

**ОПД.Р.03 СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**  
Методические указания и схемы заданий  
для студентов очной формы обучения

Приводятся методические указания к выполнению расчетно-графических работ и схемы заданий к ним. Указания составлены с учетом специфики обучения студентов специальности 270301 – архитектура.

## ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса теоретической механики студенты выполняют шесть расчетно-графических работ (РГР):

в первом семестре обучения – РГР № 1, 2, 3;

во втором семестре обучения – РГР № 4, 5, 6.

## СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

**РГР № 1.** Определение реакций в связях плоских статически определимых расчетных схем.

*Задача № 1.1.* Определение реакций в связях шарнирно-консольной балки.

*Задача № 1.2.* Определение реакций в связях статически определимой рамы.

*Задача № 1.3.* Определение реакций в связях трехшарнирной рамы.

**РГР № 2.** Растяжение и сжатие.

*Задача № 2.1.* Определение усилий и напряжений при осевом растяжении (сжатии).

*Задача № 2.2.* Расчет плоской статически определимой балочной фермы.

**РГР № 3.** Плоский изгиб.

*Задача № 3.1.* Определение геометрических характеристик сложного и составного поперечных сечений стержней.

*Задача № 3.2.* Определение усилий в сечениях шарнирно-консольной балки.

*Задача № 3.3.* Определение усилий в сечениях статически определимой рамы.

*Задача № 3.4.* Определение усилий в сечениях трехшарнирной рамы.

**РГР № 4.** Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил.

**РГР № 5.** Расчет плоской статически неопределимой рамы методом перемещений.

**РГР № 6.** Расчет плоской рамы на устойчивость.

## **ПОРЯДОК ПОЛУЧЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗАДАНИЯ**

Исходные данные для выполнения каждой работы студент выписывает из таблиц в соответствии со своим учебным шифром. Шифром являются три последние цифры номера зачетной книжки или студенческого билета. Например, если номер зачетной книжки 05816, то учебный шифр – 816, при этом 8 – первая, 1 – вторая, 6 – третья цифры шифра.

**Работы, выполненные не по шифру, к проверке и защите не принимаются.**

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ**

Расчетно-графические работы должны быть оформлены на стандартных листах белой бумаги формата А3 (297×420) с соблюдением ГОСТ. При оформлении работы в компьютерном варианте допускается использование стандартных листов белой бумаги формата А4 (210×297), если она полностью выполнена на компьютере. Образцы оформления стандартных листов даны в прил. 11 и 12. Оформление работ на бумаге других форматов не допускается.

На титульном листе обязательно указываются номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента и шифр.

Прежде чем начинать решение задачи, необходимо вычертить в масштабе заданную расчетную схему и указать на ней все исходные числовые данные.

Решение задач необходимо сопровождать краткими пояснениями, всеми необходимыми расчетами и четкими схемами с указанием в необходимых случаях масштабов длин и сил.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

### Определение реакций в связях плоских статически определимых расчетных схем

#### *Задача 1.1. Определение реакций в связях шарнирно-консольной балки*

Литература: [1, с. 74–85], [3, с. 54–59], [4, с. 16–20].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.1 и схемам, представленным на рис. 1.1 и 1.2.

#### **Задание**

- Определить реакции в промежуточных шарнирах балки и в опорных связях.

#### *Последовательность расчета*

1.1.1. Изобразить в масштабе схему балки с указанием размеров и действующих нагрузок.

1.1.2. Произвести анализ геометрической неизменяемости заданной схемы балки, для чего использовать выражение, представляющее собой необходимое условие геометрической неизменяемости шарнирно-консольной балки,

$$Ш = С - 3,$$

где Ш – число промежуточных шарниров; С – количество опорных связей.

Выполнить кинематический анализ расчетной схемы, построив поэтажную схему взаимодействия отдельных дисков.

1.1.3. Показать схему взаимодействия отдельных дисков, расчленив заданную схему на главные и второстепенные балки, и определить реакции в связях от заданной нагрузки, составляя уравнения равнове-

Таблица 1.1

Исходные данные к задаче 1.1 РГР № 1

Первая цифра шифра	$l_1$ , м	$q_1$ , кН/м	$F_1$ , кН	Вторая цифра шифра	$l_2$ , м	$l_3$ , м	$q_1$ , кН/м	$q_2$ , кН/м	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$a$ , м	$b$ , м	$c$ , м
0	12	20	80	0	12	15	20	0	60	0	0	2	3	4
1	16	15	60	1	15	18	0	20	0	60	1	3	4	2
2	18	25	40	2	18	12	30	0	80	0	2	4	2	3
3	12	30	80	3	12	15	0	30	0	80	3	2	3	4
4	15	36	50	4	15	18	15	0	90	0	4	3	4	2
5	12	24	30	5	15	12	0	15	0	90	5	4	2	3
6	16	12	90	6	12	15	25	0	50	0	6	2	3	4
7	18	18	120	7	15	18	0	24	0	50	7	3	4	2
8	12	16	100	8	18	12	30	0	40	0	8	4	2	3
9	15	40	140	9	12	15	0	25	0	40	9	3	3	4

сия для каждого диска. Порядок рассмотрения дисков – сверху вниз по поэтажной схеме.

1.1.4. Показать схему взаимодействия отдельных дисков с найденными реакциями в связях.

1.1.5. Произвести проверку правильности определения реакций в связях из условия равновесия всей расчетной схемы.

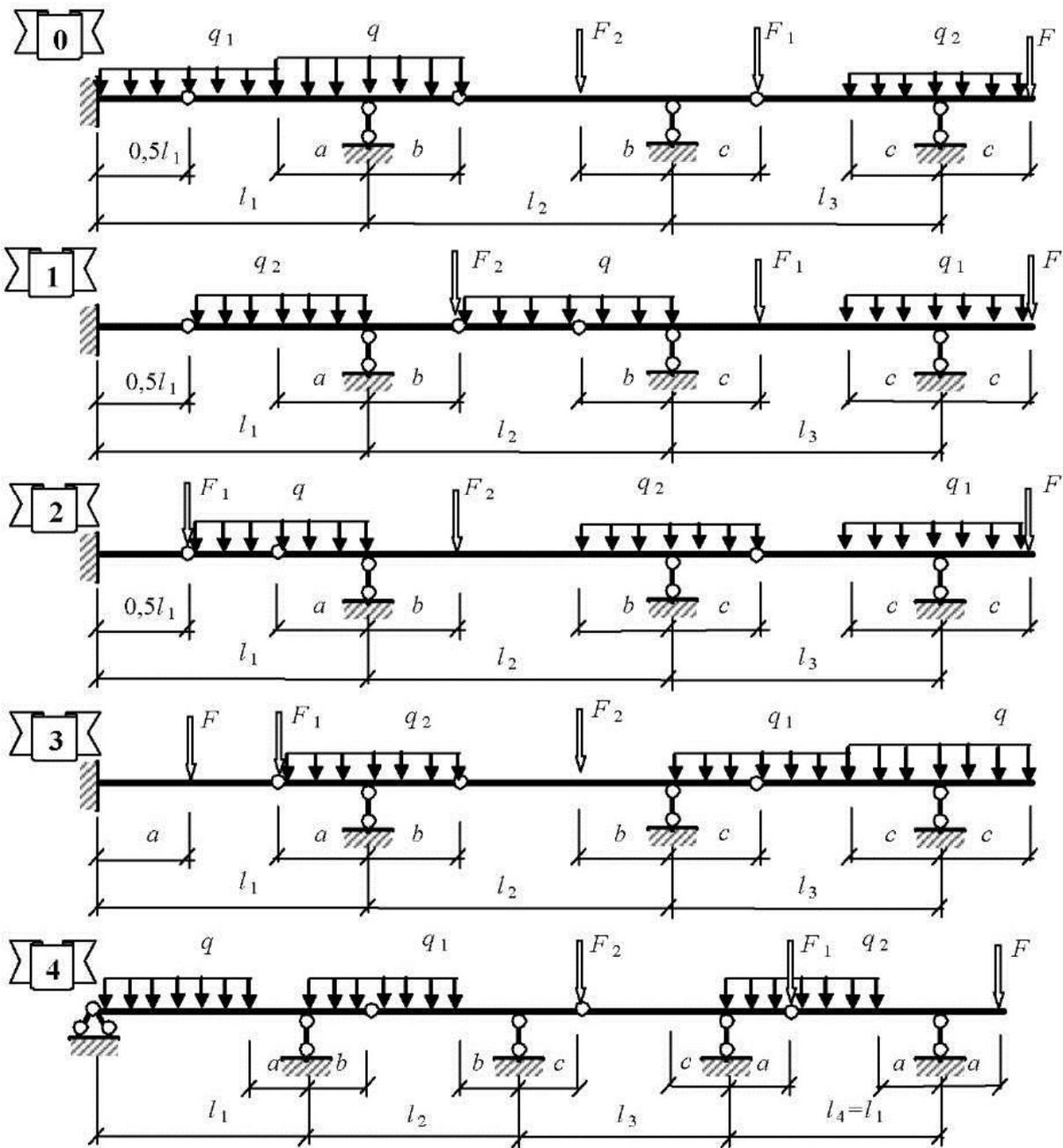


Рис. 1.1. Расчетные схемы 0–4 шарнирно-консольных балок к задачам 1.1 и 2.1

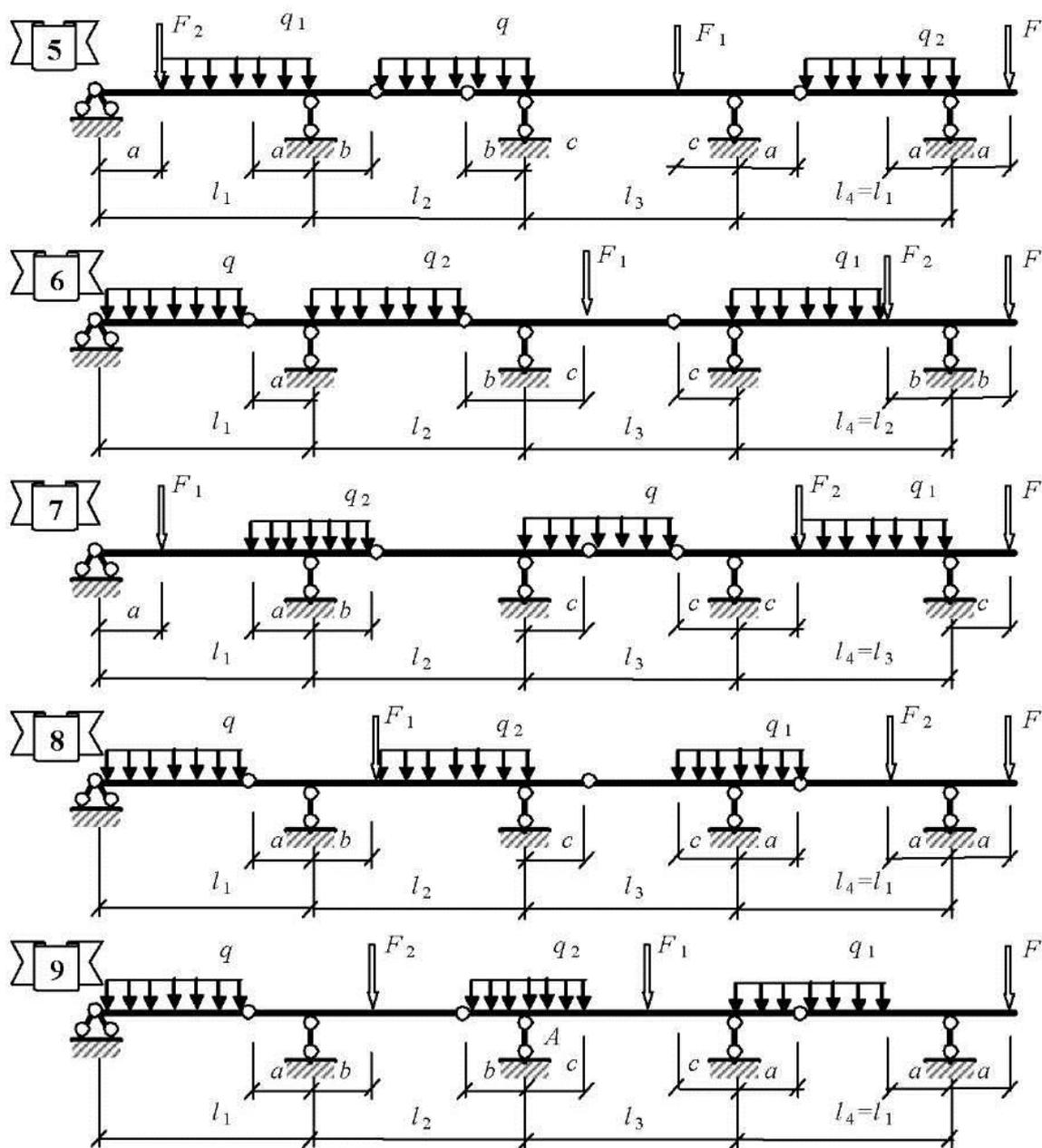


Рис. 1.2. Расчетные схемы 5–9 шарнирно-консольных балок к задачам 1.1 и 2.1

**Задача 1.2. Определение реакций в связях статически определимой рамы**

Литература: [1, с. 97–104], [3, с. 63–66], [4, с. 9–11, 22–30].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.2 и схемам, представленным на рис. 1.3.

## Задание

- Определить реакции в связях между дисками расчетной схемы и в опорных связях.

Таблица 1.2

Исходные данные к задаче 1.2 РГР № 1

Первая цифра шифра	$M_1$ , кН·м	$M_2$ , кН·м	Вторая цифра шифра	$q$ , кН/м	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	$F_3$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м
0	80	0	0	10	60	0	80	0	12	5
1	160	160	1	15	80	120	0	1	10	4
2	100	0	2	20	100	0	100	2	8	6
3	140	140	3	25	120	160	0	3	8	3
4	120	0	4	30	160	0	120	4	16	6
5	100	120	5	16	80	200	0	5	14	5
6	140	0	6	15	100	0	140	6	8	4
7	80	100	7	24	120	240	0	7	10	5
8	160	0	8	18	160	0	160	8	14	6
9	120	80	9	336	60	300	0	9	8	4

### Последовательность расчета

1.2.1. Произвести анализ геометрической неизменяемости заданной расчетной схемы.

Необходимым, но недостаточным условием геометрической неизменяемости, является выражение

$$3Д - 2Ш - C_{оп} = 0,$$

где  $Д$  – количество дисков в расчетной схеме;  $Ш$  – количество простых шарниров или число связей, необходимых до полного защемления;  $C_{оп}$  – количество опорных связей.

Достаточное условие геометрической неизменяемости проверяется анализом геометрической структуры расчетной схемы.

1.2.2. Показать расчетную схему для определения реакций внутренних связей. С этой целью расчетная схема расчленяется на отдельные диски и устанавливается схема их взаимодействия.

1.2.3. Определить величины реакций в связях из уравнений равновесия отдельных частей расчетной схемы.

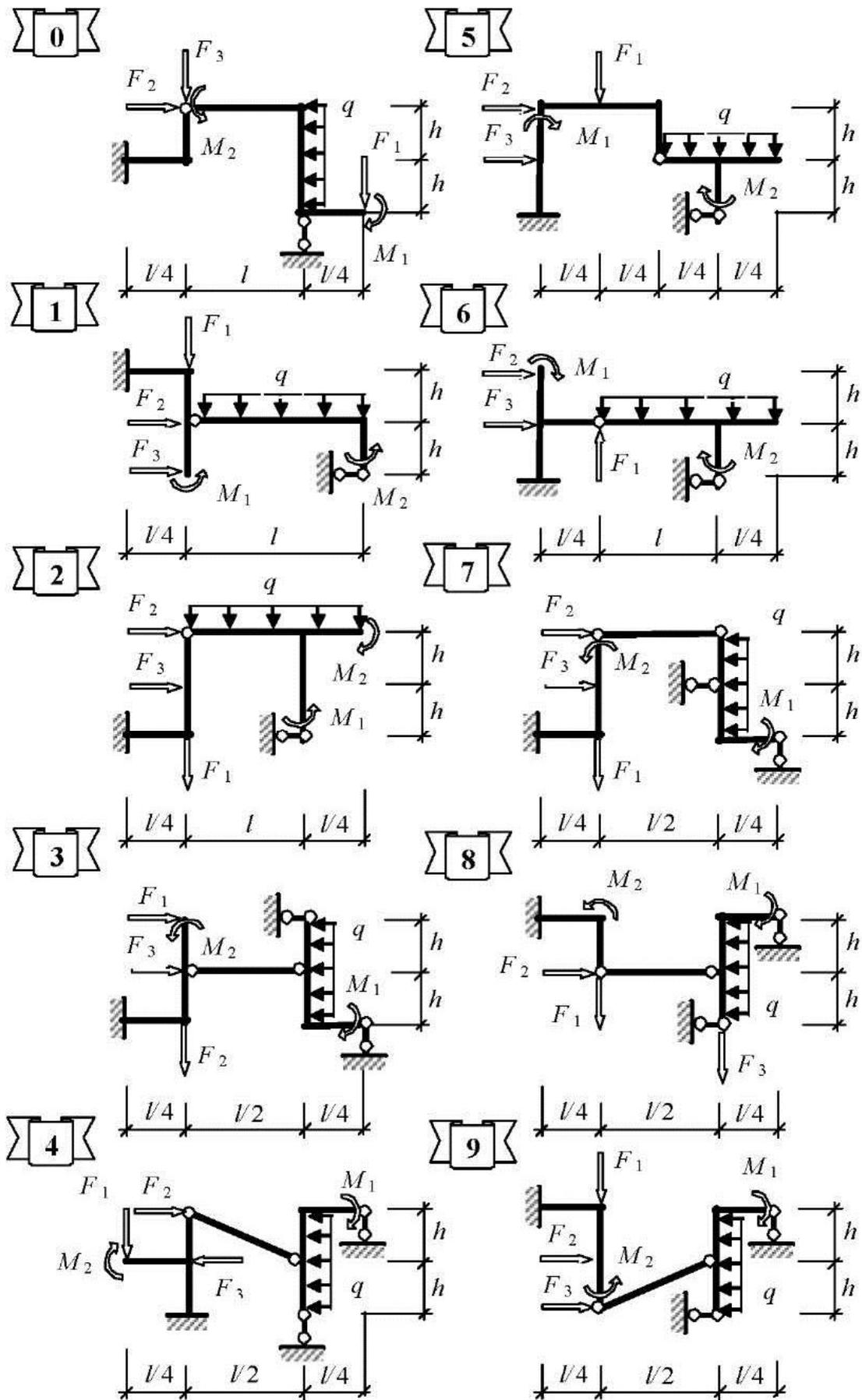


Рис. 1.3. Расчетные схемы к задаче 1.2

1.2.4. Произвести проверку правильности определения реакций из условия равновесия всей расчетной схемы.

### **Задача 1.3. Определение реакций в связях трехшарнирной рамы**

Литература: [1, с. 86–97], [3, с. 120–151], [4, с. 30–43].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.3 и схемам, представленным на рис. 1.4

#### **Задание**

- Определить реакции в опорных связях трехшарнирной рамы.

Таблица 1.3

**Исходные данные к задаче 1.3 РГР № 1**

Первая цифра шифра	$q$ , кН/м	Вторая цифра шифра	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м
0	10	0	60	0	0	8	4
1	12	1	0	60	1	16	8
2	16	2	80	0	2	12	6
3	18	3	0	80	3	10	5
4	8	4	100	0	4	14	6
5	20	5	0	100	5	16	8
6	24	6	120	0	6	16	3
7	36	7	0	120	7	14	5
8	32	8	160	0	8	12	4
9	14	9	0	160	9	10	4

#### *Последовательность расчета*

1.3.1. Показать расчетную схему для определения опорных реакций.

1.3.2. Определить величины вертикальных опорных реакций из уравнений равновесия:  $\sum M_A = 0$  и  $\sum M_B = 0$ , где  $A$  и  $B$  – опорные точки расчетной схемы.

1.3.3. Используя теорему Вариньона, определить горизонтальные опорные реакции из уравнений:  $\sum M_C^{\text{лев}} = 0$  и  $\sum M_C^{\text{прав}} = 0$ , где  $C$  – ключевой шарнир расчетной схемы.

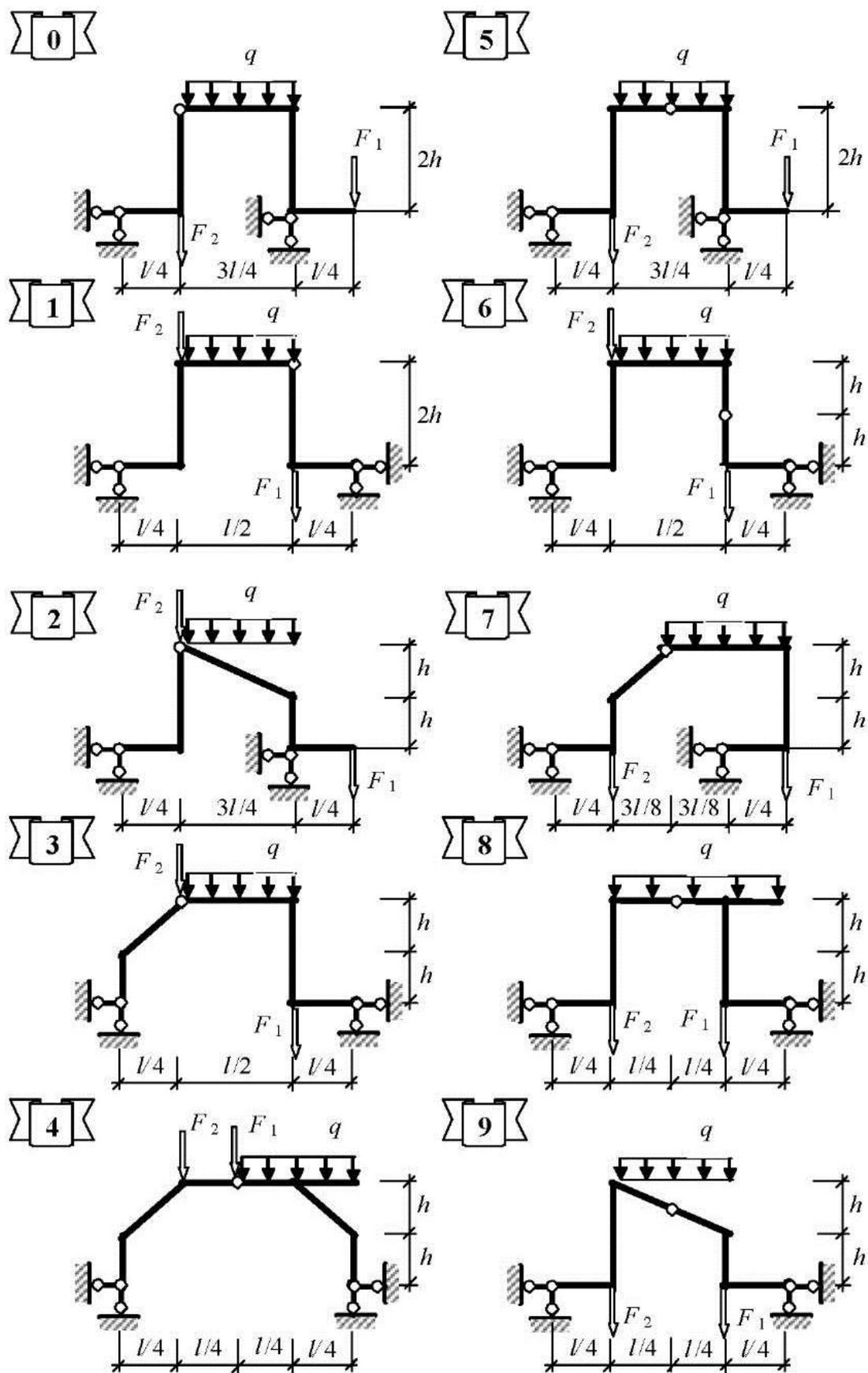


Рис. 1.4. Расчетные схемы к задаче 1.3

1.3.4. Произвести проверку правильности определения опорных реакций, используя уравнения равновесия  $\sum X = 0$  и  $\sum Y = 0$ .

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### Растяжение и сжатие

#### *Задача 2.1. Определение усилий и напряжений при осевом растяжении (сжатии)*

Литература: [1, с. 54–59], [2, с. 16–20], [3, с. 98–101], [4, с. 12–21].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 2.1 и схемам, представленным на рис. 2.1.

#### Задание

- Определить продольные усилия при заданной осевой нагрузке на стержень.
- Определить нормальные напряжения в расчетных сечениях стержня.
- Построить эпюру продольных деформаций стержня при  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа.

*Таблица 2.1*

**Исходные данные к задаче 2.1 РГР № 2**

Первая цифра шифра	$A_{1,2}$ , см <sup>2</sup>	$F_1$ , кН	Вторая цифра шифра	$F_2$ , кН	$F_3$ , кН	$F_4$ , кН	Третья цифра шифра	№ схемы	$F_5$ , кН	$A_{2,2}$ , см <sup>2</sup>	$A_{3,2}$ , см <sup>2</sup>	$l$ , м
0	12	100	0	-120	150	0	0	1	100	36	25	4
1	16	120	1	150	0	180	1	2	-120	32	15	2
2	18	130	2	-180	90	0	2	1	130	30	10	3
3	20	150	3	0	150	-180	3	2	-150	28	10	4
4	24	160	4	200	-180	0	4	1	160	26	15	2
5	25	180	5	-200	0	160	5	2	-180	24	25	3
6	28	200	6	0	240	-200	6	1	-200	22	15	4
7	30	220	7	220	200	0	7	2	220	20	10	2
8	32	240	8	-240	0	220	8	1	-240	18	20	3
9	36	250	9	0	220	-240	9	1	250	16	25	4

*Примечание.* Знак минус (–) означает, что заданная сила направлена в противоположную сторону.

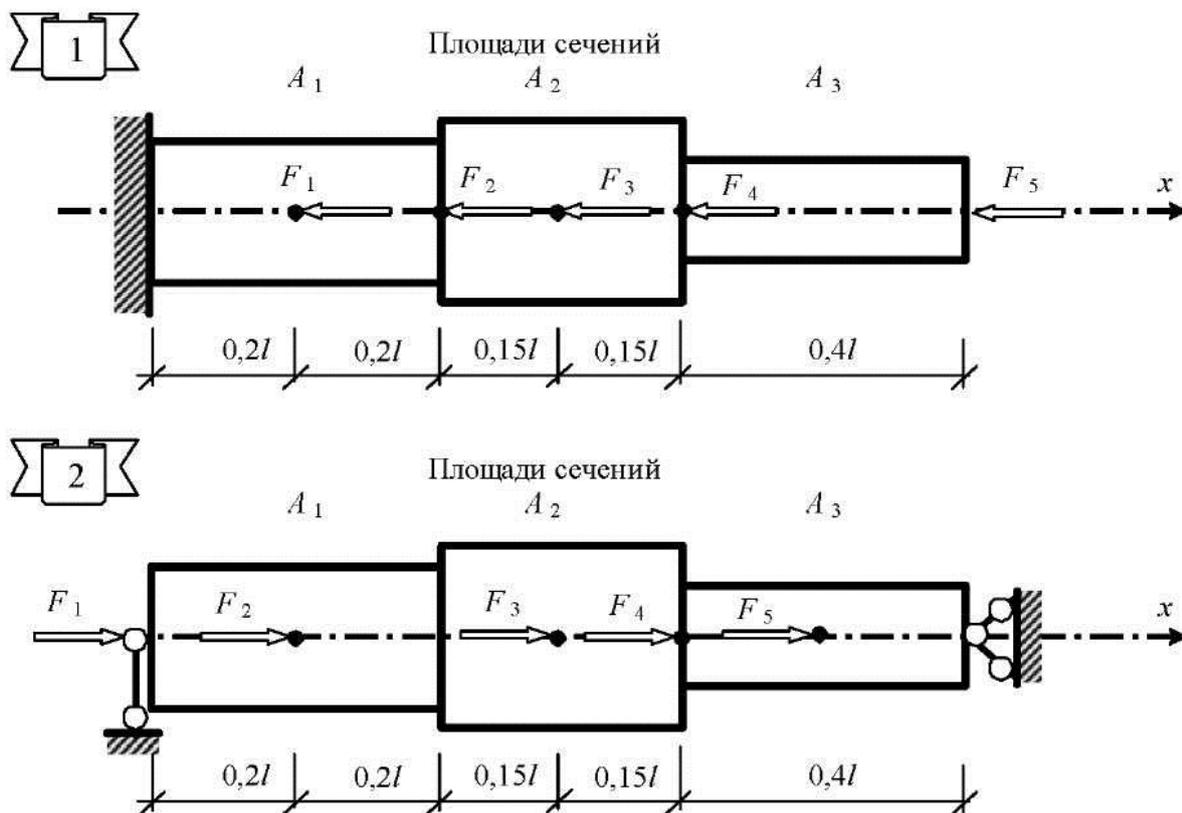


Рис. 2.1. Расчетные схемы к задаче 2.1

### Последовательность расчета

2.1.1. Изобразить в масштабе расчетную схему стержня с указанием размеров и показать действующую осевую нагрузку.

2.1.2. Определить продольные силы на каждом расчетном участке стержня и построить эпюры  $N_F$ .

2.1.3. Определить нормальные напряжения в сечениях каждого расчетного участка и построить эпюру  $\sigma_x$ .

2.1.4. Определить величины продольных деформаций каждого расчетного участка стержня, построить эпюру продольных деформаций  $u$  (мм) и определить изменение длины всего стержня

$$\Delta l = \sum_{i=1}^n \frac{N_i l_i}{E_i A_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i l_i}{E_i},$$

где  $n$  – число расчетных сечений стержня.

## **Задача 2.2. Расчет плоской статически определимой балочной фермы**

Литература: [1, с. 120–151], [2, с. 30–43], [3, с. 104–116], [4, с. 54–64].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 2.2 и схемам, представленным на рис. 2.2.

### **Задание**

- Определить усилия во всех стержнях фермы.
- Подобрать сечение нижнего пояса фермы по наибольшему усилию в двух вариантах:
  - из соснового бруса с соотношением сторон  $h/b = 1,5$ ;
  - из двух неравнополочных уголков (прил. 6) из стали марки С245.

*Таблица 2.2*

**Исходные данные к задаче 2.2 РГР № 2**

Вторая цифра шифра	$F$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$d$ , м	$h$ , м
0	24	0	3	2
1	36	1	5	2,5
2	40	2	4	2
3	48	3	6	3
4	56	4	4	3
5	64	5	6	2,25
6	72	6	4	2
7	50	7	6	2
8	62	8	6	3
9	80	9	4	1,5

### *Последовательность расчета*

2.2.1. Изобразить в масштабе расчетную схему фермы с указанием размеров и показать вертикальную узловую нагрузку.

2.2.2. Произвести анализ геометрической неизменяемости заданной схемы фермы.

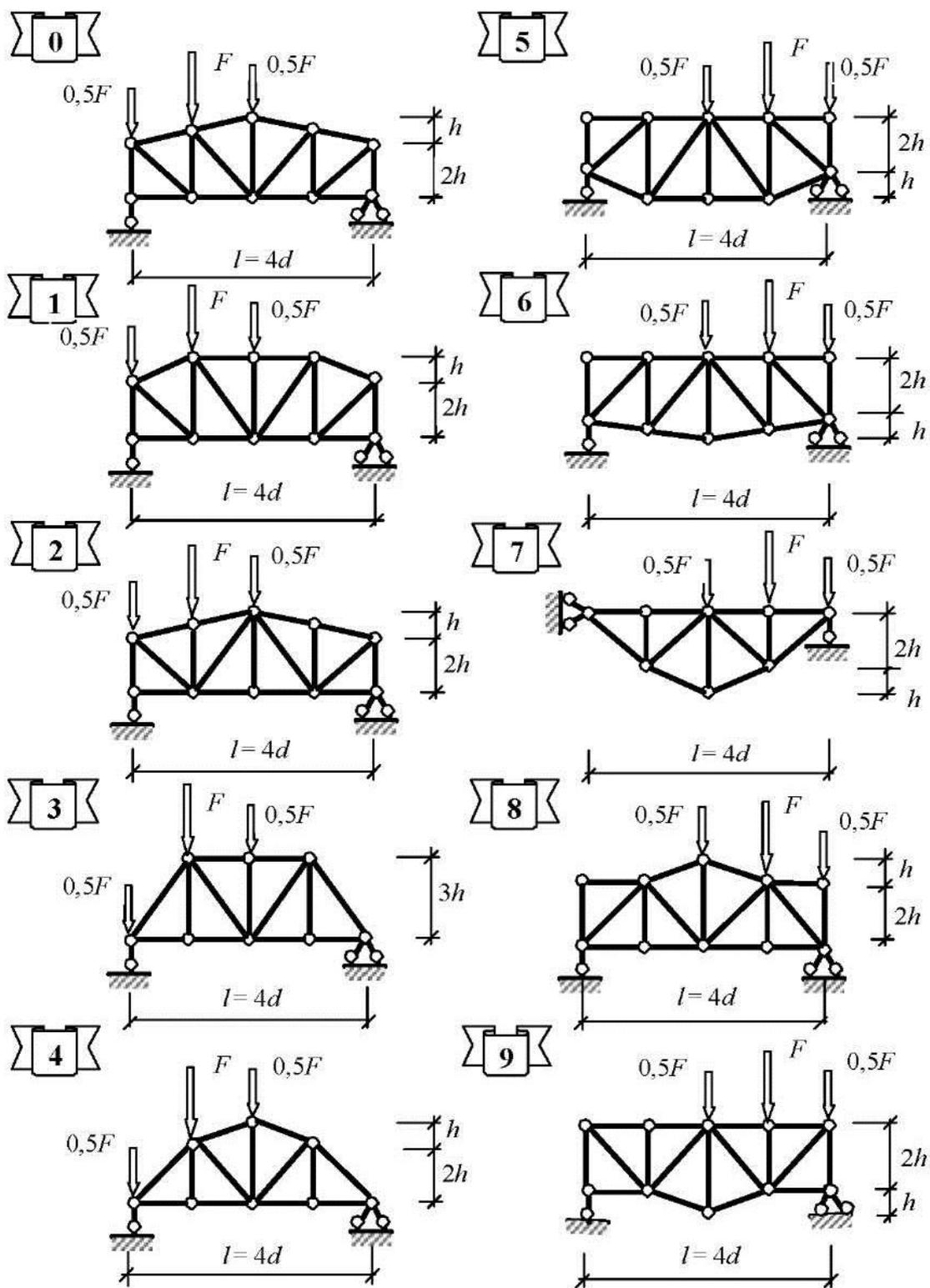


Рис. 2.2. Расчетные схемы к задаче 2.2

Необходимое и достаточное условие геометрической неизменяемости простейших по структуре образования ферм заключается в выполнении условия

$$C = 2U,$$

где  $C$  – количество стержней фермы, включая опорные;  $U$  – количество узлов.

2.2.3. Аналитически определить опорные реакции.

2.2.4. Используя способ сечений, а при необходимости – способ вырезания узлов, аналитически определить усилия во всех стержнях фермы.

2.2.5. Подобрать сечение нижнего пояса по наибольшему усилию для двух типов сечений, указанных в задании. Требуемую площадь сечения определить из условия прочности:

$$A_{\text{тр}} \geq \frac{N_{\text{max}}}{R}.$$

Значения расчетных сопротивлений принять по прил. 2 и 3.

2.2.6. Произвести сравнение полученных результатов по расходу материала и весу.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

### Плоский изгиб

#### *Задача 3.1. Определение геометрических характеристик поперечных сечений стержней*

Литература: [1, с. 54–59], [2, с. 16–20], [3, с. 98–101], [4, с. 12–21].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 3.1 и схемам, представленным на рис. 3.1.

**Указание.** Для всех типов сечений, показанных на рис. 3.1, принять следующее обозначение главных осей: по вертикали – ось  $y$ ; по горизонтали – ось  $z$ .

#### **Задание**

- Определить геометрические характеристики сложного сечения с одной осью симметрии.
- Определить геометрические характеристики составного сечения из стального проката с двумя осями симметрии.

## Последовательность расчета

### Определение геометрических характеристик сложного сечения

3.1.1. Изобразить в масштабе заданное сечение и определить направление имеющейся оси симметрии (первая главная центральная ось).

3.1.2. Разбить поперечное сечение на простейшие геометрические фигуры и подсчитать их площади  $A_i$  ( $i$  – номер простейшей площади), а также всю площадь сечения  $A = \sum A_i$ .

3.1.3. Выбрать произвольную ось  $u$ , перпендикулярную имеющейся главной оси, и определить расстояния от нее до центров тяжести простейших фигур  $z_i$  или  $y_i$  в зависимости от того, какая из осей ( $z$  или  $y$ ) является главной центральной.

Таблица 3.1

**Исходные данные к задаче 3.1 РГР № 3**

Первая цифра шифра	$t$ , см	Позиция 1 (двутавр)	Вторая цифра шифра	$d$ , см	Позиция 2 (швеллер)	Третья цифра шифра (№ схемы)	Позиции		
							3	4	5
							полоса		уголок
0	10	№ 20	0	12	№ 16	0	200×10	–	100×63×6
1	12	№ 22	1	14	№ 18	1	–	300×10	–
2	16	№ 24	2	16	№ 20	2	–	320×12	–
3	8	№ 27	3	18	№ 22	3	–	–	–
4	10	№ 30	4	12	№ 24	4	–	–	–
5	8	№ 40	5	14	№ 27	5	–	250×8	–
6	12	№ 45	6	16	№ 30	6	300×10	300×8	125×80×7
7	16	№ 50	7	18	№ 33	7	–	320×8	–
8	8	№ 18	8	14	№ 36	8	–	360×12	–
9	12	№ 16	9	12	№ 40	9	340×12	400×12	140×90×10

*Примечание.* Размеры для позиций 3, 4 и 5 проката указаны в мм.

3.1.4. Определить координату центра тяжести сечения по формулам

$$z_c = \frac{S_u}{A} = \frac{\sum A_i z_i}{A} \quad \text{или} \quad y_c = \frac{S_u}{A} = \frac{\sum A_i y_i}{A},$$

где  $S_u$  – статический момент площади сечения относительно произвольно выбранной оси  $u$ .

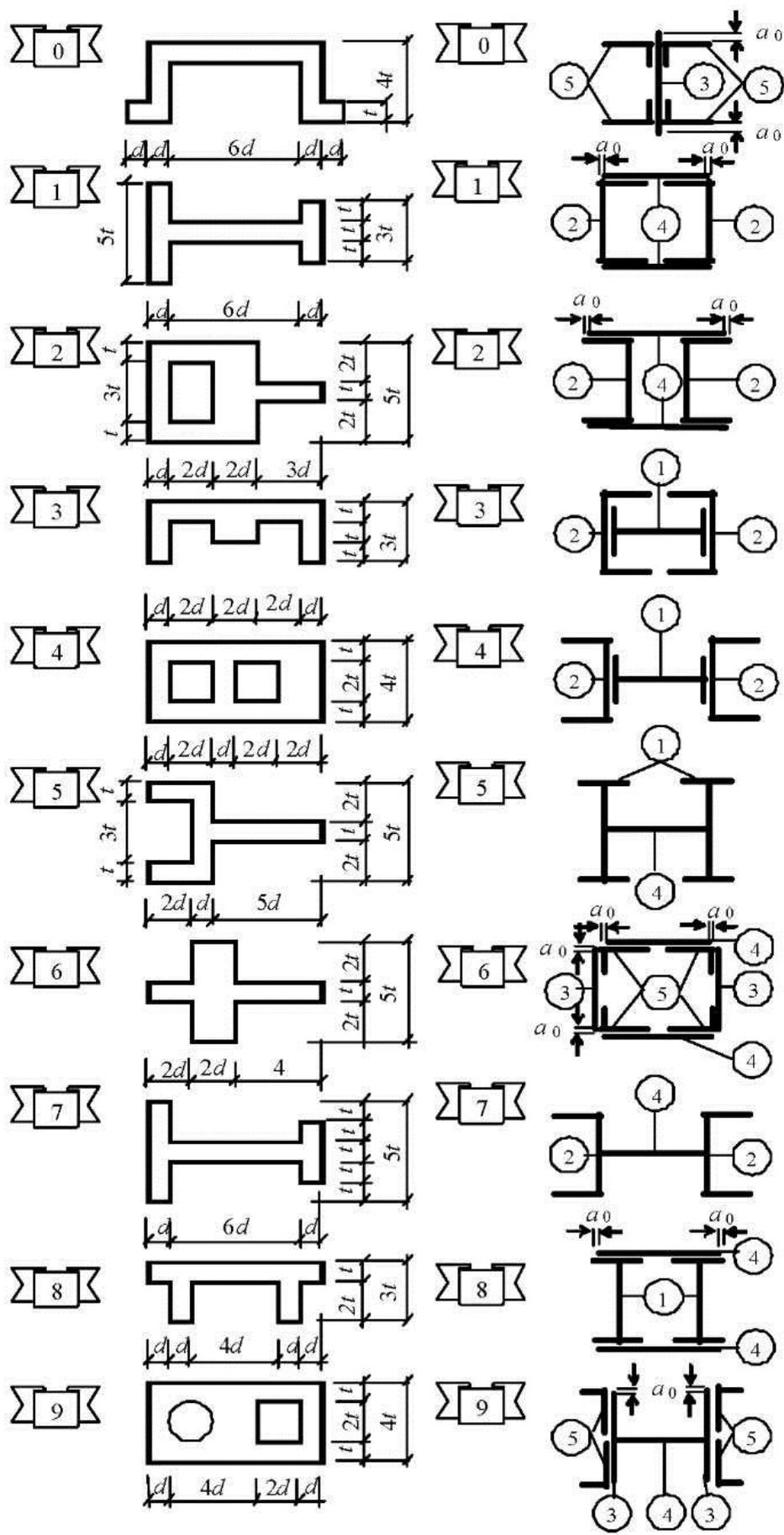


Рис. 3.1. Расчетные схемы к задаче 3.1

3.1.5. Через центр тяжести сечения провести вторую главную центральную ось, перпендикулярную первой.

3.1.6. В полученной системе координат ( $z_0y$ ) с началом в центре тяжести сечения определить координаты  $z_i$  и  $y_i$  центров тяжести простейших фигур, из которых составлено сечение.

3.1.7. Определить главные центральные моменты инерции сечения по формулам

$$I_y = \sum (I_{yi} + z_i^2 A_i) \text{ и } I_z = \sum (I_{zi} + y_i^2 A_i),$$

где  $I_{yi}$  и  $I_{zi}$  – моменты инерции  $i$ -й фигуры относительно собственных центральных осей.

3.1.8. Определить моменты сопротивления сечения по формулам

$$W_y = \frac{I_y}{z_{\max}} \text{ и } W_z = \frac{I_z}{y_{\max}}.$$

3.1.9. Определить радиусы инерции сечения по формулам

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \text{ и } i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}.$$

#### *Определение геометрических характеристик составного сечения*

3.1.10. Согласно заданной схеме выписать из прил. 4, 5 и 6 необходимые значения геометрических характеристик для прокатных профилей, входящих в составное сечение.

3.1.11. Скомпоновать сечение и вычертить его в масштабе. При компоновке сечения для схем, имеющих в своем составе полосы, принять расстояние  $a_0$  от кромки полосы до крайней точки профиля из условия

$$t \leq a_0 \leq 1,5 t,$$

где  $t$  – толщина полки двутавра (швеллера) или толщина полки уголка.

3.1.12. Показать направления главных центральных осей сечения и положение его центра тяжести.

3.1.13. Дальнейшие расчеты произвести аналогично пп. 3.1.6–3.1.9.

### **Задача 3.2. Определение усилий в сечениях шарнирно-консольной балки**

Литература: [1, с. 54–59], [2, с. 16–20], [3, с. 98–101], [4, с. 12–21].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.1 и схемам, представленным на рис. 1.1 и 1.2 (см. задачу 1.1 РГР № 1).

#### **Задание**

- Построить эпюры изгибающих моментов  $M_F$  и поперечных сил  $Q_F$ .
- Для основного диска произвести подбор сечения из прокатного двутавра из стали С245.

#### *Последовательность расчета*

3.2.1. Изобразить в масштабе схему балки с указанием размеров и действующих нагрузок.

3.2.2. Изобразить поэтажную схему балки с указанием всех реакций в связях, определенных при выполнении задачи 1.1.

3.2.3. Построить эпюры поперечных сил  $Q_F$  и изгибающих моментов  $M_F$  для отдельных дисков с последующим их объединением для всей расчетной схемы.

При построении эпюр усилий и их проверке необходимо использовать дифференциальные зависимости при плоском изгибе

$$Q = \frac{dM}{dx} \text{ и } q = -\frac{dQ}{dx}$$

и вытекающие из них аналитические и графические правила.

3.2.4. Определить положение опасных сечений и точек в этих сечениях основного диска.

Для балок двутаврового сечения опасными являются три точки:

- Крайние по высоте балки точки, расположенные в сечении, где изгибающий момент достигает максимального значения. В этих точках действуют максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{\max}$ , а касательные напряжения  $t$  равны нулю (точки 1 и 1').
- Точка 2, расположенная на нейтральной линии в сечении, где действует наибольшая по абсолютной величине поперечная сила. В этой точке возникает наибольшее касательное напря-

жение  $\tau_{\max}$  (знак его совпадает со знаком поперечной силы), а нормальное напряжение равно нулю.

- Точка 3, расположенная на границе между полкой и стенкой в сечении, где изгибающий момент и поперечная сила достаточно велики. В этой точке действуют нормальные и касательные напряжения.

Положение опасных точек следует показать на фасаде балки в рассматриваемом опасном сечении.

### 3.2.5. Произвести подбор сечения основного диска балки.

Подбор сечения производится из условия прочности (первое предельное состояние) в точках, где действуют наибольшие нормальные напряжения  $\sigma_{\max}$ . В этих точках имеет место линейное напряженное состояние, и условие прочности принимает вид

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq R_y \gamma_c.$$

*Примечание.* При выполнении данной задачи коэффициент условия работы  $\gamma_c$  принять равным 1.

Тогда требуемый момент сопротивления сечения двутавровой балки будет равен

$$W_z^{\text{тп}} \geq \frac{M_{\max}}{R_y \gamma_c},$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали (прил. 2).

По сортаменту прокатной стали (прил. 4) подобрать необходимый номер двутавра с моментом сопротивления  $W_z \geq W_z^{\text{тп}}$ , близким к требуемому, и для него выписать значения геометрических характеристик  $I_z$ ,  $S_z^0$ ,  $h$ ,  $s$  и  $t$ .

Если  $W_z^{\text{тп}}$  превышает момент сопротивления наибольшего по сортаменту профиля (двутавр № 70), то сечение балки следует запроектировать из нескольких двутавров, поставленных рядом. Все характеристики такого сечения ( $I_z$ ,  $W_z$ ,  $S_z^0$ ,  $s$ ) будут равны соответствующим характеристикам одного двутавра, увеличенным в  $n$  раз, где  $n$  – число двутавров в сечении балки.

3.2.6. Произвести проверку прочности балки принятого сечения по опасным точкам.

Поскольку  $W_z \geq W_z^{\text{тп}}$ , прочность в опасной точке 1 обеспечена.

Во 2-й и 3-й опасных точках имеет место плоское напряженное состояние. Условие прочности по IV теории прочности при плоском изгибе имеет вид

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq R_y \gamma_c.$$

Данное условие прочности в полном виде используется для точки 3, в которой

$$\sigma = \frac{M}{I_z} y = \frac{M}{I_z} (0,5h - t); \quad \tau = \frac{Q S_z^0}{s I_z} = \frac{0,5 Q t b (h - t)}{s I_z},$$

где  $S_z^0$  – статический момент отсеченной части сечения сверху от точки 3.

Для точки 2, так как  $\sigma = 0$ , условие прочности принимает вид

$$\sqrt{3\tau^2} \leq R_y \gamma_c,$$

где  $\tau = \frac{Q S_z^0}{s I_z}$  при  $S_z^0$ , взятом для половины высоты сечения (по сортаменту).

### ***Задача 3.3. Определение усилий в сечениях статически определимой рамы***

Литература: [1, с. 54–59], [2, с. 16–20], [3, с. 98–101], [4, с. 12–21].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.2 и схемам, представленным на рис. 1.3 (см. задачу 1.2 РГР № 1).

**Задание**

- Построить эпюры изгибающих моментов  $M_F$ , поперечных сил  $Q_F$  и продольных сил  $N_F$ .

### Последовательность расчета

3.3.1. Изобразить в масштабе схему рамы с указанием размеров и действующих нагрузок.

3.3.2. Изобразить расчленение рамы на диски с указанием всех реакций в связях, определенных при выполнении задачи 1.2.

3.3.3. Построить эпюры поперечных сил  $Q_F$ , изгибающих моментов  $M_F$  и продольных сил  $N_F$  для отдельных дисков с последующим их объединением для всей расчетной схемы.

3.3.4. Произвести проверку правильности построения эпюр усилий.

При правильном построении эпюр  $Q_F$  и  $M_F$  должны соблюдаться все положения, вытекающие из дифференциальных зависимостей при изгибе.

Правильность построения всех трех эпюр производится проверкой равновесия узлов.

Каждый узел рамы «вырезается» из расчетной схемы; действие на него отброшенных частей заменяется усилиями в расчетных сечениях. Для каждого узла должны соблюдаться уравнения равновесия  $\sum X = 0$ ;  $\sum Y = 0$ ;  $\sum M_c = 0$ .

### Задача 3.4. Определение усилий в сечениях трехшарнирной рамы

Литература: [1, с. 54–59], [2, с. 16–20], [3, с. 98–101], [4, с. 12–21].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 1.2 и схемам, представленным на рис. 1.4 (см. задачу 1.3 РГР № 1).

#### Задание

- Построить эпюры изгибающих моментов  $M_F$ , поперечных сил  $Q_F$  и продольных сил  $N_F$ .
- Проверить прочность одной из стоек рамы (по выбору) при одновременном действии растяжения (сжатия) и изгиба.

**Указание.** Материал стойки – сосна. Сечение прямоугольное:  $h = 300$  мм,  $b = 200$  мм.

### Последовательность расчета

3.4.1. Изобразить в масштабе схему рамы с указанием размеров и действующих нагрузок.

3.4.2. Изобразить расчленение рамы на диски с указанием всех реакций в связях, определенных при выполнении задачи 1.3.

3.4.3. Построить эпюры поперечных сил  $Q_F$ , изгибающих моментов  $M_F$  и продольных сил  $N_F$  для отдельных дисков с последующим их объединением для всей расчетной схемы.

3.4.4. Произвести проверку правильности построения эпюр усилий.

При правильном построении эпюр  $Q_F$  и  $M_F$  должны соблюдаться все положения, вытекающие из дифференциальных зависимостей при изгибе.

Правильность построения всех трех эпюр производится проверкой равновесия узлов.

Каждый узел рамы «вырезается» из расчетной схемы, действие на него отброшенных частей заменяется усилиями в расчетных сечениях.

Для каждого узла должны соблюдаться уравнения равновесия  $\sum X = 0$ ;

$$\sum X = 0; \sum Y = 0; \sum M_c = 0.$$

3.4.5. Определить геометрически характеристики сечения: площадь  $A$ , момент инерции  $I_z$ , момент сопротивления  $W_z$ .

3.4.6. Определить значения нормальных напряжений в наиболее удаленных волокнах опасного сечения

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_{\max}}{W_z},$$

и построить эпюру нормальных напряжений.

3.4.7. Произвести проверку прочности для наиболее удаленных волокон

$$\sigma \leq R.$$

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

### Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил

Литература: [1, с. 269–301], [2, с. 115–140], [3, с. 254–301], [4, с. 115–153].

Исходные данные к задаче определяются по табл. 4.1 и схемам, представленным на рис. 4.1.

#### Задание

- Построить эпюры изгибающих моментов  $M_F$ , поперечных сил  $Q_F$  и продольных сил  $N_F$  в статически неопределимой раме, используя метод сил.

Таблица 4.1

#### Исходные данные к РГР № 4

Первая цифра шифра	$q_1$ , кН/м	$q_2$ , кН/м	Вторая цифра шифра	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м	$I_2:I_1$
0	20	0	0	100	0	0	6	4	2
1	0	20	1	0	100	1	8	4	3
2	30	0	2	120	0	2	10	5	4
3	0	30	3	0	120	3	12	5	2
4	24	0	4	160	0	4	14	6	4
5	0	24	5	0	160	5	16	6	3
6	16	0	6	200	0	6	9	4,5	3
7	0	16	7	0	200	7	10	4	2
8	32	0	8	180	0	8	12	6	3
9	0	32	9	0	180	9	14	5	4

#### Последовательность расчета

4.1. Изобразить в масштабе расчетную схему рамы с указанием размеров и приложить заданную нагрузку.

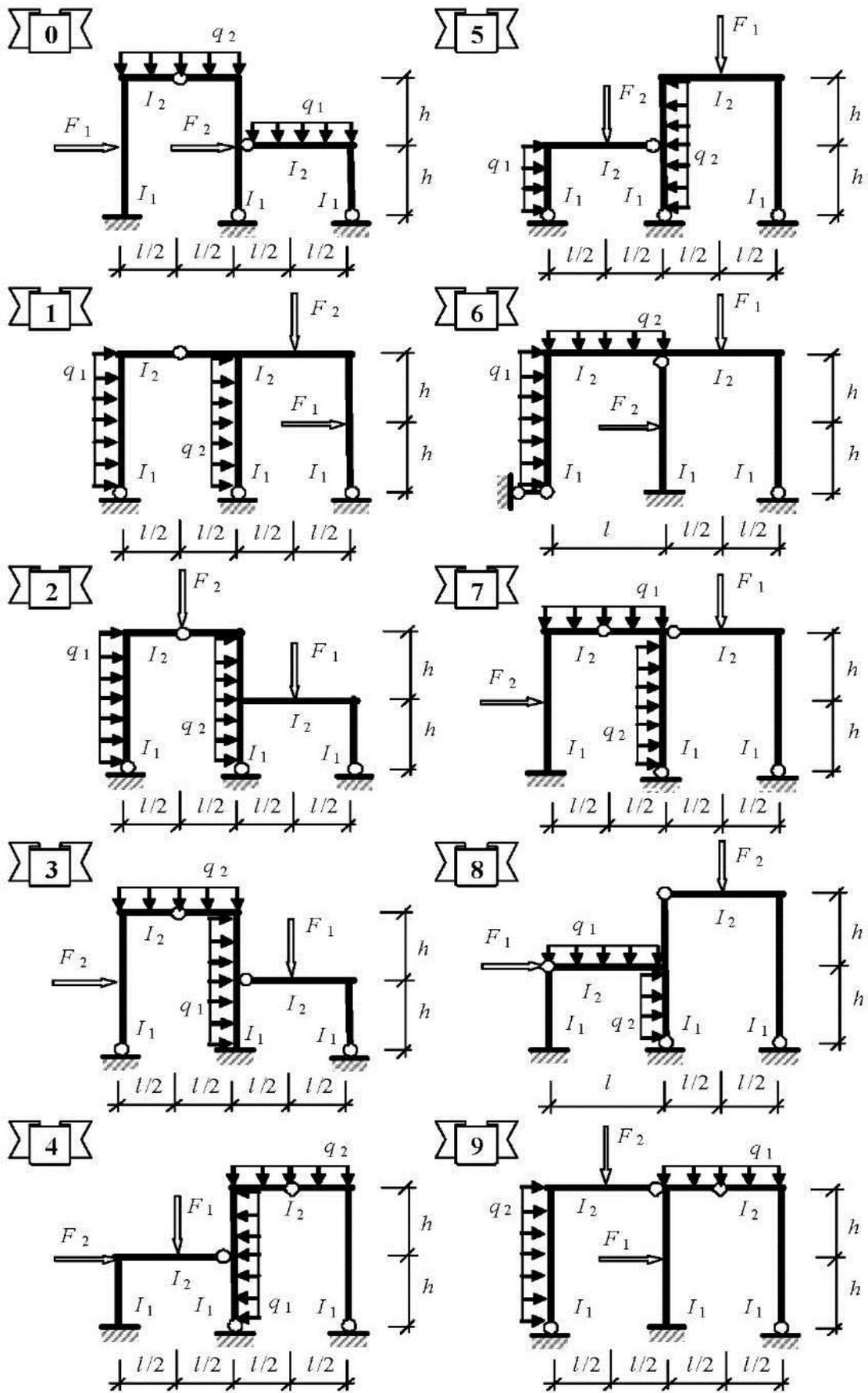


Рис. 4.1. Расчетные схемы к РГР № 4

4.2. Определить степень статической неопределимости рамы

$$n_c = 3K - Ш,$$

где  $n_c$  – степень статической неопределимости или число так называемых «лишних» связей;  $K$  – число замкнутых контуров;  $Ш$  – число простых шарниров в расчетной схеме, включая опорные, или число связей, необходимых для полного защемления всех узлов расчетной схемы.

4.3. Выбрать две статически определимые и геометрически неизменяемые основные системы путем удаления «лишних» связей, приложив по их направлению соответствующие неизвестные  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Более рациональную из этих основных систем использовать для дальнейшего расчета.

4.4. Записать в общем виде систему канонических уравнений метода сил применительно к данной расчетной схеме.

4.5. Показать расчетные схемы основной системы при последовательном нагружении единичными безразмерными силами, приложенными по направлениям удаленных связей. На расчетных схемах показать опорные реакции, определить их и построить эпюры изгибающих моментов  $M_1^0, M_2^0, \dots, M_n^0$ .

4.6. Показать расчетную схему основной системы при нагружении ее внешней нагрузкой, определить опорные реакции и построить в основной системе эпюру изгибающих моментов  $M_{iF}^0$ .

4.7. Определить коэффициенты при неизвестных системы канонических уравнений

$$\delta_{ik} = \sum_1^m \int_0^l \frac{M_i^0 M_k^0}{EI} dx,$$

где  $m$  – число участков интегрирования.

4.8. Определить свободные члены системы канонических уравнений

$$\Delta_{iF} = \sum_1^m \int_0^l \frac{M_i^0 M_{iF}^0}{EI} dx.$$

4.9. Подставить найденные значения коэффициентов и свободных членов в систему канонических уравнений и решить ее относительно неизвестных  $X_i$ .

4.10. Построить эпюры изгибающих моментов от действительных значений реакций в удаленных связях. Для этого все ординаты эпюр  $M_i^0$  ( $i = 1, \dots, n$ ) умножаются на соответствующую величину  $X_i$ .

4.11. Построить эпюру изгибающих моментов в заданной расчетной схеме на основании принципа независимости действия сил

$$M_F = M_1^0 X_1 + M_2^0 X_2 + \dots + M_n^0 X_n + M_F^0.$$

4.12. Произвести деформационную проверку расчета. Для этого берется любая другая статически определимая основная система (например, вторая из выбранных в п. 4.3), в которой строится эпюра изгибающих моментов  $\bar{M}_s^0 = \sum_n \bar{M}_i^0$  от одновременного действия на нее всех единичных сил, приложенных по направлениям удаленных связей. При правильно выполненном расчете должно выполняться условие

$$\sum_1^m \int_0^l \frac{\bar{M}_s^0 M_F}{EI} dx = 0.$$

Деформационная проверка будет выполняться и в том случае, если в приведенной формуле вместо  $\bar{M}_s^0$  использовать любую из эпюр  $\bar{M}_i^0$  основной системы.

*Примечание.* Деформационная проверка имеет смысл, если выбранная для проверки новая основная система дает эпюры  $\bar{M}_i^0$ , линейно независимые (не подобные) эпюрам  $M_i^0$ , использованным в расчете.

4.13. Построить эпюру поперечных сил  $Q_F$  в заданной расчетной схеме, используя дифференциальную зависимость  $Q_F = dM/dx$ .

4.14. Построить эпюру продольных сил  $N_F$ . Значения продольных сил в стержнях рамы определяются из условий равновесия ее узлов. К вырезанным узлам кроме неизвестных продольных сил прикладываются найденные поперечные силы и известные узловые нагрузки.

4.15. Произвести проверку равновесия системы. При выполнении данного пункта рекомендуется рассмотреть два сечения: сечение, проведенное по опорным связям (рассматривается равновесие всей рамы),

и сечение, проведенное в любом месте расчетной схемы (рассматривается равновесие отсеченной части). При правильном построении эпюр для любой отсеченной части системы должны выполняться уравнения равновесия  $\sum X = 0$ ;  $\sum Y = 0$ ;  $\sum M_c = 0$ , где  $c$  – любая точка на плоскости.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

### Расчет плоской статически неопределимой рамы методом перемещений

Литература: [1, с. 380–419]; [2, с. 141–149]; [3, с. 398–413]; [4, с. 202–223].

Исходные данные к работе определяются по табл. 5.1 и схемам, представленным на рис. 5.1.

#### Задание

- Построить эпюры изгибающих моментов  $M_{гр}$  поперечных сил  $Q_{гр}$  и продольных сил  $N_{гр}$  в статически неопределимой раме, используя метод перемещений.

#### *Последовательность расчета*

5.1. Вычертить в масштабе расчетную схему рамы с указанием размеров, величин нагрузок и соотношений жесткостей.

5.2. Определить степень кинематической неопределимости рамы (число неизвестных метода перемещений):

$$n_k = n_y + n_n,$$

где  $n_y$  – число жестких узлов расчетной схемы, способных к повороту при ее деформации;  $n_n$  – число возможных линейных смещений всех узлов расчетной схемы.

5.3. Получить основную систему метода перемещений, введя дополнительные связи по направлениям возможных углов поворота жестких узлов и линейных смещений всех узлов.

## Исходные данные к РГР № 5

Первая цифра шифра	$F_{1z}$ кН	$F_{2z}$ кН	Вторая цифра шифра	$q_{1z}$ кН/м	$q_{2z}$ кН/м	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ м	$h$ м	$I_2 : I_1$
0	160	0	0	20	0	0	10	8	2
1	0	160	1	0	20	1	8	6	3
2	240	0	2	40	0	2	6	6	3
3	0	240	3	0	40	3	12	8	4
4	300	0	4	36	0	4	10	6	3
5	0	300	5	0	36	5	8	5	6
6	360	0	6	30	0	6	6	4	4
7	0	360	7	0	30	7	12	6	2
8	200	0	8	24	0	8	8	8	2
9	0	200	9	0	24	9	9	6	4

5.4. Записать систему канонических уравнений метода перемещений в общем виде применительно к заданной схеме рамы.

5.5. Построить в основной системе метода перемещений деформированные схемы от последовательных единичных смещений по направлению дополнительных связей.

5.6. Используя таблицы реакций (пп. 1–4 прил. 7), построить эпюры изгибающих моментов  $M_i^0$  от указанных в п. 4.4 единичных смещений.

5.7. Используя таблицы реакций (пп. 5–8 прил. 7), построить в основной системе метода перемещений эпюру от заданного нагружения.

5.8. Определить коэффициенты при неизвестных (реакции в дополнительных связях от единичных смещений) и свободные члены (реакции в дополнительных связях от действия внешней нагрузки) системы канонических уравнений.

**Указания**

- Реакция в дополнительной угловой связи определяется непосредственно из равновесия жесткого узла, в который введена угловая связь.
- Реакция в дополнительной линейной связи ортогональных рам определяется из условия равновесия отсеченной части основной системы. При этом сечение (сквозное или замкнутое) проводится параллельно оси линейной связи через все стержни схемы, получившие деформации (см. п. 5.4) при смещении по направлению данной связи.

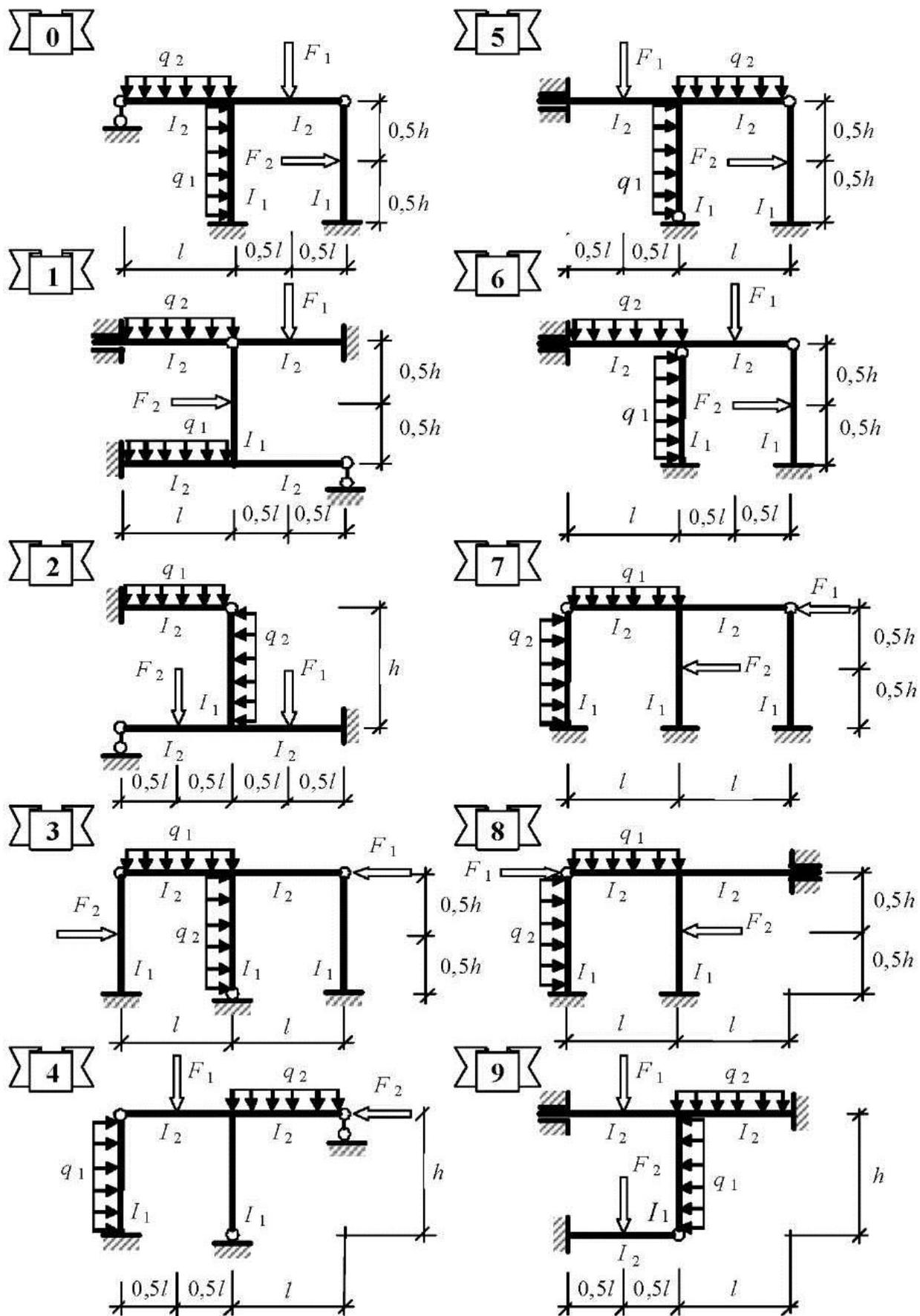


Рис. 5.1. Схемы заданий к РГР № 5

- Реакция в дополнительной связи считается положительной, если она направлена в сторону заданного в п. 5.4 смещения этой связи.
- Все схемы по определению реакций в дополнительных связях должны быть приведены на чертеже.

5.9. Записать систему канонических уравнений метода перемещений в численном виде и из ее решения найти неизвестные  $Z_i$ .

5.10. Определить изгибающие моменты в основной системе от действительных смещений по направлению дополнительных связей (построить эпюры) и на основании принципа независимости действия сил построить эпюру изгибающих моментов в заданной расчетной схеме

$$M_F = M_1^0 Z_1 + M_2^0 Z_2 + \dots + M_n^0 Z_n + M_F^0.$$

5.11. Произвести проверки правильности построения эпюры:

- для каждого жесткого узла заданной расчетной схемы должно выполняться уравнение равновесия  $\sum M_{\text{узн}} = 0$ ;
- для всей рамы должна выполняться деформационная проверка расчета, для чего выбирается любая наиболее простая статически определимая основная система, получаемая из заданной путем удаления лишних связей; в этой системе строится суммарная эпюра изгибающих моментов  $\overline{M}_s^0$  от единичных сил, приложенных по направлению удаленных связей. Проверка считается выполненной, если

$$\sum_1^m \int_0^l \frac{\overline{M}_s^0 M_F}{EI} dx = 0.$$

5.12. Построить эпюру поперечных сил в заданной расчетной схеме на основании дифференциальной зависимости  $Q_F = dM/dx$ .

5.13. Определить продольные силы во всех стержнях расчетной схемы из условия равновесия ее узлов и построить эпюру  $N_F$ .

5.14. Произвести статическую проверку расчета: любая отсеченная часть расчетной схемы или вся схема, отсеченная от опор, под

действием внутренних и внешних сил должна находиться в равновесии, т. е. должны выполняться три уравнения равновесия  $\sum X = 0$ ;  $\sum Y = 0$ ;  $\sum M_c = 0$  ( $c$  – любая точка на плоскости).

Для выполнения этой проверки рекомендуется рассмотреть два случая:

- равновесие всей расчетной схемы, отсеченной от опор;
- равновесие любой отсеченной части расчетной схемы.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

### Расчет плоской рамы на устойчивость

Литература: [1, с. 486–503]; [6, с. 41–77]; [7, с. 21–52]; [146–164].

Исходные данные к работе определяются по табл. 6.1 и схемам, представленным на рис. 6.1.

#### Задание

- Определить критическую силу и расчетную длину центрально сжатого стержня рамы.
- Произвести подбор сечения центрально сжатого стержня с учетом продольного изгиба.

#### *Последовательность расчета*

#### *Определение критических параметров*

6.1. Вычертить в масштабе расчетную схему рамы с указанием размеров, нагрузки и других данных к расчету.

6.2. Пронумеровать все стержни расчетной схемы, определить их относительные жесткости  $i_k = EI_k / l_k$  ( $k$  – номер стержня) и выразить их через общий множитель  $i_0$ , приняв за него величину относительной жесткости любого из стержней рамы.

6.3. Записать для всех сжатых стержней выражения их критических параметров

$$v_n = h_n \sqrt{\frac{N_n}{EI_n}},$$

где  $n$  – номер сжатого стержня;  $N_n$  – величина сжимающей силы в этом стержне;  $EI_n$  – его жесткость при изгибе;  $h_n$  – длина сжатого стержня.

Все параметры  $v_n$  выразить через  $v_0$ , принимая за последний любой из параметров  $v_n$ .

Таблица 6.1

Исходные данные к РГР № 6

Первая цифра шифра	$\frac{EI_2}{EI_1}$	Вторая цифра шифра	$l_1$ , м	$l_2$ , м	Третья цифра шифра (№ схемы)	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$F$ , кН	Сечение	
									Тип	Материал
0	1,5	0	4	4	0	4,2	3,2	300		Сталь С245
1	2,0	1	5	5	1	3,6	3,0	240		
2	1,8	2	6	6	2	4,8	3,3	660		
3	2,4	3	8	8	3	2,7	2,4	120		Сосна
4	2,7	4	3	3	4	3,3	3,0	100		Дуб
5	3,0	5	4,5	4,5	5	4,0	3,6	360		Сталь С245
6	3,3	6	6,6	6,6	6	4,5	4,0	400		
7	3,6	7	7,2	7,2	7	3,6	2,7	280		
8	4,2	8	8,4	8,4	8	2,7	2,4	160		Дуб
9	2,2	9	3,6	3,6	9	4,5	3,6	250		Чугун СЧ20

Примечания к табл. 6.1:

1. Для схемы 1 сечение принять квадратным при соотношении высоты к толщине стенки (полки)  $h/t = 10$ .

2. Для схем 3 и 8 принять соотношение высоты сечения к его ширине  $h/b = 1,5$ .

3. Для схем 7 и 9 принять отношение внешнего диаметра кольца к внутреннему  $D/d = 1,2$ .

4. Прочие типы сечений принимать согласно расчету по сортаменту прокатных профилей.

6.4. Получить основную систему метода перемещений путем введения в заданную расчетную схему дополнительных угловых и линейных связей по направлению возможных угловых и линейных смещений узлов.

6.5. Составить уравнение устойчивости в общем виде применительно к заданной расчетной схеме.

6.6. Построить в основной системе эпюры изгибающих моментов от единичных смещений по направлениям введенных дополнительных связей, используя таблицы реакций прил. 7 и 8.

6.7. С помощью построенных эпюр определить реакции в дополнительных связях от заданных единичных смещений и представить уравнение устойчивости в развернутом виде.

6.8. Решить уравнение устойчивости путем подбора наименьшего критического параметра  $\nu_{cr}$  при помощи таблиц трансцендентных функций (прил. 9) или на ПК при помощи учебной программы BUCLING.

6.9. Определить критические силы  $F_{cr}$  и расчетные длины  $l_0$  для всех сжатых стоек расчетной схемы по найденным значениям критических параметров  $\nu_{n,cr}$  по формулам

$$F_{n,cr} = \frac{\nu_{n,cr}^2 EI_n}{h_n^2}; \quad l_{n,0} = \frac{\pi h_n}{\nu_{n,cr}}.$$

#### *Подбор сечений центрально сжатых стержней*

6.10. Задаться (в зависимости от материала стойки) значением гибкости  $\lambda \geq \lambda_{cr}$  и определить по прил. 10 соответствующий этой гибкости коэффициент продольного изгиба в первом приближении  $\varphi = \varphi_1$ .

6.11. Определить требуемую площадь поперечного сечения стержня при заданном значении продольной силы  $N = F$

$$A_{тр} = \frac{N}{\varphi R \gamma_c},$$

приняв коэффициент условия работы  $\gamma_c = 1$ , а расчетное сопротивление по прил. 2 и 3 в зависимости от заданного материала стержня.

6.12. Определить размеры поперечного сечения либо по заданным соотношениям (см. примечание к табл. 6.1), либо по сортаменту прокатных профилей (прил. 4 и 5).

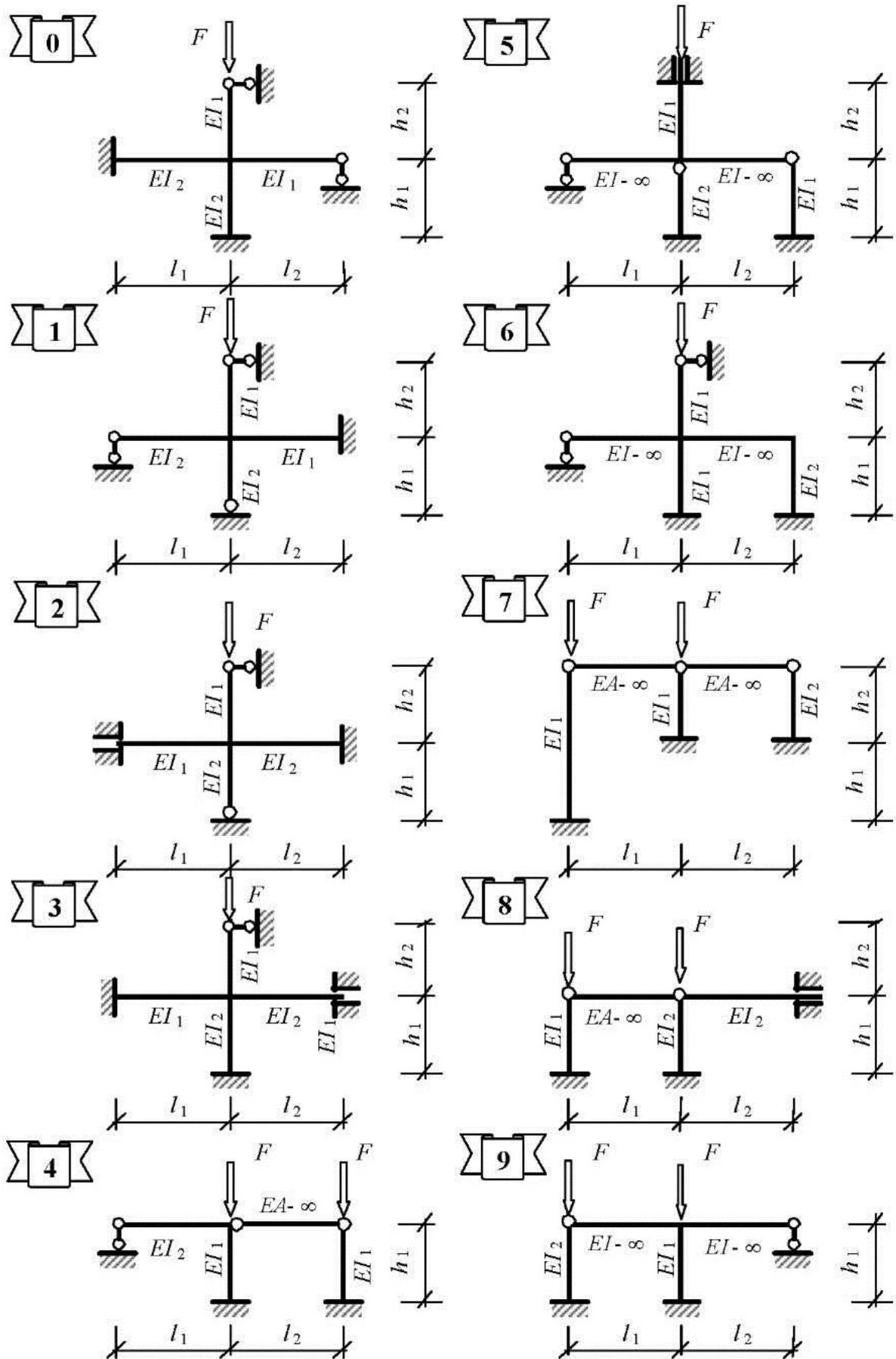


Рис. 6.1. Схемы заданий к РПР № 6

6.13. Определить геометрические характеристики полученного сечения и гибкость стержня, используя значение расчетной длины стержня  $l_0$ , полученной в п. 6.9.

6.14. По полученному значению гибкости по прил. 10 определить коэффициент продольного изгиба  $\varphi = \varphi_2$ .

6.15. Произвести проверку прочности стержня при продольном изгибе

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq R \gamma_c.$$

Если данное условие не выполняется, то необходимо повторить подбор сечения стержня (пп. 6.10–6.15), задаваясь следующим значением коэффициента продольного изгиба (второе приближение)  $\varphi = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2)$ .

Расчет по подбору оптимального сечения выполняется методом последовательных приближений до тех пор, пока величина напряжения не будет отличаться от  $R \gamma_c$  не более чем на 5 %.

6.16. Определить изгибную жесткость центрально сжатого стержня  $EI$  по размерам полученного сечения и получить значение  $F_{cr}$  (п. 6.9) в численном виде.

6.17. Определить продольную силу, которую способен воспринять сжимаемый стержень  $N = \sigma \varphi A$ .

6.18. Определить коэффициент запаса принятого сечения  $k = F_{cr}/N$ .

## ПРИЛОЖЕНИЯ

*Приложение 1*

### Модули упругости и коэффициенты Пуассона

Материал	Модули упругости $E, E_b, E_0, \text{МПа}$	Модуль сдвига $G, \text{МПа}$	Коэффициент Пуассона $\mu$
Сталь прокатная	$2,06 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^4$	0,24...0,3
Алюминиевые сплавы	$0,7 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^4$	0,32...0,34
Бетон класса:			
В20	$0,27 \cdot 10^5$	$0,4E_b$	0,16...0,18
В30	$0,325 \cdot 10^5$	$0,4E_b$	0,16...0,18
В50	$0,39 \cdot 10^5$	$0,4E_b$	0,16...0,18
Дерево (сосна, ель):			
вдоль волокон	$(0,1...0,12) \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^4$	–
поперёк волокон	$(0,005...0,01) \cdot 10^5$	–	–

*Приложение 2*

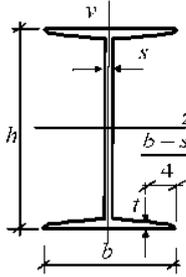
### Расчетные сопротивления проката для стальных конструкций

Материал	Расчетное сопротивление, МПа	
	$R_y$	$R_k$
Сталь листовая, прокатная, фасонная:		
С245	240	360
С255	240	360
С285	280	390
С375	345	480

*Приложение 3*

### Расчетные сопротивления для некоторых сортов древесины

Напряженное состояние и характеристики элементов	Расчетные сопротивления, МПа		
	сосна, ель	дуб	бук
1. Изгиб $R_{II}$ , сжатие $R_c$ и смятие $R_{cm}$ вдоль волокон:			
элементы прямоугольного сечения	14	18,2	15,4
элементы из круглых пиломатериалов	16	20,8	17,6
2. Растяжение вдоль волокон $R_p$	10	13	11



**Двутавры горячекатаные  
(ГОСТ 8239-89)**

№ двутавра	Масса 1 пог. м, кг	Размеры, мм				$A$ , см <sup>2</sup>	$I_z$ , см <sup>4</sup>	$W_z$ , см <sup>3</sup>	$i_z$ , см	$S_z$ , см <sup>3</sup>	$I_y$ , см <sup>4</sup>	$W_y$ , см <sup>3</sup>	$i_y$ , см
		$h$	$b$	$s$	$t$								
10	9,46	100	55	4,5	7,2	12	198	39,7	4,06	23	17,9	6,49	1,22
12	11,5	120	64	4,8	7,3	14,7	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14	13,7	140	73	4,9	7,5	17,4	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55
16	15,9	160	81	5	7,8	20,2	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,7
18	18,4	180	90	5,1	8,1	23,4	1280	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88
20	21	200	100	5,2	8,4	26,8	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07
22	24	220	110	5,4	8,7	30,6	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27
24	27,3	240	115	5,6	9,5	34,8	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37
27	31,5	270	125	6	9,8	40,2	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54
30	36,5	300	135	6,5	10,2	46,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69
33	42,2	330	140	7	11,2	53,8	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79
36	48,6	360	145	7,5	12,3	61,9	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89
40	57	400	155	8,3	13	72,6	19062	953	16,2	545	667	86,1	3,03
45	66,5	450	160	9	14,2	84,7	27696	1231	18,1	708	808	101	3,09
50	78,5	500	170	10	15,2	100	39727	1589	19,9	919	1043	123	3,23
55	92,6	550	180	11	16,5	118	55962	2035	21,8	1181	1356	151	3,39
60	108	600	190	12	17,8	138	76806	2560	23,6	1491	1725	182	3,54

№ швеллера		Масса I пог. м, кг	Размеры, мм				$A_z$ см <sup>2</sup>	$I_{z_z}$ см <sup>4</sup>	$W_{z_z}$ см <sup>3</sup>	$i_{z_z}$ см	$S_{z_z}$ см <sup>3</sup>	$I_{y_y}$ см <sup>4</sup>	$W_{y_y}$ см <sup>3</sup>	$i_{y_y}$ см	$z_{0_0}$ см
			$h$	$b$	$s$	$t$									
5	4,84	50	32	4,4	7	6,16	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,95	1,16	
6,5	5,9	65	36	4,4	7,2	7,51	48,6	15	2,54	9	8,7	3,68	1,08	1,24	
8	7,05	80	40	4,5	7,4	8,98	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31	
10	8,59	100	46	4,5	7,6	10,9	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44	
12	10,4	120	52	4,8	7,8	13,3	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54	
14	12,3	140	58	4,9	8,1	15,6	491	70,2	5,6	40,8	45,4	11	1,7	1,67	
16	14,2	160	64	5	8,4	18,1	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,8	
16a	15,3	160	68	5	9	19,5	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2	
18	16,3	180	70	5,1	8,7	20,7	1090	121	7,24	69,8	86	17	2,04	1,94	
18a	17,4	180	74	5,1	9,3	22,2	1190	132	7,32	76,1	105	20	2,18	2,13	
20	18,4	200	76	5,2	9	23,4	1520	152	8,7	87,8	113	20,5	2,2	2,07	
22	21	220	82	5,4	9,5	26,4	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21	
24	24	240	90	5,6	10	30,6	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,6	2,42	
27	27,7	270	95	6	10,5	35,2	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47	
30	31,8	300	100	6,5	11	40,5	5810	387	12	224	327	43,6	2,84	2,52	
33	36,5	330	105	7	11,7	46,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59	
36	41,9	360	110	7,5	12,6	53,4	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,1	2,68	

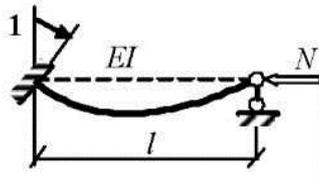
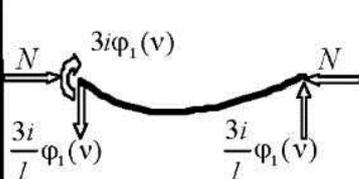
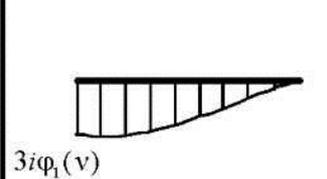
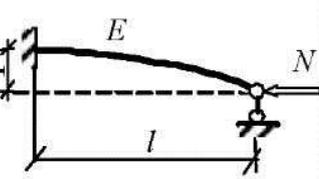
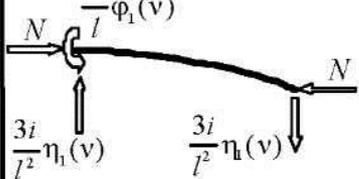
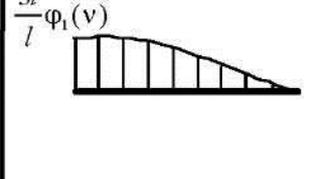
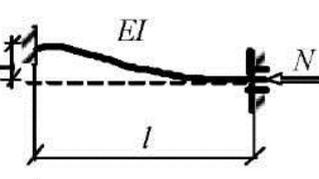
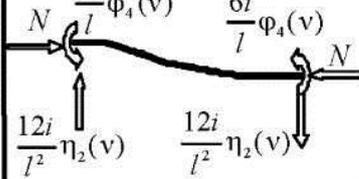
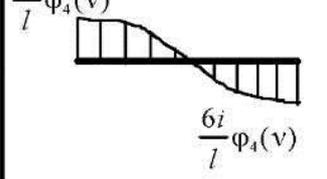
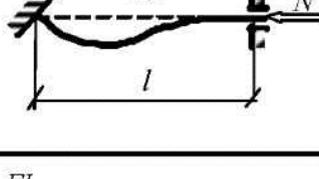
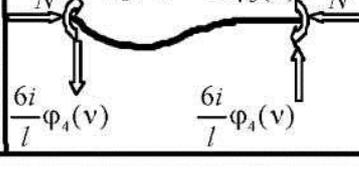
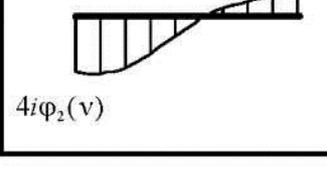
№ уголка	Масса 1 пог. м, кг	Размеры, мм			$A$ , см <sup>2</sup>	$I_z$ , см <sup>4</sup>	$i_z$ , см	$I_y$ , см <sup>4</sup>	$i_y$ , см	$z_0$ , см	$y_0$ , см
		$B$	$b$	$t$							
5/3,2	2,4	50	32	4	3,17	7,9	1,59	2,56	0,9	0,76	1,65
7,5/5	4,79	75	50	5	6,11	34,8	2,39	12,5	1,43	1,17	2,39
9/5,6	6,7	90	56	6	8,54	70,6	2,88	21,2	1,58	1,28	2,95
10/6,3	7,53	100	63	6	9,58	98,3	3,2	30,6	1,79	1,42	3,23
	8,7			7	11,1	113	3,19	35	1,78	1,46	3,28
	9,87			8	12,6	127	3,18	39,2	1,77	1,5	3,32
11/7	10,9	110	70	8	13,9	172	3,51	54,6	1,98	1,64	3,61
12,5/8	11	125	80	7	14,1	227	4,01	73,7	2,29	1,8	4,01
	12,6			8	16	256	4	83	2,28	1,84	4,05
	15,5			10	19,7	312	3,98	100	2,26	1,92	4,14
14/9	14,1	140	90	8	18	364	4,49	120	2,58	2,03	4,49
	17,5			10	22,2	444	4,47	146	2,56	2,12	4,58
16/10	18	160	100	9	22,9	606	5,15	186	2,85	2,24	5,19
	19,8			10	25,3	667	5,13	204	2,84	2,28	5,23
	23,6			12	30	784	5,11	239	2,82	2,36	5,32
18/11	22,2	180	110	10	28,3	952	5,8	275	3,12	2,44	5,88
	26,4			12	33,7	1123	5,77	324	3,1	2,52	5,97
20/12,5	27,4	200	125	11	34,9	1449	6,45	446	3,58	2,79	6,5
	29,7			12	37,9	1568	6,43	482	3,57	2,83	6,54
	34,4			14	43,9	1801	6,41	551	3,54	2,91	6,62
	39,1			16	49,8	2026	6,38	617	3,52	2,99	6,71

**Таблицы реакций и усилий в изгибаемых стержнях от единичных смещений связей и внешних воздействий**

№ п/п	Схема воздействия	Значения опорных реакций	Эпюры изгибающих моментов
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

$i = \frac{EI}{l}$  — относительная жесткость стержня;  $(u + v) = 1$

Таблица реакций и усилий в сжато-изогнутых стержнях от единичных смещений связей

№ п/п	Схема воздействия	Значения опорных реакций	Эпюры изгибающих моментов
1			
2			
3			
4			
<p><math>i = \frac{EI}{l}</math> – относительная жесткость стержня;</p> <p><math>v = l\sqrt{\frac{N}{EI}}</math> – критический параметр сжато-изогнутого стержня.</p>			

**Таблица значений трансцендентных функций метода  
перемещений для сжато-изогнутых стержней**

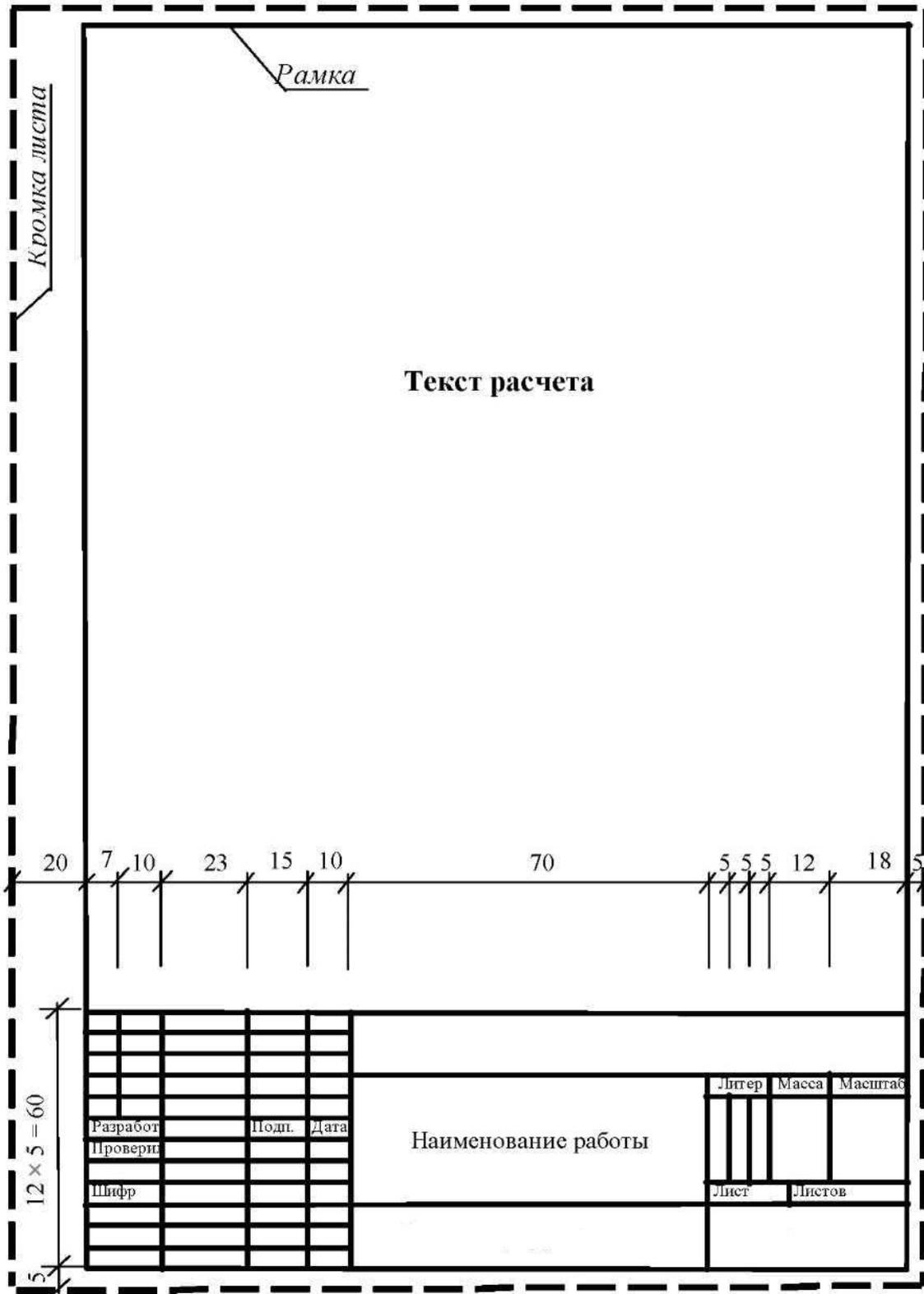
$\nu$	$\varphi_1(\nu)$	$\varphi_2(\nu)$	$\varphi_3(\nu)$	$\varphi_4(\nu)$	$\eta_1(\nu)$	$\eta_2(\nu)$
0,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,2	0,9973	0,9980	1,0009	0,9992	0,9840	0,9959
0,4	0,9895	0,9945	1,0026	0,9973	0,9362	0,9840
0,6	0,9856	0,9881	1,0061	0,9941	0,8557	0,9641
0,8	0,9566	0,9787	1,0111	0,9895	0,7432	0,9362
1,00	0,9313	0,9662	1,0172	0,9832	0,5980	0,8999
1,10	0,9194	0,9590	1,0209	0,9798	0,5131	0,8789
1,2	0,8998	0,9511	1,0251	0,9751	0,4198	0,8557
1,3	0,8814	0,9424	1,0298	0,9715	0,3181	0,8307
1,4	0,8613	0,9329	1,0348	0,9669	0,2080	0,8035
1,5	0,8393	0,9226	1,0403	0,9619	0,0893	0,7743
1,6	0,8153	0,9116	1,0463	0,9566	-0,0380	0,7432
1,7	0,7891	0,8998	1,0529	0,9509	-0,1742	0,7100
1,8	0,7609	0,8871	1,0600	0,9448	-0,3191	0,6747
1,9	0,7297	0,8735	1,0676	0,9382	-0,4736	0,6374
2,0	0,6961	0,8590	1,0760	0,9313	-0,6372	0,5980
2,1	0,6597	0,8437	1,0850	0,9240	-0,8103	0,5565
2,2	0,6202	0,8273	1,0946	0,9164	-0,9931	0,5131
2,3	0,5772	0,8099	1,1050	0,9083	-1,1861	0,4675
2,4	0,5304	0,7915	1,1164	0,8998	-1,3895	0,4198
2,5	0,4793	0,7720	1,1286	0,8909	-1,6040	0,3701
2,6	0,4234	0,7513	1,1417	0,8814	-1,8299	0,3181
2,7	0,3621	0,7294	1,1559	0,8716	-2,0679	0,5565
2,8	0,2944	0,7064	1,1712	0,8613	-2,3189	0,2080
2,9	0,2195	0,6819	1,1878	0,8506	-2,5838	0,1498
3,0	0,1361	0,6560	1,2057	0,8393	-2,8639	0,0893
3,1	0,0424	0,6287	1,2252	0,8275	-3,1609	0,0207
3,2	-0,0635	0,5997	1,2463	0,8153	-3,4763	-0,0380
3,3	-0,1847	0,5691	1,2691	0,8024	-3,8147	-0,1051
3,4	-0,3248	0,5366	1,2940	0,7891	-4,1781	-0,1742
3,5	-0,4894	0,5021	1,3212	0,7751	-4,5727	-0,2457

$\nu$	$\varphi_1(\nu)$	$\varphi_2(\nu)$	$\varphi_3(\nu)$	$\varphi_4(\nu)$	$\eta_1(\nu)$	$\eta_2(\nu)$
3,5	-0,4894	0,5021	1,3212	0,7751	-4,5727	-0,2457
3,6	-0,6862	0,4656	1,3508	0,7609	-5,0062	-0,3191
3,7	-0,9270	0,4265	1,3834	0,7457	-5,4903	-0,3951
3,8	-1,2303	0,3850	1,4191	0,7297	-6,0436	-0,4736
3,9	-1,6268	0,3407	1,4584	0,7133	-6,6968	-0,5542
4,0	-2,1726	0,2933	1,5018	0,6961	-7,5058	-0,6372
4,1	-2,9806	0,2424	1,5501	0,6783	-8,5836	-0,7225
4,2	-4,3155	0,1877	1,6036	0,6597	-10,196	-0,8103
4,3	-6,9949	0,1288	1,6637	0,6404	-13,158	-0,9004
4,4	-15,330	0,0648	1,7310	0,6202	-27,781	-0,9931
4,5	227,80	-0,0048	1,8070	0,5991	221,05	-1,0884
4,6	14,669	-0,0808	1,8933	0,5772	7,6160	-1,1861
4,7	7,8185	-0,1646	1,9919	0,5543	0,4553	-1,2865
4,8	5,4020	-0,2572	2,1056	0,5304	-2,2777	-1,3895
4,9	4,1463	-0,3612	2,2377	0,5054	-3,8570	-1,4954
5,0	3,3615	-0,4772	2,3924	0,4793	-4,9718	-1,6040
5,1	2,8130	-0,6100	2,5757	0,4520	-5,8570	-1,7155
5,2	2,3986	-0,7630	2,7961	0,4234	-6,6147	-1,8299
5,3	2,0668	-0,9423	3,0648	0,3935	-7,2965	-1,9473
5,4	1,7884	-1,1563	3,3989	0,3621	-7,9316	-2,0679
5,5	1,5455	-1,4181	3,8234	0,3291	-8,5379	-2,1917
5,6	1,3265	-1,7481	4,3794	0,2944	-9,1268	-2,3189
5,7	1,1235	-2,180	5,1346	0,2580	-9,7056	-2,4495
5,8	0,9302	-2,7777	6,2140	0,2195	-10,283	-2,5838
5,9	0,7421	-3,6678	7,8726	0,1790	-10,863	-2,7218
6,0	0,5551	-5,1589	10,727	0,1361	-11,445	-2,8639
6,1	0,3659	-8,2355	16,739	0,0906	-12,038	-3,0102
6,2	0,1700	-18,591	37,308	0,0424	-12,643	-3,1609
$2\pi$	0,0000	$-\infty$	$+\infty$	0,0000	-13,033	-3,2898

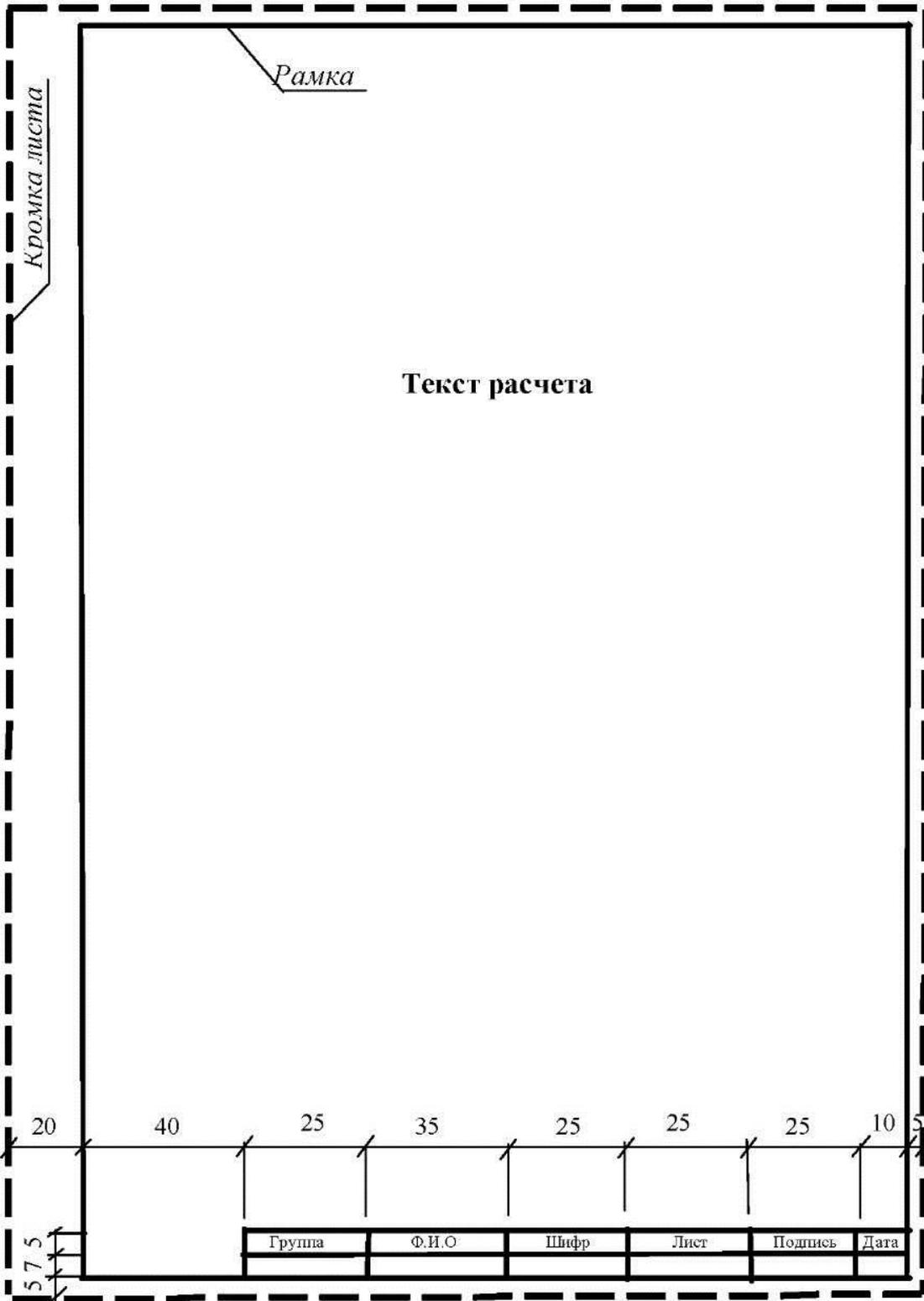
**Коэффициенты продольного изгиба**

$\lambda = l_0/i$	Коэффициенты $\varphi$ для элементов, изготовленных из				$\lambda = l_0/i$	
	стали, с $R_y$ , МПа		чугуна	дюралюминия		древесины
	200	240				
10	0,988	0,987	0,97	0,999	$1 - 0,8 \left( \frac{\lambda^2}{100} \right)$	10
20	0,967	0,962	0,91	0,998		20
30	0,939	0,937	0,81	0,835		30
40	0,906	0,894	0,69	0,700		40
50	0,869	0,852	0,57	0,568		50
60	0,827	0,805	0,44	0,455		60
70	0,782	0,754	0,34	0,353		70
80	0,734	0,686	0,26	0,269	$\frac{3000}{\lambda^2}$	80
90	0,665	0,612	0,20	0,212		90
100	0,559	0,542	0,16	0,172		100
110	0,537	0,478		0,142		110
120	0,479	0,419		0,119		120
130	0,425	0,364		0,101		130
140	0,376	0,315		0,087		140
150	0,328	0,276		0,076		150
160	0,290	0,244				160
170	0,259	0,218				170
180	0,233	0,196				180
190	0,210	0,177				190
200	0,191	0,161				200
210	0,174	0,147				210
220	0,160	0,135			220	

Образец оформления первого листа расчета



Образец оформления последующих листов расчета



## Рекомендуемая литература

### Основная

1. *Бабанов, В. В.* Теоретическая механика для архитекторов: учебник для студ. высш. учеб. заведений: в 2-х т. / В. В. Бабанов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – Т. 1. – 256 с.
2. *Бабанов, В. В.* Теоретическая механика для архитекторов: учебник для студ. высш. учеб. заведений: в 2-х т. / В. В. Бабанов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – Т. 2. – 272 с.

### Дополнительная

3. *Строительная механика* / Под ред. А. В. Даркова. – М.: Высшая школа, 1976. – 600 с.
4. *Масленников, А. М.* Начальный курс строительной механики стержневых систем: учеб. пособие для студентов строительных специальностей / А. М. Масленников. – СПб.: СПбГАСУ, 1997. – 160 с.
5. *Масленников, А. М.* Основы расчета стержневых систем на устойчивость: учеб. пособие / А. М. Масленников, В. М. Воронина. – Л.: ЛИСИ, 1980. – 66 с.
6. *Масленников, А. М.* Основы динамики и устойчивости стержневых систем: учеб. пособие / А. М. Масленников; – М.: Изд. АСВ; СПбГАСУ. – СПб., 2000. – 204 с.
7. *Масленников, А. М.* Сборник задач по строительной механике / А. М. Масленников, В. В. Бабанов, Е. Л. Лапю. – Л.: ЛИСИ, 1991. – 314 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Содержание расчетно-графических работ .....	3
Порядок получения индивидуального задания .....	4
Общие требования к оформлению расчетно-графических работ .....	4
<b>Расчетно-графическая работа № 1. Определение реакций в связях плоских статически определимых расчетных схем .....</b>	<b>5</b>
Задача 1.1. Определение реакций в связях шарнирно-консольной балки ....	5
Задача 1.2. Определение реакций в связях статически определимой рамы .	8
Задача 1.3. Определение реакций в связях трехшарнирной рамы .....	11
<b>Расчетно-графическая работа № 2. Растяжение и сжатие .....</b>	<b>13</b>
Задача 2.1. Определение усилий и напряжений при осевом растяжении (сжатии) .....	13
Задача 2.2. Расчет плоской статически определимой балочной фермы ....	15
<b>Расчетно-графическая работа № 3. Плоский изгиб .....</b>	<b>17</b>
Задача 3.1. Определение геометрических характеристик поперечных сечений стержней .....	17
Задача 3.2. Определение усилий в сечениях шарнирно-консольной балки .....	21
Задача 3.3. Определение усилий в сечениях статически определимой рамы .....	23
Задача 3.4. Определение усилий в сечениях трехшарнирной рамы .....	24
<b>Расчетно-графическая работа № 4. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил .....</b>	<b>26</b>
<b>Расчетно-графическая работа № 5. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом перемещений .....</b>	<b>30</b>
<b>Расчетно-графическая работа № 6. Расчет плоской рамы на устойчивость ...</b>	<b>34</b>
Приложения .....	39
Рекомендуемая литература .....	50