

## **ОПД.Р.03 СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

Методические указания и схемы заданий к расчетно-проектировочным работам для студентов очной и заочной форм обучения специальности 270102 – промышленное и гражданское строительство

## Введение

При изучении курса строительной механики студенты выполняют 6 расчетно-проектировочных работ:

в 1-м семестре обучения – РПР № 1, 2, 3;

во 2-м семестре обучения – РПР № 4, 5, 6.

### СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНЫХ РАБОТ

РПР № 1. Расчет статически определимых систем на действие неподвижной нагрузки.

Задача № 1.1. Расчет шарнирно-консольной балки.

Задача № 1.2. Расчет рамы.

Задача № 1.3. Расчет балочной фермы.

РПР № 2. Расчет статически определимых систем на действие подвижной нагрузки.

Задача № 2.1. Расчет шарнирно-консольной балки.

Задача № 2.2. Расчет балочной фермы.

РПР № 3. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил.

РПР № 4. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом перемещений.

РПР № 5. Динамический расчет плоской рамы с конечным числом степеней свободы на действие вибрационной нагрузки.

РПР № 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-ПРОЕКТИРОВОЧНЫХ РАБОТ

Расчетно-проектировочные работы должны быть оформлены на стандартных листах белой бумаги формата А3 (297 × 420) с соблюдением ГОСТ. При оформлении работы в компьютерном варианте допускается использование стандарт-

ных листов белой бумаги формата А4 (210 × 297), если она полностью выполнена на компьютере. Образцы оформления стандартных листов даны в приложениях 5 и 6. 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-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 1

## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ НА ДЕЙСТВИЕ ПЕПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

### Задача 1.1. Расчет 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.

Таблица 1.1

Исходные данные к задаче 1.1 РПР № 1

Первая цифра шифра	$l_1$ , м	$q$ , кН/м	$F$ , 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	2	9	0	12	15	2	0	18	0	0	2	3	4
1	16	1,5	12	1	15	18	0	2	0	25	1	3	4	2
2	18	2,5	15	2	18	12	3	0	12	0	2	4	2	3
3	12	3	18	3	12	15	0	3	0	24	3	2	3	4
4	15	3,6	15	4	15	18	1,5	0	20	0	4	3	4	2
5	12	2,4	12	5	15	12	0	1,5	0	20	5	4	2	3
6	16	1,2	9	6	12	15	2,5	0	24	0	6	2	3	4
7	18	1,8	12	7	15	18	0	2,5	0	18	7	3	4	2
8	12	1,6	15	8	18	12	3	0	25	0	8	4	2	3
9	15	4	18	9	12	15	0	3	0	15	9	3	3	4

### 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 этого использовать выражение, представляющее собой необходимое условие геометрической неизменяемости шарнирно-консольной балки,

$$Ш = С - 3,$$

где  $\Pi$  – число промежуточных шарниров;  $C$  – количество опорных связей.

Далее выполнить анализ структуры взаимодействия отдельных дисков, построив поэтажную схему.

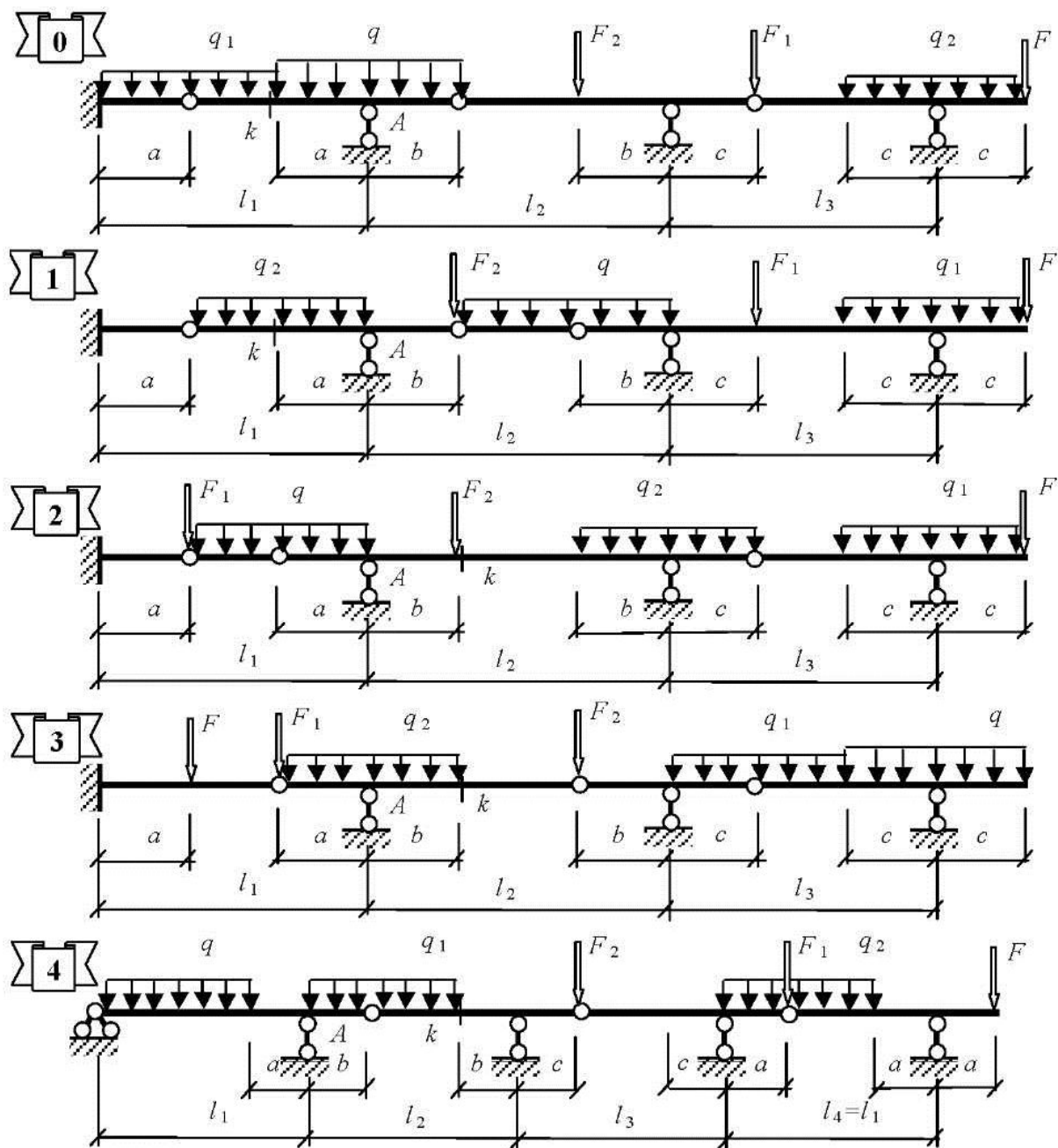


Рис. 1.1. Расчетные схемы 0–4 шарнирно-консольных балок к задачам 1.1 и 2.1

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

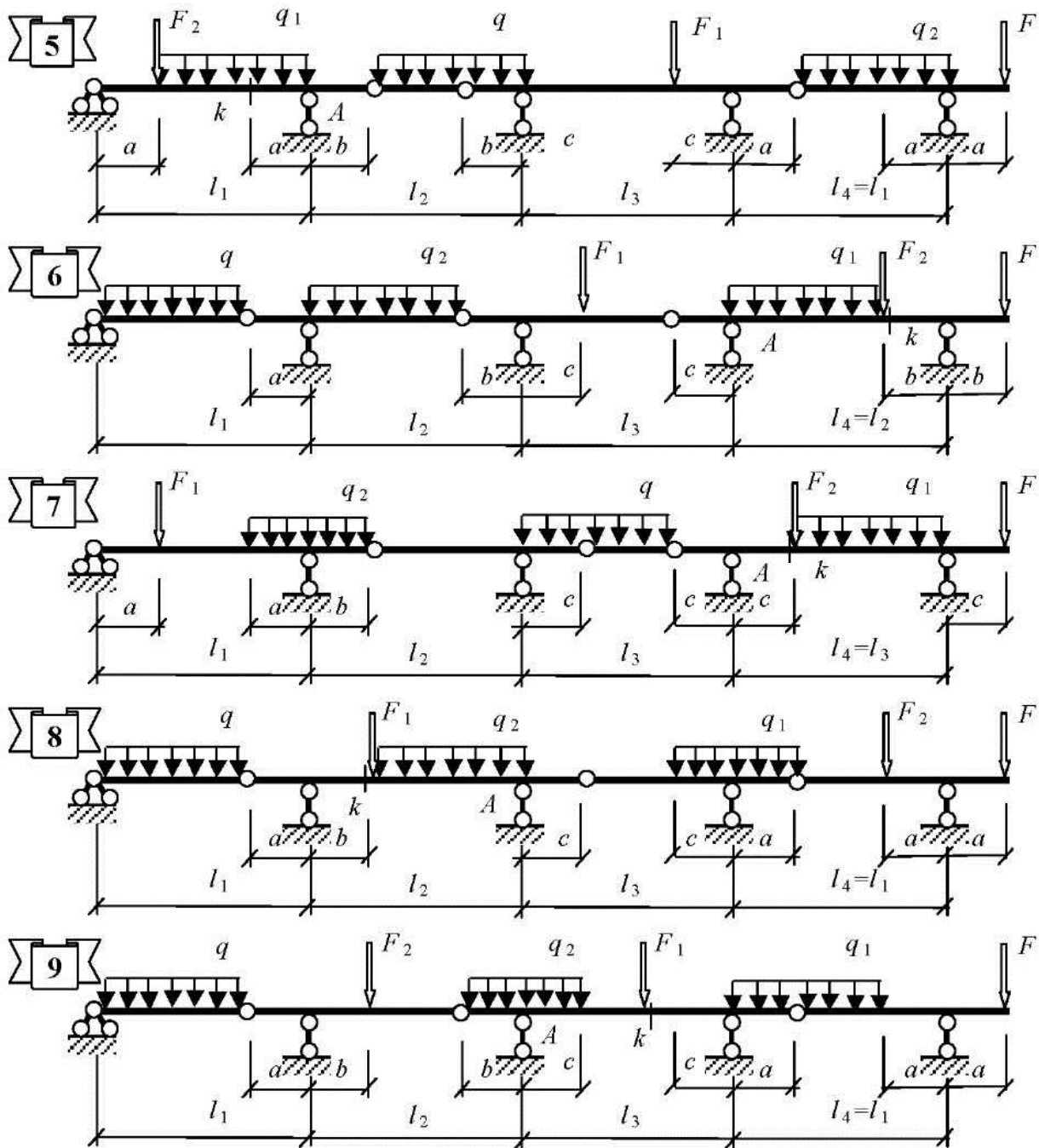


Рис. 1.2. Расчетные схемы 5–9 шарнирно-консольных балок к задачам 1.1 и 2.1

1.1.6. Построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов для отдельных дисков с объединением их для всей расчетной схемы.

1.1.7. Провести проверку построения эпюр усилий. При правильном построении на каждом участке должно соблюдаться выполнение дифференциальных зависимостей

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

### Задача 1.2. Расчет рамы

Литература: [1, с. 63–66], [2, с. 9–11, 22–30], [3, с. 42–47], [4, с. 4–11, 49–53].

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

Таблица 1.2

Исходные данные к задаче 1.2 РПР № 1

Первая цифра шифра	$M_1$ , кН·м	$M_2$ , кН·м	Вторая цифра шифра	$q_1$ , кН/м	$q_2$ , кН/м	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м
0	80	0	0	0	6	0	8	0	20	5
1	0	160	1	3	0	12	0	1	16	4
2	100	0	2	0	5	0	10	2	12	3
3	0	140	3	4	0	16	0	3	8	2
4	120	0	4	0	4	0	12	4	24	5
5	0	120	5	5	0	20	0	5	20	4
6	140	0	6	0	3	0	14	6	16	3
7	0	100	7	6	0	24	0	7	10	2
8	160	0	8	0	2	0	16	8	20	3
9	0	80	9	8	0	30	0	9	10	2

#### Последовательность расчета

1.2.1. Произвести анализ геометрической неизменяемости заданной расчетной схемы.

Необходимым, но недостаточным условием геометрической неизменяемости является выражение

$$3D - 2\Pi - C_{\text{оп}} = 0,$$

где  $D$  – количество дисков в расчетной схеме;  $\Pi$  – количество простых шарниров или число связей, необходимых до полного зацебления;  $C_{\text{оп}}$  – количество опорных связей.

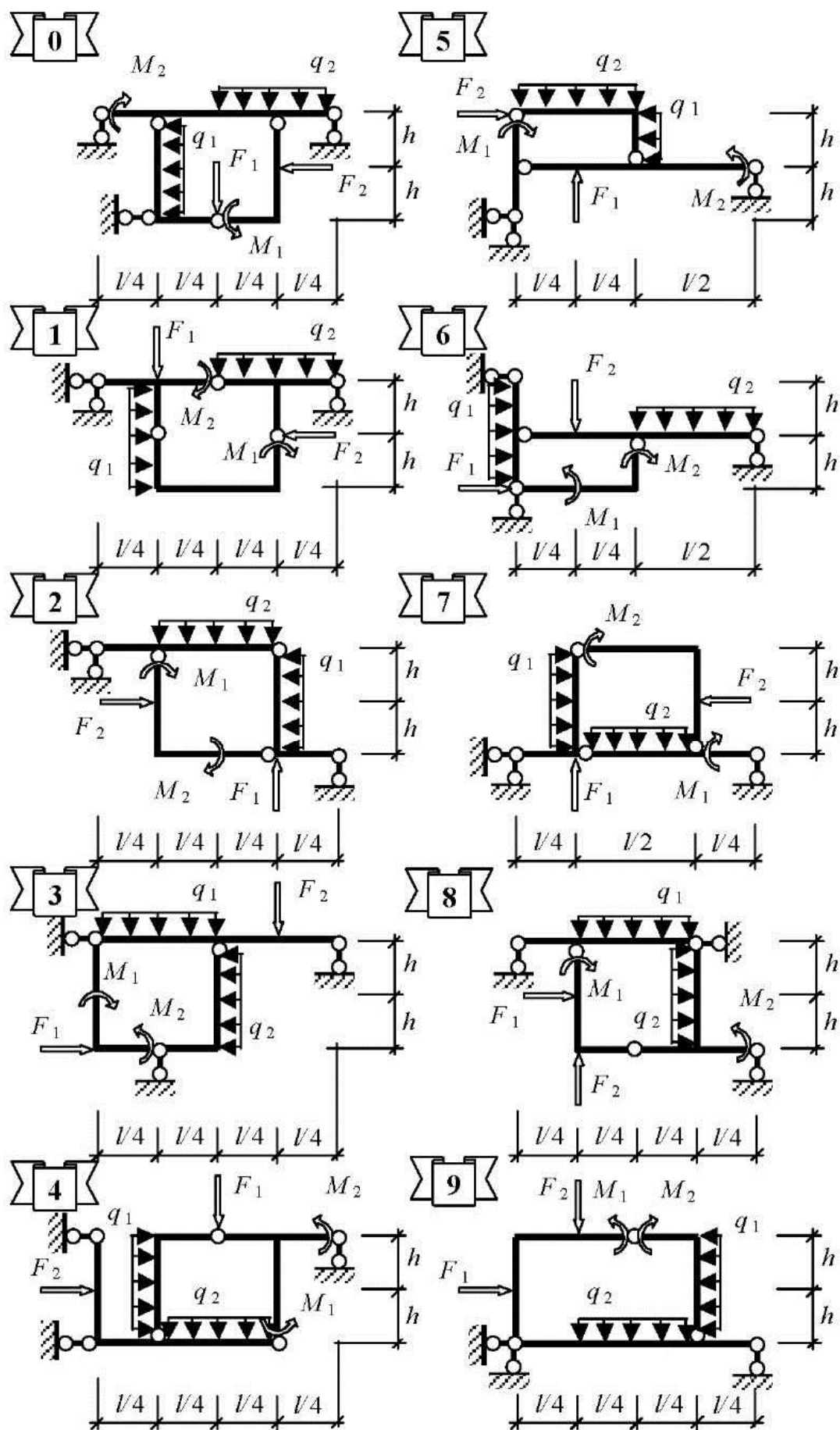


Рис. 1.3. Расчетные схемы к задаче 1.2



Достаточное условие геометрической неизменяемости проверяется анализом геометрической структуры расчетной схемы.

1.2.2. Показать расчетную схему для определения реакций в опорных связях и определить эти реакции от действия заданной внешней нагрузки.

1.2.3. Показать расчетную схему для определения реакций внутренних связей. С этой целью замкнутый контур либо расчленяется по шарнирам на отдельные диски, либо при расчленении выделяется его трехшарнирная часть. Величины реакций в местах расчленения определяются из уравнений равновесия отдельных частей расчетной схемы.

1.2.4. Построить опоры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил. Опоры можно построить сначала на отдельных частях расчетной схемы, а затем состыковать их в соответствии с заданной расчетной схемой.

1.2.5. Провести проверку построенных эпюр усилий. При правильном построении эпюр на каждом участке должны соблюдаться дифференциальные зависимости

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

а любая отсеченная часть расчетной схемы и все ее узлы должны находиться в равновесии.

### **Задача 1.3. Расчет 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. 1.3 и схемам, представленным на рис. 1.4.

#### *Последовательность расчета*

1.3.1. Изобразить в масштабе расчетную схему фермы с указанием размеров и показать вертикальную узловую нагрузку, действующую по нижнему поясу. Ко всем узлам верхнего пояса прикладываются силы  $F$ , а к крайним узлам – силы  $0,5F$ .

1.3.2. Провести анализ геометрической неизменяемости заданной схемы фермы.

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

$$C = 2У,$$

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

1.3.3. Аналитически определить опорные реакции.

Таблица 1.3

## Исходные данные к задаче 1.3 РПР № 1

Первая цифра шифра	№ панели слева	Вторая цифра шифра	$F$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$d$ , м	$h$ , м
0	2	0	1,2	0	3	2
1	3	1	1,6	1	5	2,5
2	4	2	2,0	2	4	2
3	5	3	2,4	3	6	3
4	2	4	2,8	4	4	3
5	3	5	3,2	5	6	2,25
6	4	6	3,6	6	4	2
7	5	7	4,0	7	6	2
8	2	8	4,4	8	6	3
9	3	9	4,8	9	4	1,5

1.3.4. Аналитически, используя способ сечений, а при необходимости – способ вырезания узлов, определить усилия в стержнях заданной панели, включая левую и правую стойки.

1.3.5. Построить диаграмму усилий для всей фермы и по ней определить усилия в этих же стержнях.

1.3.6. Результаты аналитического и графического расчетов заносятся в табл. 1.4 и сравниваются.

Таблица 1.4

## Сравнение результатов расчета

Наименование элементов фермы	№ стержня	Величины усилий, кН		Погрешность в % к аналитическому расчету
		при аналитическом расчете	при графическом расчете	



## РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 2

### РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ НА ДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

#### Задача 2.1. Расчет шарнирно-консольной балки

Литература: [1, с. 59–66], [2, с. 72–87], [3, с. 99–101], [4, с. 21–32].

Исходные данные к задаче принимаются те же, что при выполнении задачи 1.1 (табл. 1.1, рис. 1.1 и 1.2).

#### *Последовательность расчета*

2.1.1. Изобразить в масштабе расчетную схему балки с указанием размеров, показать действующую на нее нагрузку, положение опоры  $A$  и сечения  $k$  (см. рис. 1.1 и 1.2).

2.1.2. Под расчетной схемой балки вычертить поэтажную схему.

2.1.3. Построить линии влияния опорной реакции  $R_A$  и усилий в заданном сечении  $M_k$  и  $Q_k$ .

2.1.4. По построенным линиям влияния определить величины  $R_A$ ,  $M_k$  и  $Q_k$  от заданной неподвижной нагрузки по формуле

$$S = \sum_i F_i y_i + \sum_j q_j \omega_j ,$$

где  $y_i$  – ординаты линии влияния в месте действия сосредоточенных сил;  $\omega_j$  – площади линии влияния на участках действия равномерно распределенных нагрузок.

При использовании вышеприведенной формулы нагрузки, направленные вниз, считаются положительными; ординаты и площади линии влияния вводятся в формулу со своими знаками.

2.1.5. Полученные в п. 2.2.4 значения сравнить с результатами расчета в задаче 1.1. Результаты сравнения занести в табл. 2.1.

2.1.6. По линиям влияния для системы связанных подвижных грузов (рис. 2.1) определить максимальные и минимальные значения реакции  $R_A$ , поперечной силы  $Q_k$  и изгибающего момента  $M_k$ .

## Сравнение результатов расчета

Определяемая величина	Ед. измерения	Найденные значения		Погрешность в % к аналитическому расчету
		при аналитическом расчете	по линиям влияния	
$R_d$	кН			
$M_k$	кН·м			
$Q_k$	кН·м			

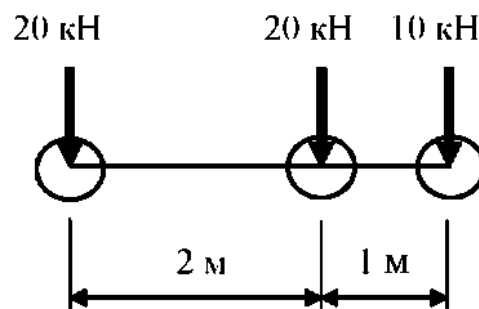


Рис. 2.1. Система подвижных грузов к задаче 2.1

**Задача 2.2. Расчет балочной фермы**

Литература: [1, с. 152–164], [2, с. 89–96], [3, с. 117–122], [4, с. 65–75].

Исходные данные к задаче принимаются те же, что при выполнении задачи 1.3 (табл. 1.3 и рис. 1.4).

*Последовательность расчета*

2.2.1. Изобразить в масштабе расчетную схему фермы с указанием размеров. Показать вертикальную узловую нагрузку, действующую по нижнему поясу. Ко всем узлам верхнего пояса прикладываются силы  $F$ , а к крайним узлам – силы  $0,5F$ .

2.2.2. Построить линии влияния опорных реакций.

2.2.3. Построить линии влияния усилий в стержнях заданной панели, включая левую и правую стойки, при нижнем ездовом поясе.

2.2.4. По линиям влияния определить величины усилий в стержнях заданной панели от неподвижной нагрузки.

2.2.5. Сравнить усилия в стержнях, вычисленные в п. 2.2.4, с аналитическим расчетом, выполненным в задаче 1.3. Результаты сравнения занести в табл. 2.2.

Сравнение результатов расчета

Наименование элементов фермы	№ стержня	Величины усилий, кН		Погрешность в % к аналитическому расчету
		при аналитическом расчете	при расчете по линиям влияния	

2.2.6. Построить линии влияния усилий в стержнях заданной панели, считая ездовой пояс нижним. От системы связанных подвижных грузов, приведенной на рис. 2.1, определить максимальные и минимальные значения усилий в рассматриваемых стержнях.

### РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 3

#### 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. 3.1 и схемам, представленным на рис.3.1.

#### *Последовательность расчета*

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

3.2. Определить степень статической неопределимости рамы

$$n_c = 3K - \text{III},$$

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

Таблица 3.1

## Исходные данные к РПР № 3

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	2	0	0	10	0	0	6	2	2
1	0	6	1	0	10	1	8	3	3
2	3	0	2	12	0	2	10	4	4
3	0	5	3	0	12	3	12	6	2
4	4	0	4	16	0	4	24	8	4
5	0	4	5	0	16	5	8	2	3
6	5	0	6	20	0	6	9	3	3
7	0	3	7	0	20	7	12	4	2
8	6	0	8	24	0	8	18	6	3
9	0	2	9	0	24	9	36	8	4

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

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

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

3.6. Показать расчетную схему основной системы при нагружении ее внешней нагрузкой, определить опорные реакции и построить в основной системе эпюру изгибающих моментов  $M_F^0$ .

3.7. 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.

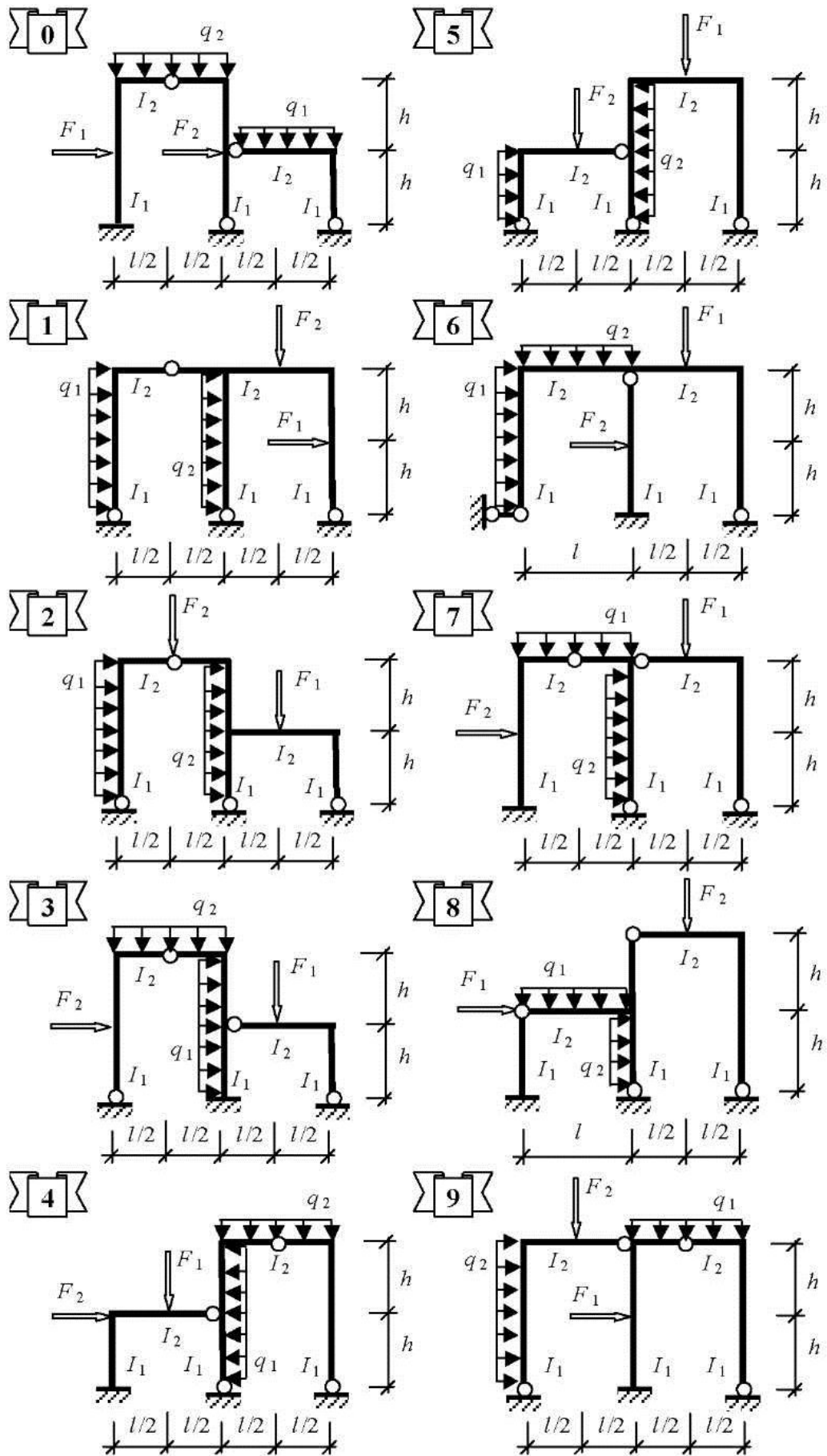


Рис. 3.1. Расчетные схемы к РПР № 3



### 3.8. Определить свободные члены системы канонических уравнений

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

*Примечание.* При перемножении простых эпюр (прямоугольники, треугольники) допускается применение правила Верещагина, а для перемножения более сложных эпюр рекомендуется воспользоваться формулой перемножения трапеций или вычислять интеграл Мора по формуле Симпсона.

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

3.10. 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  $X_i$ .

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

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

3.12. Провести деформационную проверку расчета. Для этого берется любая другая статически определимая основная система (например, вторая из выбранных в п. 3.3), в которой строится эпюра изгибающих моментов  $\overline{M}_s^0 = \sum_1^n \overline{M}_i^0$

от одновременного действия на нее всех единичных сил, приложенных по направлению удаленных связей. При правильно выполненном расчете должно выполняться условие

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

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

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

3.13. Построить эпюру поперечных сил  $Q_F$  в заданной системе, используя дифференциальную зависимость  $Q_F = dM/dx$ .

3.14. 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.

3.15. Провести 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-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 4

### 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. 4.1 и схемам, представленным на рис. 4.1.

*Таблица 4.1*

**Исходные данные к РПР № 4**

Первая цифра шифра	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	Вторая цифра шифра	$q_1$ , кН/м	$q_2$ , кН/м	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м	$I_2 : I_1$
0	16	0	0	2	0	0	12	6	2
1	0	16	1	0	2	1	8	4	3
2	24	0	2	4	0	2	16	8	3
3	0	24	3	0	3	3	16	4	4
4	32	0	4	6	0	4	12	4	3
5	0	32	5	0	4	5	18	6	6
6	40	0	6	3	0	6	24	8	4
7	0	36	7	0	6	7	6	6	2
8	36	0	8	8	0	8	8	8	2
9	0	40	9	0	8	9	24	6	4

### Последовательность расчета

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

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

$$n_k = n_y + n_l,$$

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

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

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

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

4.6. Используя таблицы реакций (пункты 1–4, приложение 1), построить эпюры изгибающих моментов  $M_i^0$  от указанных в п. 4.4 единичных смещений.

4.7. Используя таблицы реакций (пункты 5–8, приложение 1), построить в основной системе метода перемещений эпюру от заданного нагружения.

4.8. 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:

- реакции в дополнительных угловых связях определяются непосредственно из равновесия жесткого узла, в который введена угловая связь;
- реакции в дополнительных линейных связях ортогональных рам определяются из условия равновесия отсеченной части основной системы, при этом сечения (сквозные или замкнутые) проводятся параллельно оси линейной связи через все стержни схемы, получившие деформации (см. п. 4.4) при смещении данной связи;
- реакция в дополнительной связи считается положительной, если она направлена в сторону заданного в п. 4.4 смещения этой связи;
- все схемы по определению реакций в дополнительных связях должны быть приведены на чертеже.

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

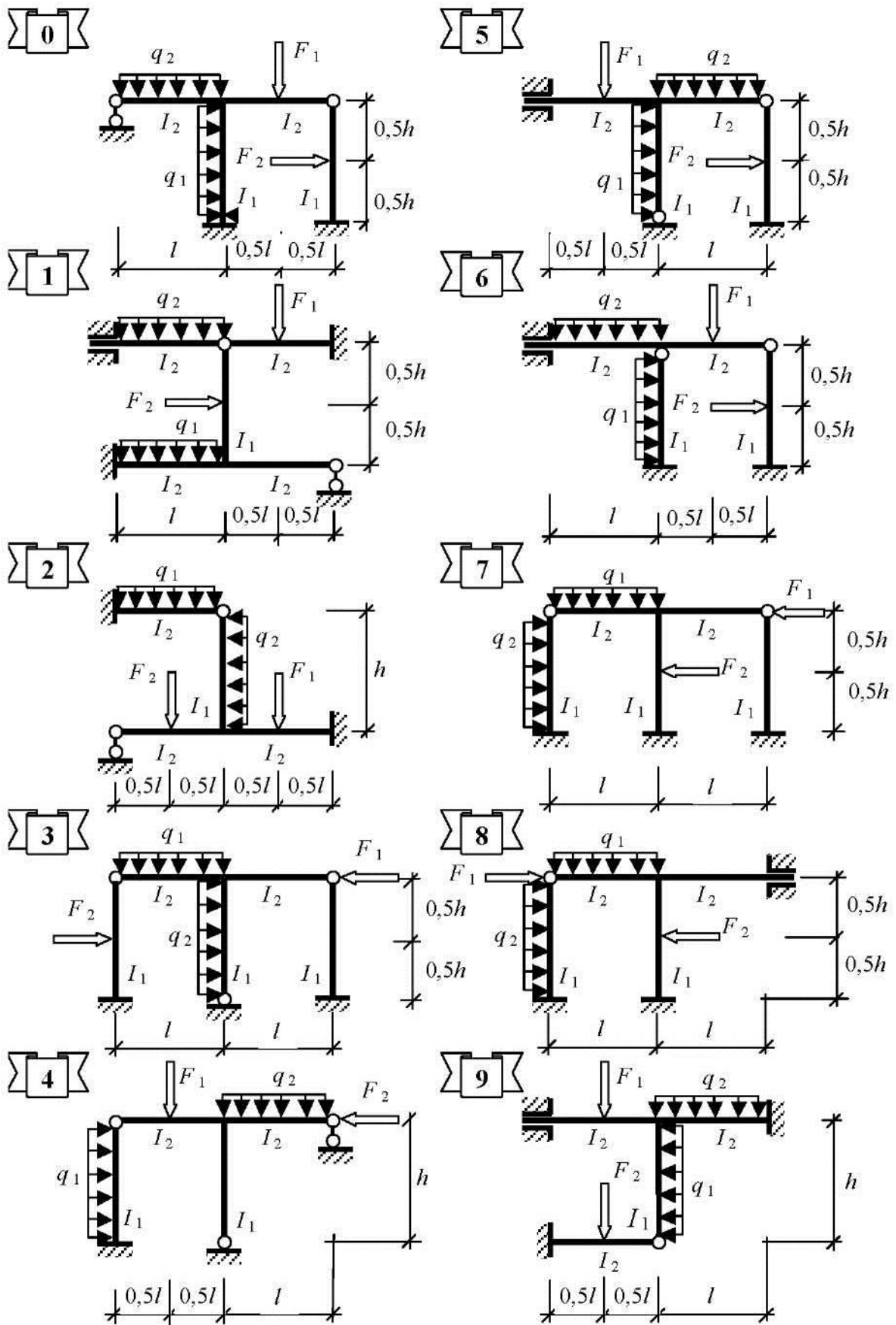


Рис. 4.1. Схемы заданий к РПР № 4

4.10. 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

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

4.11. Провести проверки правильности построения эпюры:

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

$$\sum_{i=1}^m \int_0^l \frac{\overline{M}_s^0 M_F}{EI} dx = 0.$$

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

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

4.14. 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-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 5

### ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЛОСКОЙ РАМЫ С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ НА ДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Литература: [6, с. 124–220]; [7, с. 3–61]; [9, с. 54–65, 69–82].

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

#### *Последовательность расчета*

5.1. Вычертить в масштабе заданную расчетную схему рамы с указанием размеров, величин масс, вибрационной нагрузки и соотношения жесткостей стержней.

5.2. Определить число степеней свободы сосредоточенных масс заданной расчетной схемы.

5.3. Показать расчетную схему рамы при действии амплитудных значений инерционных сил и вибрационной нагрузки.

5.4. Записать в общем виде уравнение частот свободных колебаний применительно к заданной расчетной схеме.

*Таблица 5.1*

**Исходные данные к РНР № 5**

Первая цифра шифра	$m_1$ , г	$a$ , м	$b$ , м	Вторая цифра шифра	$\frac{\theta}{\omega_{\min}}$	$\frac{I_2}{I_1}$	$P_1$ , кН	$P_2$ , кН	Третья цифра шифра (№ схемы)	$l$ , м	$h$ , м	$m_2$ , г	$EI_1$ , кН·м <sup>2</sup>
0	0,5	1	4	0	0,5	1,5	20	0	0	12	6	1,0	8000
1	0,6	2	6	1	0,55	2	0	20	1	16	8	1,2	12000
2	0,7	3	3	2	0,6	2,5	25	0	2	18	9	1,2	15000
3	0,8	1	4	3	0,65	3	0	25	3	20	8	1,1	18000
4	0,9	2	6	4	0,7	1,5	30	0	4	24	10	1,3	21000
5	1,0	3	3	5	0,68	2	0	30	5	12	8	1,4	9000
6	1,1	1	4	6	0,8	2,5	35	0	6	15	9	1,5	10000
7	1,2	3	6	7	0,72	3	0	15	7	16	6	1,6	7500
8	1,3	2	3	8	0,66	3,5	40	0	8	18	8	1,7	8500
9	1,4	3	4	9	0,58	4	10	10	9	20	8	1,8	16000

*Примечание.* В таблице приведены амплитудные значения вибрационной нагрузки  $P_i(t) = P_i \sin \theta t$ .

5.5. По направлению возможных смещений масс последовательно приложить единичные силы и от действия каждой из них построить эпюры изгибающих моментов  $M_i$ .

5.6. Определить коэффициенты уравнения частот

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

где  $m$  – число участков интегрирования.

5.7. Составить уравнение частот в численном виде.

5.8. Определить корни частотного уравнения  $1_i (i = 1, \dots, n)$  и провести проверки правильности его решения:

1.  $S_p(D) = \sum \lambda_i$ ;
2.  $|D| = \prod \lambda_i$ ,

где  $S_p(D)$  – след (сумма главных коэффициентов) матрицы, составленной из коэффициентов частотного уравнения;  $|D|$  – величина определителя этой матрицы.

5.9. Определить частоты свободных колебаний масс

$$\omega_i = \sqrt{\frac{1}{\lambda_i}}.$$

5.10. Определить периоды свободных колебаний

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}.$$

5.11. Из определенного в п. 5.7 спектра частот свободных колебаний выявить наименьшее значение  $\omega_{min}$  и определить круговую частоту вынужденных колебаний по заданному в табл. 5.1 соотношению.

5.12. Показать расчетную схему рамы при действии на нее амплитудных значений нагрузок и инерционных сил.

5.13. Записать в общем виде систему канонических уравнений для определения амплитудных значений инерционных сил применительно к заданной расчетной схеме.

5.14. Построить в заданной расчетной схеме эпюру изгибающих моментов  $M_p$  от действия амплитудных значений вибрационной нагрузки.

5.15. Определить главные коэффициенты системы канонических уравнений

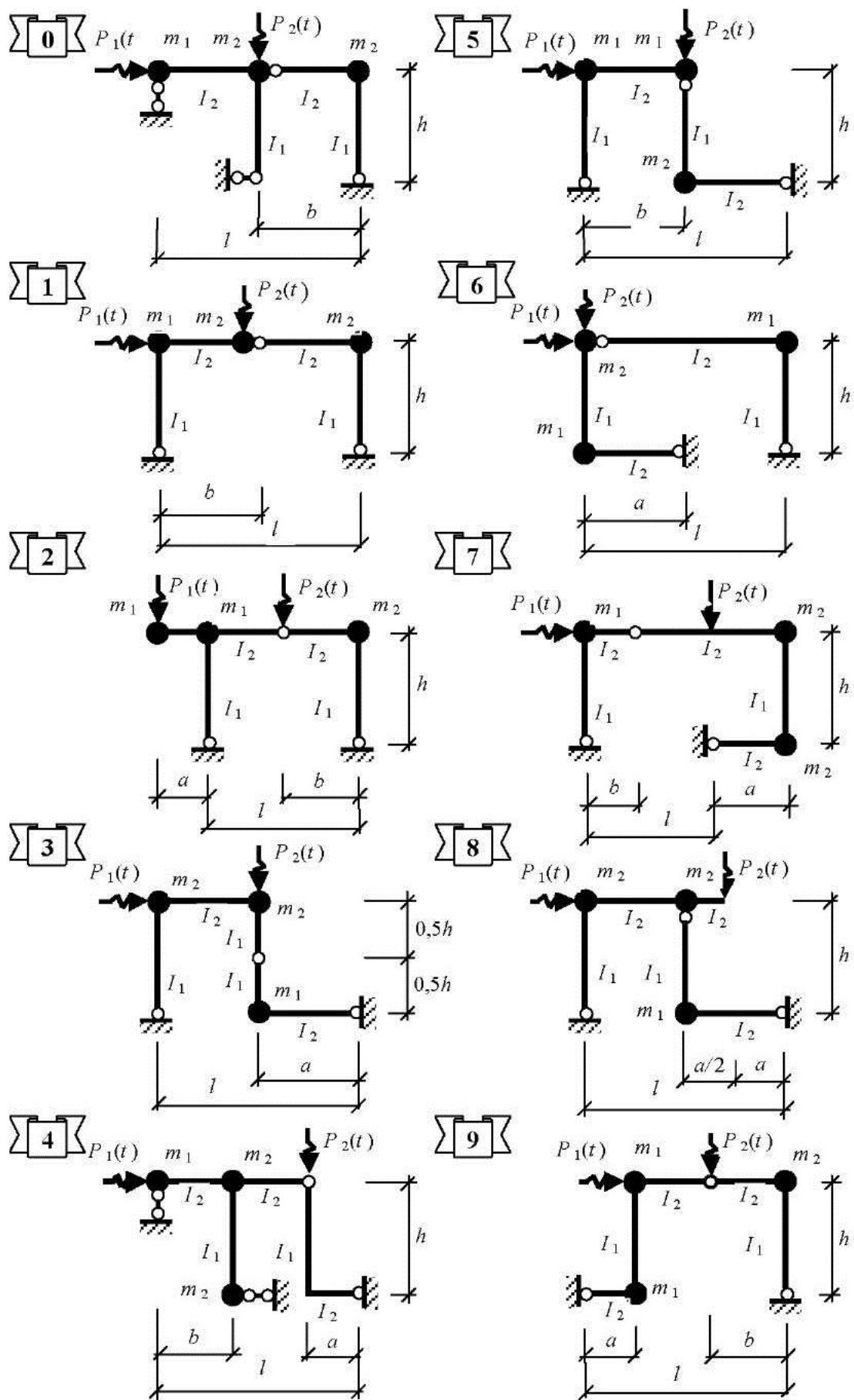


Рис. 5.1. Схемы заданий к РПР № 5



$$\delta_{ii}^* = \delta_{ii} - \frac{1}{m_i \omega^2}.$$

Побочные коэффициенты системы канонических уравнений имеют те же значения, что и в уравнении частот.

5.16. Определить свободные члены системы канонических уравнений

$$\Delta_{iP} = \sum_1^m \int_0^l \frac{M_i M_P}{EI} dx.$$

5.17. Записать систему канонических уравнений в численном виде и из ее решения определить амплитудные значения инерционных сил  $J_i$ .

5.18. Построить динамическую эпюру изгибающих моментов

$$M_{\text{дин}} = M_1 J_1 + M_2 J_2 + \dots + M_n J_n + M_P.$$

## РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ РАБОТА № 6

### РАСЧЕТ ПЛОСКОЙ РАМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Литература: [1, с. 486–503]; [6, с. 41–77]; [8, с. 21–52]; [146–164].

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

Таблица 6.1

Исходные данные к РПР № 6

Первая цифра шифра	$EI_1$ , кН·м <sup>2</sup>	$\frac{EI_2}{EI_1}$	Вторая цифра шифра	$l_1$ , м	$\frac{F_2}{F_1}$	Третья цифра шифра шифра (№ схемы)	$l_2$ , м	$h_1$ , м	$h_2$ , м
0	8000	1,5	0	12	1,21	0	12	4,2	3,2
1	9000	2,0	1	15	0,81	1	15	3,6	3,0
2	10000	1,8	2	18	1,44	2	18	4,8	3,3
3	12000	2,4	3	21	2,89	3	21	2,7	2,7
4	8500	2,7	4	24	2,56	4	24	3,3	3,3
5	9600	3,0	5	21	1,69	5	27	4,0	3,6
6	10500	3,3	6	18	1,96	6	24	4,5	4,0
7	12600	3,6	7	15	0,64	7	21	3,6	2,7
8	15000	4,2	8	12	0,49	8	18	5,4	4,0
9	14200	2,2	9	27	3,24	9	15	5,0	3,6

### Последовательность расчета

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;  $EI_n$  – жесткость при изгибе;  $h_n$  – длина сжатого стержня.

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

6.4. Выбрать 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 приложений 1 и 2.

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  $v_{cr}$  при помощи таблиц трансцендентных функций (приложения 3 и 4) или на ПК при помощи учебной программы BUCKLING.

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

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

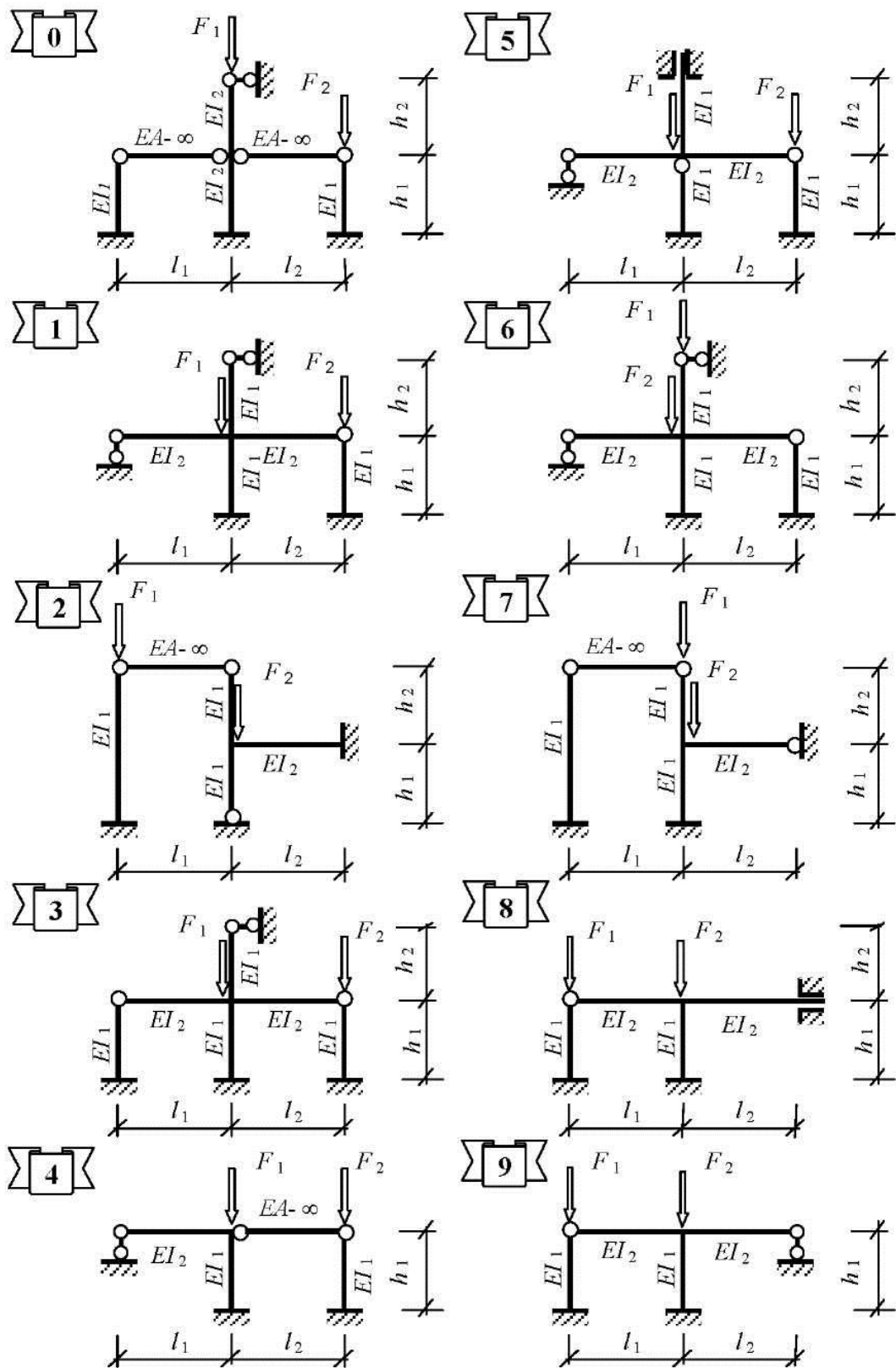


Рис. 6.1. Схемы заданий к РПР № 6

Порядок работы по учебной программе  
**BUCLING**

1. Открыть **BUCLING.exe**.
2. В открывшемся окне выбрать **ВАША ФУНКЦИЯ**, нажать **ENTER**.
3. В появившемся окне ознакомиться с принятыми в программе обозначениями трансцендентных функций и нажать **ENTER**.
4. В следующем появившемся окне набрать левую часть уравнения устойчивости.
5. Сохранить записанное уравнение →**F2**.
6. Нажать **ESC**.
7. В следующем появившемся окне ввести последовательно интервалы поиска критического параметра и точность (шаг) поиска:  
**0.0→ENTER→6.28→ENTER→0.01→ENTER**.
8. На появившемся графике выбрать значение наименьшего критического параметра, отмеченного красным цветом.
9. Нажать **ESC**.
10. В появившемся окне выбрать **ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ** и выйти из программы.

## Приложения

Приложение 1

**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;  $(u + v) = l$

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

№ п.п.	Схема воздействия	Значения опорных реакций	Эпюры изгибающих моментов
1		$3i\varphi_1(v)$ $\frac{3i}{l}\varphi_1(v)$ $\frac{3i}{l}\varphi_1(v)$	
2		$\frac{3i}{l}\varphi_1(v)$ $\frac{3i}{l^2}\eta_1(v)$ $\frac{3i}{l^2}\eta_1(v)$	
3		$\frac{6i}{l}\varphi_4(v)$ $\frac{6i}{l}\varphi_4(v)$ $\frac{12i}{l^2}\eta_2(v)$ $\frac{12i}{l^2}\eta_2(v)$	
4		$4i\varphi_2(v)$ $2i\varphi_3(v)$ $\frac{6i}{l}\varphi_4(v)$ $\frac{6i}{l}\varphi_4(v)$	
5		$iv \operatorname{tg} v$	
6		$iv \operatorname{tg} v$ $iv \operatorname{sin} v$	
7		$\frac{iv^2}{l^2}$ $\frac{iv^2}{l^2}$	

$i = \frac{EI}{l}$  – относительная жесткость стержня;

$v = l \sqrt{\frac{N}{EI}}$  – критический параметр сжато-изогнутого стержня.

Таблица значений трансцендентных функций метода перемещений для сжато-изогнутых стержней

$\nu$	$\Phi_1(\nu)$	$\Phi_2(\nu)$	$\Phi_3(\nu)$	$\Phi_4(\nu)$	$\eta_1(\nu)$	$\eta_2(\nu)$
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

$\nu$	$\Phi_1(\nu)$	$\Phi_2(\nu)$	$\Phi_3(\nu)$	$\Phi_4(\nu)$	$\eta_1(\nu)$	$\eta_2(\nu)$
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

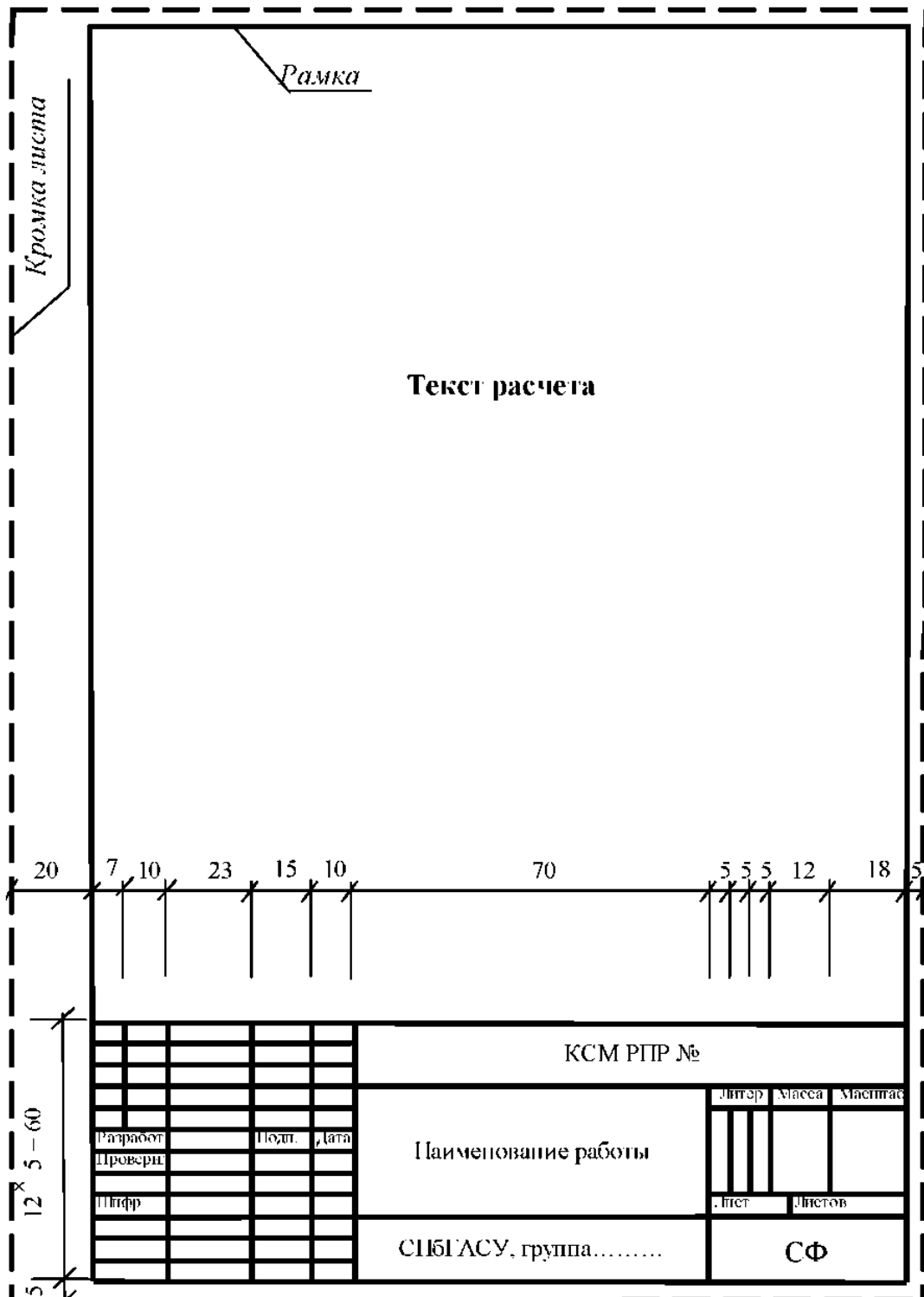


**Таблица значений специальных функций метода  
перемещений для сжато-изогнутых стержней**

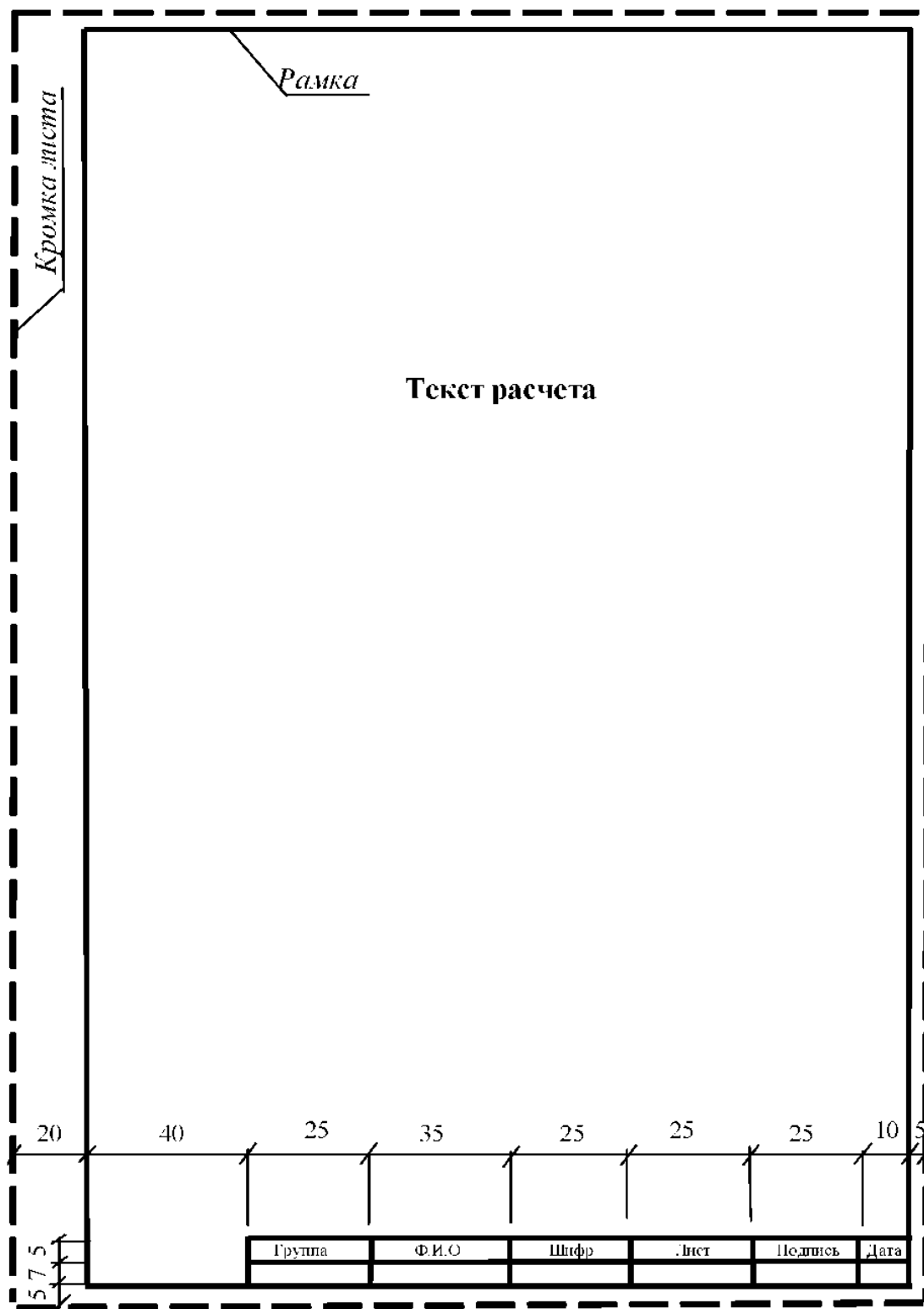
$v$	$v/\operatorname{tgv}$	$v/\sin v$	$v\operatorname{tgv}$	$\cos v$	$\sin v$	$\operatorname{tgv}$
0,0	1,0000	1,0000	0,0000	1,00000	0,00000	0,00000
1,10	0,9967	1,0017	0,0100	0,99500	0,09983	0,10033
0,20	0,9866	1,0067	0,0405	0,98007	0,19867	0,20271
0,30	0,9698	1,0152	0,0928	0,95534	0,29552	0,30934
0,40	0,9461	1,0272	0,1691	0,92106	0,38942	0,42279
0,50	0,9152	1,0429	0,2731	0,87758	0,47943	0,54630
0,60	0,8770	1,0626	0,4105	0,82534	0,56464	0,68414
0,70	0,8311	1,0866	0,5896	0,76484	0,64422	0,84229
0,80	0,7770	1,1152	0,8237	0,69671	0,71736	1,02964
0,90	0,7142	1,1489	1,1341	0,62161	0,78333	1,26016
1,0	0,6421	1,1885	1,5574	0,54030	0,84147	1,55741
1,10	0,5599	1,2343	2,1612	0,45360	0,89121	1,96476
1,20	0,4665	1,2875	3,0866	0,36236	0,93204	2,57215
1,30	0,3609	1,3493	4,6827	0,26750	0,96356	3,60210
1,40	0,2415	1,4207	8,1170	0,16997	0,98545	5,79788
1,50	0,1064	1,5038	21,1521	0,07074	0,99749	14,10142
1,60	0,0467	1,6007	54,7721	0,02920	0,99957	37,23253
1,70	-0,2209	1,7143	-13,0842	-0,12884	0,99166	-7,69660
1,80	0,4199	1,8483	7,7153	0,22720	0,92385	4,28626
1,90	0,6491	2,0078	5,5615	0,32329	0,94630	2,92710
2,0	-0,9153	2,1995	-4,3701	-0,41615	0,90930	-2,18504
2,10	1,2282	2,4328	3,5907	0,50485	0,86321	1,70985
2,20	-1,6014	2,7211	-3,0224	-0,58850	0,80850	-1,37382
2,30	2,0550	3,0843	2,5742	0,66628	0,74571	0,11921
2,40	2,6201	3,5531	2,1984	0,73739	0,67546	0,91601
2,50	-3,3466	4,1773	-1,8675	-0,80114	0,59847	-0,74702
2,60	4,3218	5,0436	1,5642	0,85689	0,51550	0,60160
2,70	5,711	6,3176	1,2764	0,90407	0,42738	0,47273
2,80	-7,8756	8,3585	-0,9955	-0,94222	0,33499	-0,35553
2,90	-11,769	12,1212	-0,7146	-0,97096	0,23925	-0,24641
3,0	21,0452	21,2585	0,4276	0,98999	0,14112	0,14255
3,10	74,4888	74,5533	0,1321	0,99914	0,04158	0,04162
3,20	54,7289	54,8227	0,1871	0,99829	0,05837	0,05847
3,30	20,6573	-20,9192	0,5272	-0,98748	-0,15775	0,15975
3,40	12,8632	-13,3052	0,8967	-0,96680	-0,25554	0,26432
3,50	9,3435	9,9778	1,3111	0,93646	0,35078	0,37459

$v$	$v/\operatorname{tg}v$	$v/\sin v$	$v/\operatorname{tg}v$	$\cos v$	$\sin v$	$\operatorname{tg}v$
3,60	7,2953	-8,1352	1,7765	-0,89676	-0,44252	0,49347
3,70	5,9226	6,9832	2,3115	0,84810	0,52984	0,62473
3,80	4,9123	6,2106	2,9395	0,79097	0,61186	0,77356
3,90	4,1164	5,6705	3,69449	0,72593	0,68777	0,94742
4,0	3,4548	5,2854	4,6313	0,65364	0,75680	1,15782
4,20	2,3625	4,8188	7,4667	0,49026	0,82158	1,77778
4,30	1,8811	-4,6934	9,8291	-0,40080	-0,91617	2,28585
4,40	1,4210	-4,6238	13,6238	-0,30733	-0,95160	3,09632
4,50	0,9704	-4,6034	20,8680	-0,21080	-0,97753	4,63733
4,60	0,5192	4,6292	40,7568	0,11215	0,99369	8,86017
4,70	0,0582	-4,7004	379,350	-0,01239	-0,99992	80,71276
4,80	0,4216	4,8185	54,6474	0,08750	0,99616	11,3849
4,90	0,9302	4,9875	25,8107	0,18651	0,98245	5,26749
5,0	1,4791	5,2142	16,9026	0,28366	0,95892	3,38052
5,10	-2,0821	-5,5087	-12,4919	0,37798	-0,92581	-2,44939
5,20	-2,7577	-5,8860	-9,8053	0,46852	-0,88345	-1,88564
5,30	-3,5303	-6,3681	-7,9567	0,55437	-0,63227	-1,50127
5,40	-4,4352	-6,9879	-6,5747	0,63469	-0,77276	-1,21754
5,50	-5,5244	-7,7954	-5,4757	0,70867	-0,70554	-0,99558
5,60	6,8801	8,8710	4,5581	0,77557	0,63127	0,81394
5,70	8,6399	10,3506	3,7605	0,83471	0,55069	0,65973
5,80	11,0546	12,4839	3,0431	0,88552	0,46460	0,52467
5,90	14,6362	15,7805	2,3783	0,92748	0,37388	0,40311
6,0	20,6178	21,4731	1,7461	0,96017	0,27942	0,29101
6,10	-32,9263	-33,4867	-1,1301	0,98327	-0,18216	-0,18526
6,20	-74,3604	-74,6184	-0,5170	0,99654	-0,08309	-0,08338

Образец оформления первого листа расчета



Образец оформления последующих листов расчета



## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная механика / Под ред. А. В. Даркова. – М.: Высшая школа, 1976. – 600 с.
2. Масленников А. М. Начальный курс строительной механики стержневых систем: учебное пособие для студентов строительных специальностей. СПб.: СПб гос. архит.-строит. ун-т, 1997. – 160 с.
3. Киселев В. А. Строительная механика. М.: Стройиздат, 1976. – 511 с.
4. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики / Под ред. Г. К. Клейна. – М.: Высшая школа, 1973. – 360 с.
5. Масленников А. М. Расчет строительных конструкций численными методами: учебное пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 224 с.
6. Клейн Г. К. и др. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. – М.: Высшая школа, 1972. – 320 с.
7. Масленников А. М., Воронина В. М. Основы динамики стержневых систем: учебное пособие. Л.: ЛИСИ, 1981. – 82 с.
8. Масленников А. М., Воронина В. М. Основы расчета стержневых систем на устойчивость: учебное пособие. – Л.: ЛИСИ, 1980. – 66 с.
9. Масленников А. М. Основы динамики и устойчивости стержневых систем: учебное пособие / СПбГАСУ. СПб.: ООО Изд-во АСВ. – М.: 2000. – 204 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	1
Содержание расчетно-проектировочных работ .....	1
Порядок получения индивидуального задания .....	1
Общие требования к оформлению расчетно-проектировочных работ .....	1
Расчетно-проектировочная работа № 1. Расчет статически определимых систем на действие неподвижной нагрузки .....	3
Задача 1.1. Расчет шарнирно-консольной балки .....	3
Задача 1.2. Расчет рамы .....	6
Задача 1.3. Расчет балочной фермы .....	8
Расчетно-проектировочная работа № 2. Расчет статически определимых систем на действие подвижной нагрузки .....	11
Задача 2.1. Расчет шарнирно-консольной балки .....	11
Задача 2.2. Расчет балочной фермы .....	12
Расчетно-проектировочная работа № 3. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил .....	13
Расчетно-проектировочная работа № 4. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом перемещений .....	17
Расчетно-проектировочная работа № 5. Динамический расчет плоской рамы с конечным числом степеней свободы на действие вибрационной нагрузки .....	21
Расчетно-проектировочная работа № 6. Расчет плоской рамы на устойчивость .....	24
Приложения .....	28