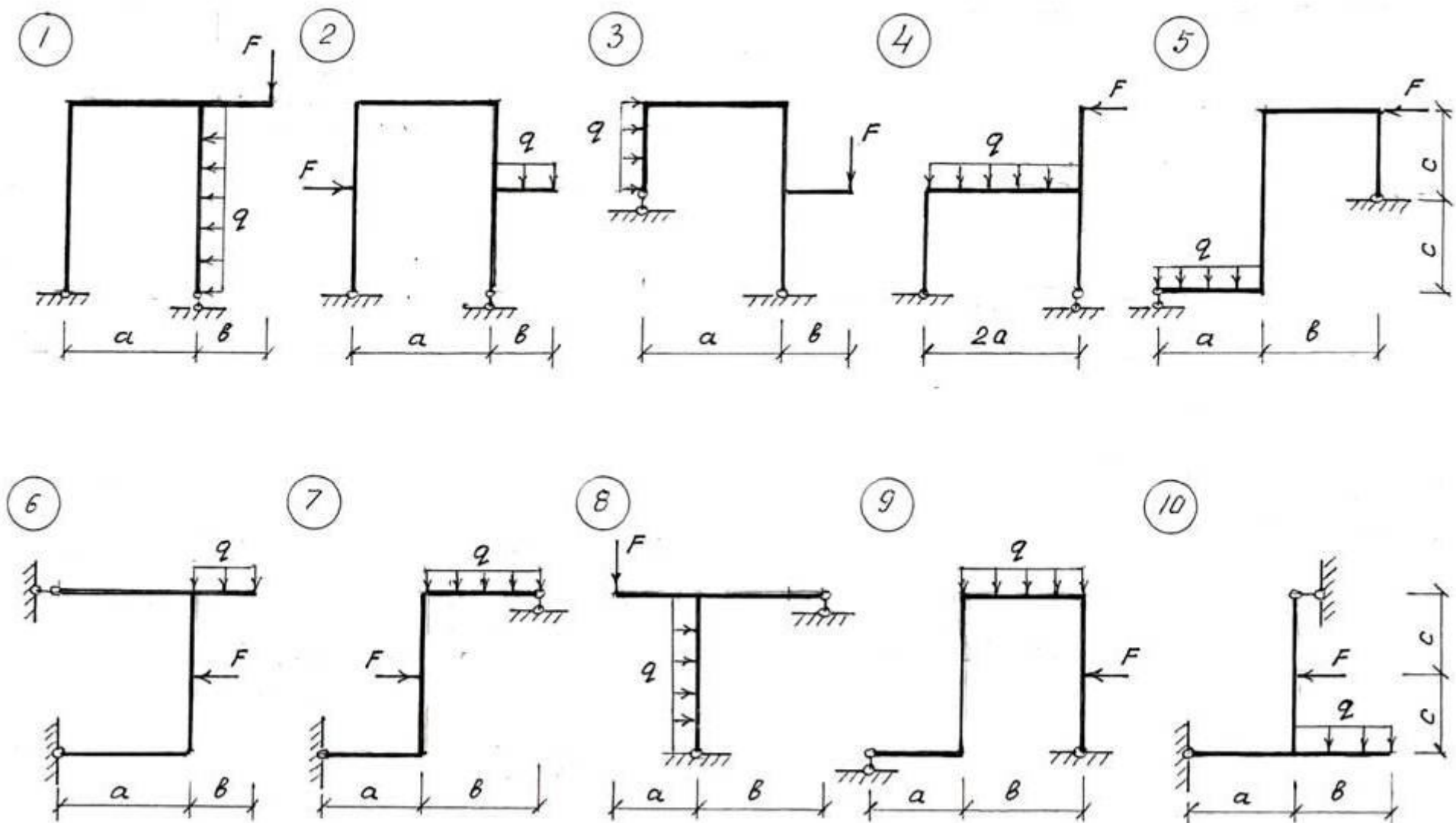


Рис. 6. Схема рамы

ЗАДАЧА 7

Определить прогиб свободного конца балки переменного сечения (рис.7).
Данные к задаче взять из табл.7

Таблица 7

Расчетная схема и числовые данные для задачи 7

| Номер строки | Схема | F, кН | q, кН | M, кНм | K | a | в |
|--------------|-------|-------|-------|--------|----|-----|-----|
| | | | | | | м | |
| 1 | 1 | 11 | 8,1 | 5,1 | 1 | 2,1 | 1,1 |
| 2 | 2 | 12 | 8,2 | 5,2 | 2 | 2,2 | 1,2 |
| 3 | 3 | 13 | 8,3 | 5,3 | 3 | 2,3 | 1,3 |
| 4 | 4 | 14 | 8,4 | 5,4 | 4 | 2,4 | 1,4 |
| 5 | 5 | 15 | 8,5 | 5,5 | 5 | 2,5 | 1,5 |
| 6 | 6 | 16 | 8,6 | 5,6 | 6 | 2,6 | 1,6 |
| 7 | 7 | 17 | 8,7 | 5,7 | 7 | 2,7 | 1,7 |
| 8 | 8 | 18 | 8,8 | 5,8 | 8 | 2,8 | 1,8 |
| 9 | 9 | 19 | 8,9 | 5,9 | 9 | 2,9 | 1,9 |
| 0 | 10 | 20 | 8,0 | 6,0 | 10 | 2,0 | 2,0 |
| | В | А | Б | В | А | Б | В |

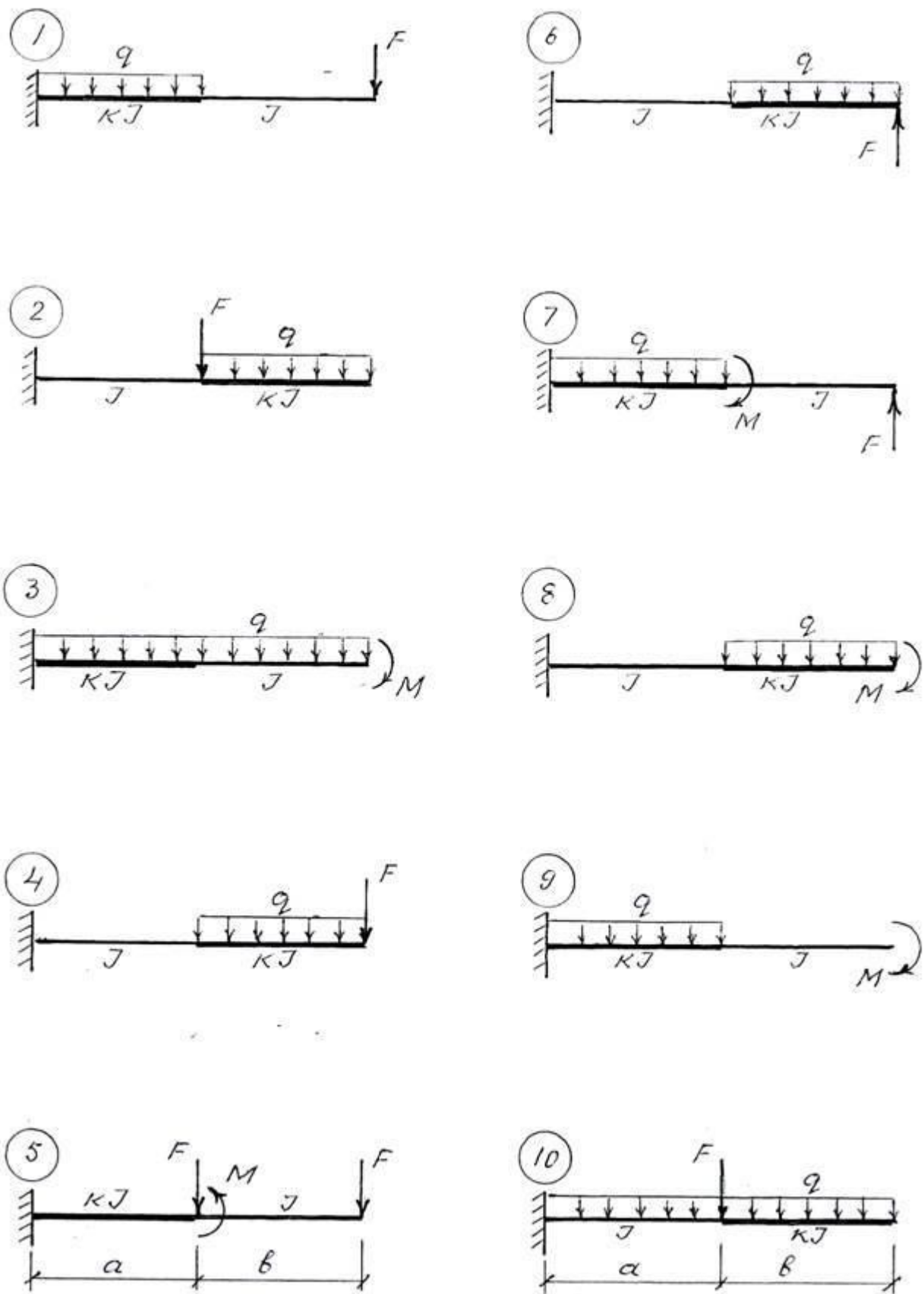


Рис. 7. Схема балки переменного сечения

ЗАДАЧА 8

Построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов для балки (рис.8) и подобрать двутавровое поперечное сечение, приняв $R = 210$ МПа.

Данные к задаче взять из табл.8.

Таблица 8

Расчетная схема и числовые данные для задачи 8

| Номер строки | Схема | F, кН | q, кН/м | a | в | с |
|--------------|-------|-------|---------|-----|-----|-----|
| | | | | м | | |
| 1 | 1 | 21 | 11 | 2,1 | 3,1 | 1,1 |
| 2 | 2 | 22 | 12 | 2,2 | 3,2 | 1,2 |
| 3 | 3 | 23 | 13 | 2,3 | 3,3 | 1,3 |
| 4 | 4 | 24 | 14 | 2,4 | 3,4 | 1,4 |
| 5 | 5 | 25 | 15 | 2,5 | 3,5 | 1,5 |
| 6 | 6 | 26 | 16 | 2,6 | 3,6 | 1,6 |
| 7 | 7 | 27 | 17 | 2,7 | 3,7 | 1,7 |
| 8 | 8 | 28 | 18 | 2,8 | 3,8 | 1,8 |
| 9 | 9 | 29 | 19 | 2,9 | 3,9 | 1,9 |
| 0 | 10 | 20 | 20 | 2,0 | 3,0 | 2,0 |
| | В | А | Б | В | А | Б |

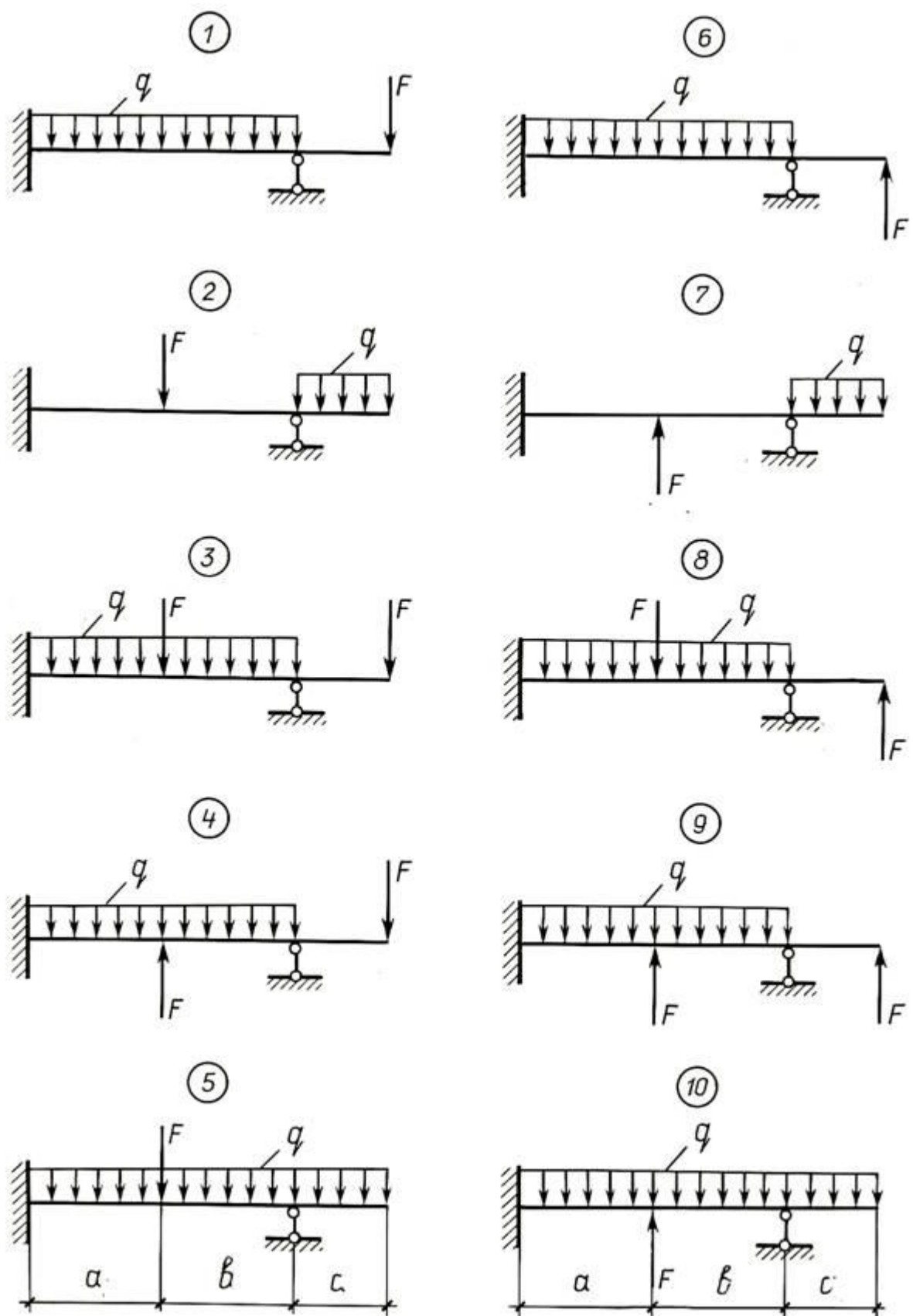


Рис. 8. Схема балки

ЗАДАЧА 9

Короткий чугунный стержень, поперечное сечение которого изображено на рис.9, сжимается силой F , приложенной в точке А.

Требуется:

1. Вычислить наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения в сечении стержня, выразив их через силу F ;
2. Определить значение силы F , если расчетные сопротивления на растяжение $R_p = 1,2$ МПа, на сжатие $R_c = 17,5$ МПа;
3. Построить эпюру нормальных напряжений в сечении с учетом величины F .

Данные взять из табл.9

Таблица 9

Расчетная схема и числовые данные для задачи 9

| Номер строки | Схема | а | в |
|--------------|-------|----|----|
| | | см | |
| 1 | 1 | 11 | 21 |
| 2 | 2 | 12 | 22 |
| 3 | 3 | 13 | 23 |
| 4 | 4 | 14 | 24 |
| 5 | 5 | 15 | 25 |
| 6 | 6 | 16 | 26 |
| 7 | 7 | 17 | 27 |
| 8 | 8 | 18 | 28 |
| 9 | 9 | 19 | 29 |
| 0 | 10 | 10 | 20 |
| | В | А | Б |

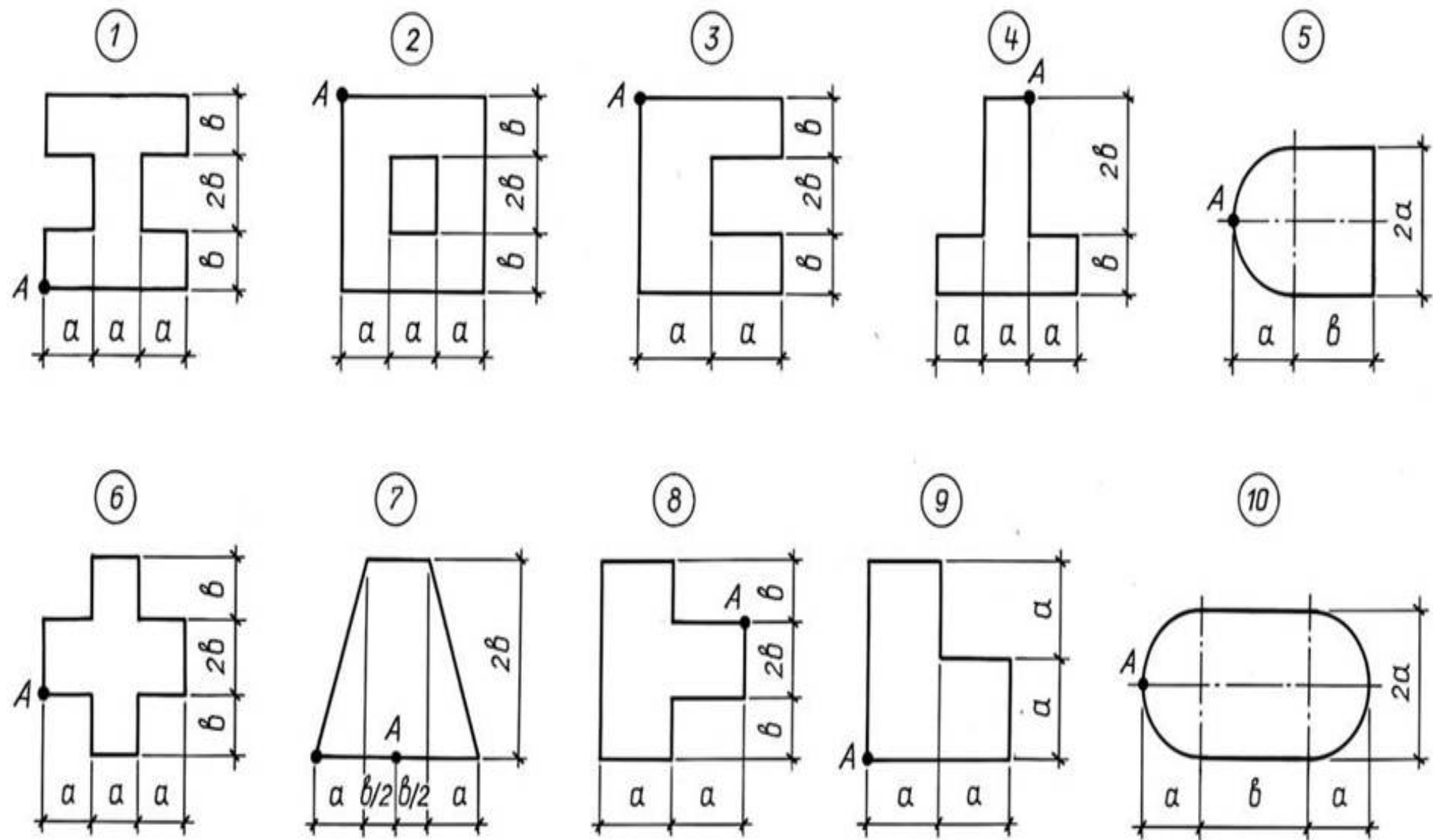


Рис. 9. Поперечное сечение стержня

ЗАДАЧА 10

Для заданного на рис.10 пространственного стержня постоянного поперечного сечения диаметром d требуется:

1. Построить эпюры изгибающих и крутящих моментов;
 2. На каждом участке стержня выявить опасное сечение и составить условие прочности по третьей гипотезе прочности;
 3. Определить диаметр стержня при $R = 210$ МПа.
- Данные взять из табл.10.

Таблица 10

Расчетная схема и числовые данные для задачи 10

| Номер строки | Схема | F, кН | q, кН/м | a | b | c |
|--------------|-------|-------|---------|----|----|----|
| | | | | см | | |
| 1 | 1 | 21 | 1,1 | 51 | 61 | 41 |
| 2 | 2 | 22 | 1,2 | 52 | 62 | 42 |
| 3 | 3 | 23 | 1,3 | 53 | 63 | 43 |
| 4 | 4 | 24 | 1,4 | 54 | 64 | 44 |
| 5 | 5 | 25 | 1,5 | 55 | 65 | 45 |
| 6 | 6 | 26 | 1,6 | 56 | 66 | 46 |
| 7 | 7 | 27 | 1,7 | 57 | 67 | 47 |
| 8 | 8 | 28 | 1,8 | 58 | 68 | 48 |
| 9 | 9 | 29 | 1,9 | 59 | 69 | 49 |
| 10 | 0 | 20 | 1,0 | 50 | 60 | 40 |
| | В | А | Б | В | А | Б |

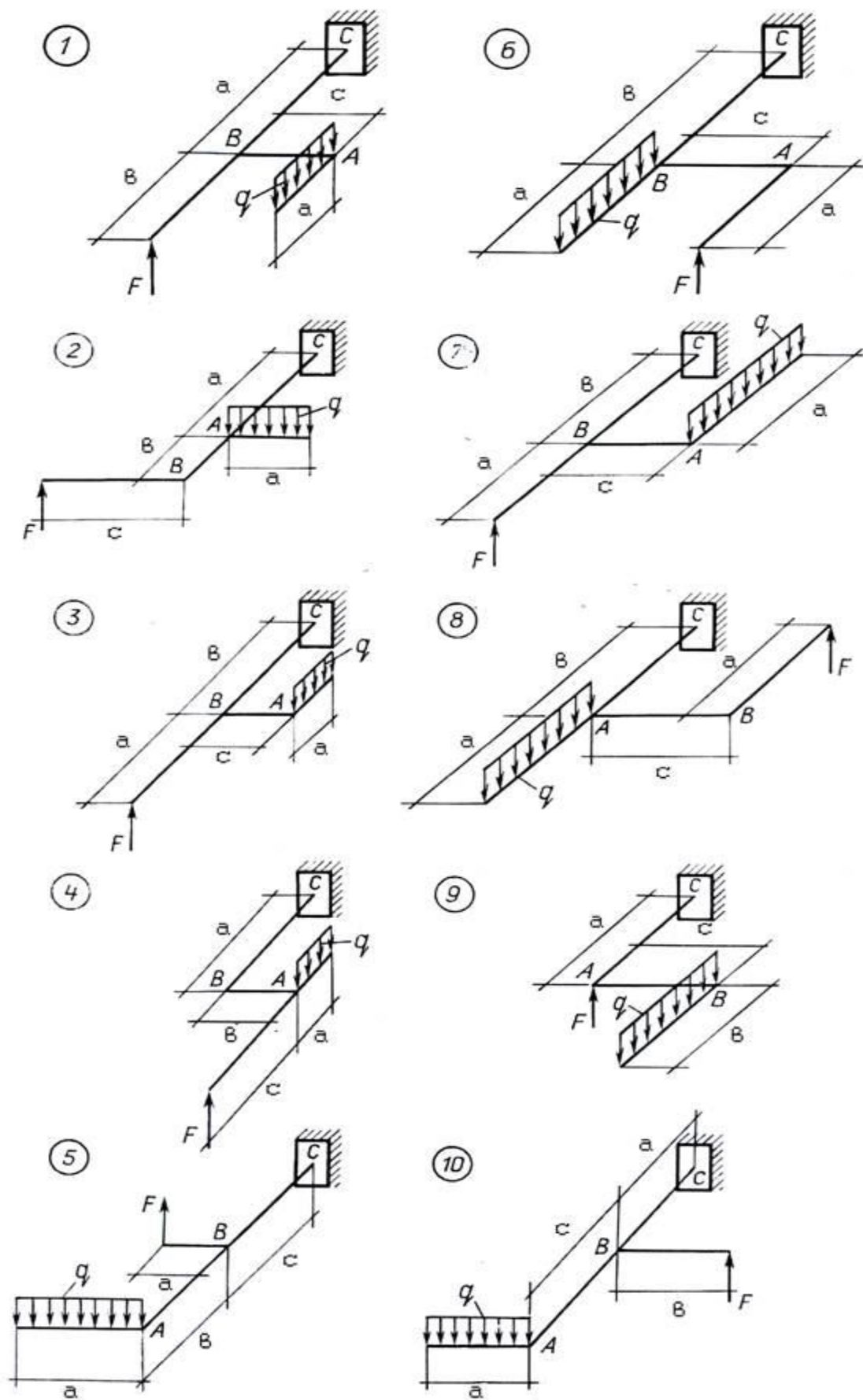


Рис. 10. Схема пространственного стержня

ЗАДАЧА 11

Стальной стержень (рис. 11а, б) сжимается силой F .

Требуется:

1. Найти размеры поперечного сечения, если $R = 210$ МПа. Расчет проводить последовательными приближениями, задавшись предварительно величиной коэффициента $\varphi = 0,5$.

2. Определить величину критической силы и коэффициент запаса устойчивости.

Данные взять из табл. 11.

Таблица 11

Расчетная схема и числовые данные для задачи 11

| Номер строки | Схема опорных закреплений | Тип сечения | F , кН | L , М |
|--------------|---------------------------|-------------|----------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 110 | 2,1 |
| 2 | 2 | 2 | 120 | 2,2 |
| 3 | 3 | 3 | 130 | 2,3 |
| 4 | 4 | 4 | 140 | 2,4 |
| 5 | 1 | 5 | 150 | 2,5 |
| 6 | 2 | 6 | 160 | 2,6 |
| 7 | 3 | 7 | 170 | 2,7 |
| 8 | 4 | 8 | 180 | 2,8 |
| 9 | 1 | 9 | 190 | 2,9 |
| 0 | 2 | 10 | 100 | 3,0 |
| | Б | В | А | Б |

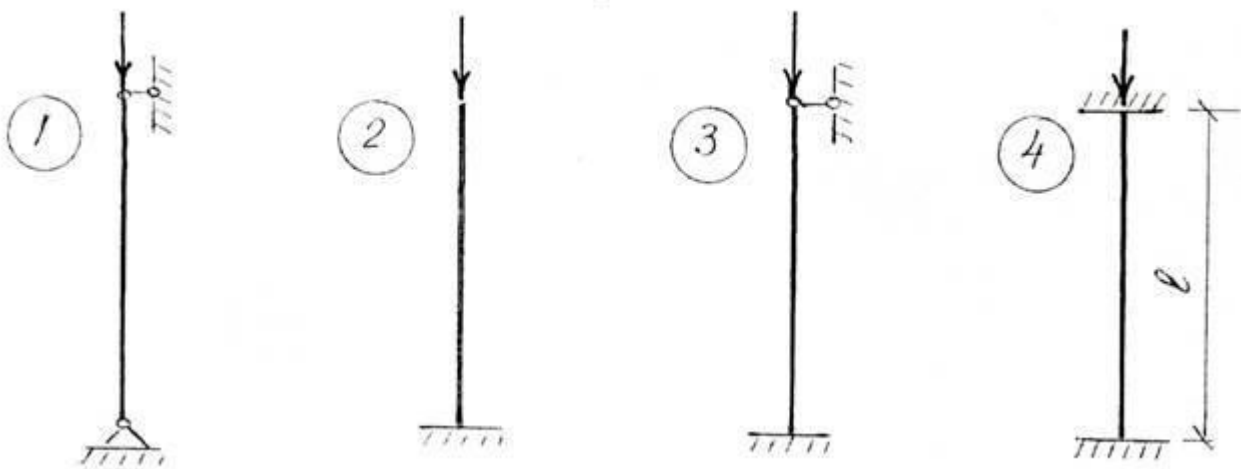


Рис. 11а. Схема опорных закреплений

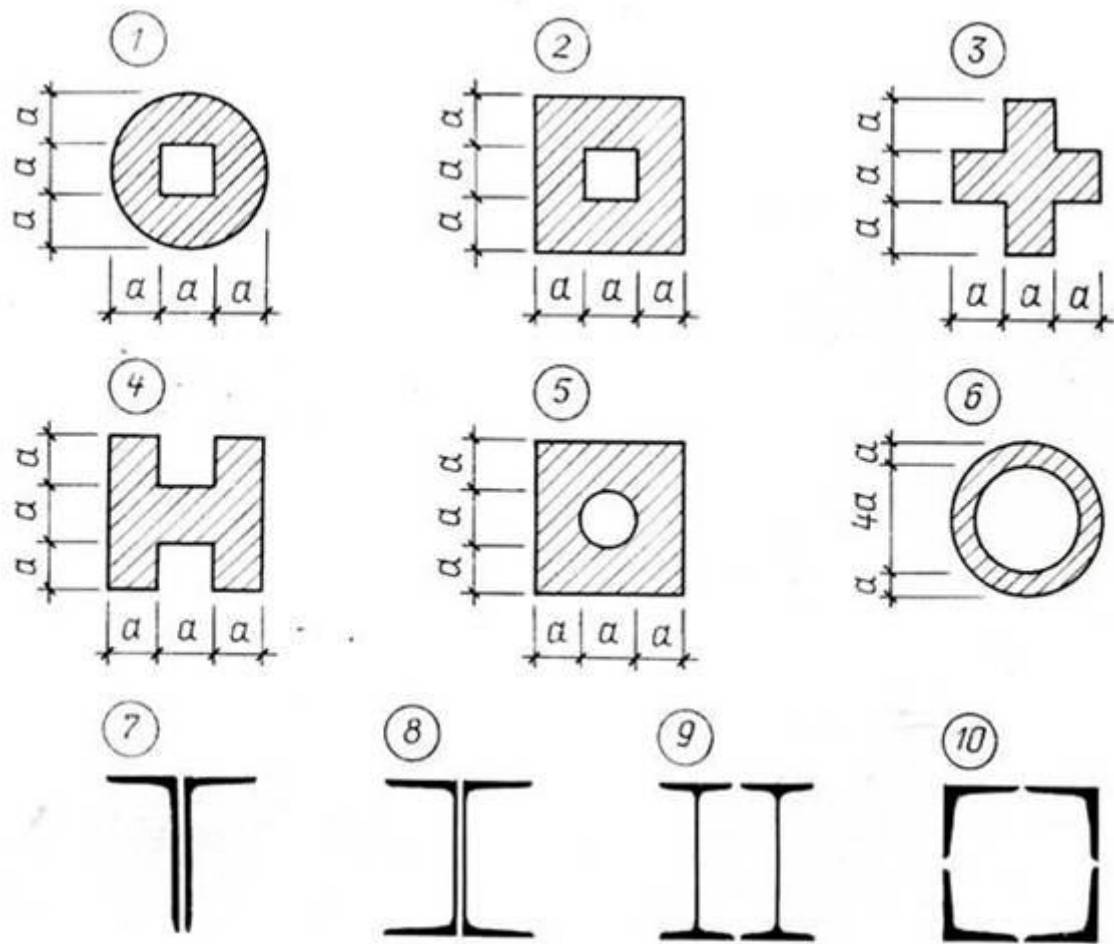


Рис. 116. Тип сечения

ЗАДАЧА 12

На двутавровую балку (рис.12) с высоты $H = 5$ см падает груз F .

Требуется:

1. Определить наибольшие нормальные напряжения в балке;
2. Вычислить наибольшие напряжения в балке при условии, что правая опора заменена пружиной, податливость которой (т.е. осадка от груза 1 кН) равна α ;
3. Сравнить полученные результаты.
Данные взять из табл.12

Таблица 12

Расчетная схема и числовые данные для задачи 12

| Номер строки | Схема | Номер двутавра | L, м | F, кН | α , мм/кН |
|--------------|-------|----------------|------|-------|------------------|
| 1 | 1 | 18 | 3,1 | 11 | 2,1 |
| 2 | 2 | 20 | 3,2 | 12 | 2,2 |
| 3 | 3 | 20а | 3,3 | 13 | 2,3 |
| 4 | 4 | 22 | 3,4 | 14 | 2,4 |
| 5 | 5 | 24 | 3,5 | 15 | 2,5 |
| 6 | 6 | 24а | 3,6 | 16 | 2,6 |
| 7 | 7 | 30 | 3,7 | 17 | 2,7 |
| 8 | 8 | 30а | 3,8 | 18 | 2,8 |
| 9 | 9 | 33 | 3,9 | 19 | 2,9 |
| 0 | 10 | 36 | 3,0 | 20 | 3,0 |
| | В | А | Б | В | А |

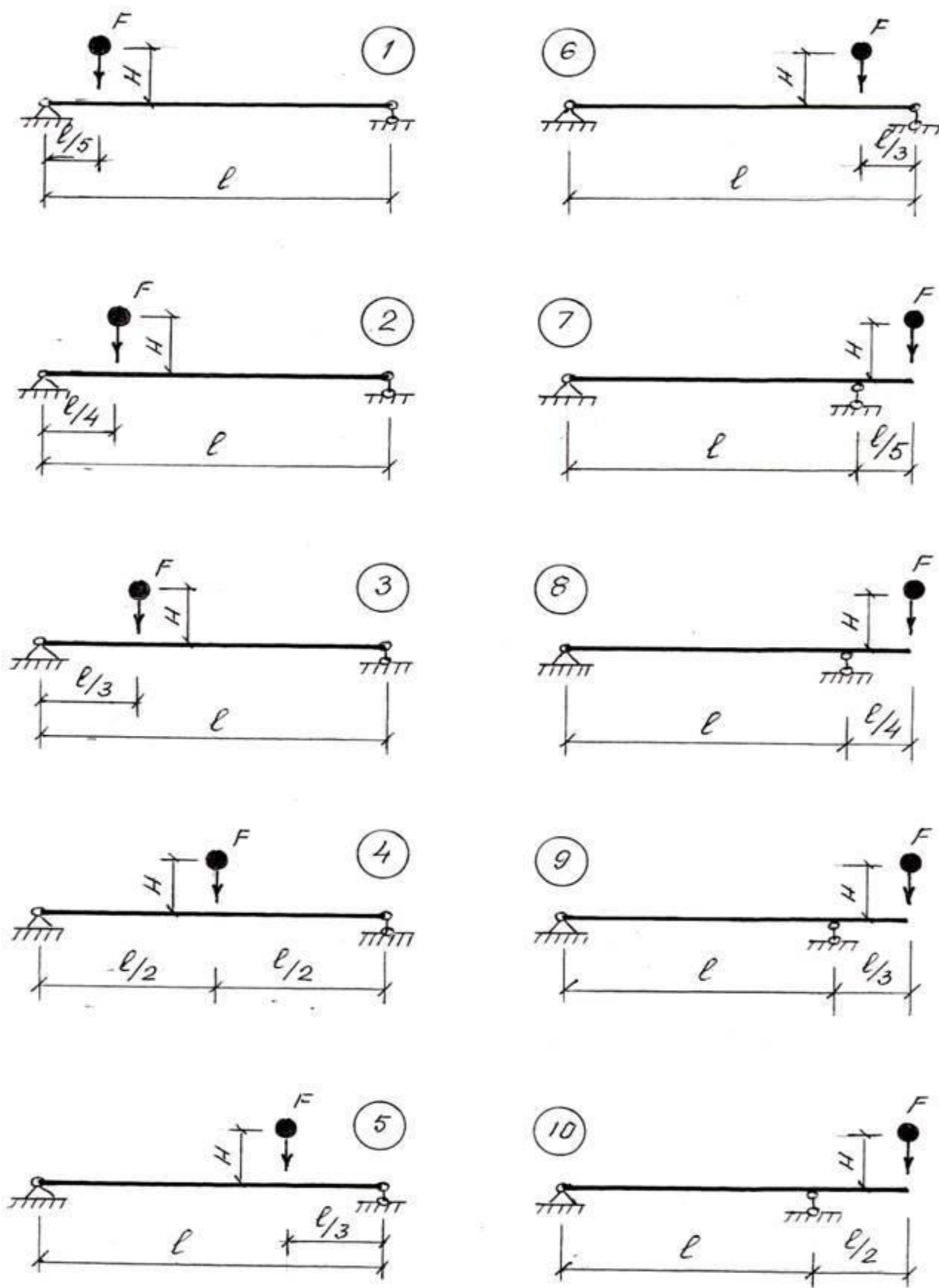


Рис. 12. Схема падения груза на двутавровую балку

ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. Заяц, В.Н. Сопротивление материалов / В.Н. Заяц, М.К. Балыкин, И.А. Голубев. - Мн., 1998.
2. Сопротивление материалов / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Н.М. Монахов [и др.] - М., 1975.
3. Дарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. - М., 1975.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

1. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. - М., 1976.
2. Степин, П.А. Сопротивление материалов / П.А. Степин. - М., 1983.
3. Справочник по сопротивлению материалов / Е.Ф. Винокуров, М.К. Балыкин [и др.] - Мн., 1988.
4. Сборник задач по сопротивлению материалов / А. А. Уманский, А.М. Афанасьев [и др.] - М., 1973.
5. Лабораторные работы по сопротивлению материалов для студентов строительных специальностей / М.К. Балыкин, В.А. Пенькевич [и др.] - Мн., 1991.