

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра подъемно-транспортных, строительных,  
дорожных машин и оборудования**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е. И. Луковникова

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ**

**Б1.В.11**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и  
оборудование**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>4</b>
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	10
4.3 Лабораторные работы.....	14
4.4 Практические занятия.....	14
4.5. Контрольные мероприятия: курсовая работа.....	15
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>16</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>19</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>19</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>20</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>20</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных и практических работ.....	22
9.2. Методические указания для обучающихся по выполнению курсовой работы.....	80
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>81</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>82</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>84</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>92</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>94</b>

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к проектно-конструкторскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Основной целью изучения дисциплины «Строительная механика и металлоконструкции» является дать обучающемуся необходимый объем фундаментальных знаний в области разработки конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

## Задачи дисциплины

Задачей изучения дисциплины является формирование у обучающегося системы инженерно-конструкторских знаний, позволяющих успешно решать научно-технические проблемы, возникающие в процессе профессиональной деятельности.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	<p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-основные методы исследования и проектирования металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-разрабатывать расчётные схемы при расчёте металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</li> </ul> <p><b>владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-современными средствами информационных технологий и машинной графики.</li> </ul>
ПК-4	Способность в составе коллектива исполнителей участвовать в разработке конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-технологических машин и комплексов	<p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-основы конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-разрабатывать основы конструкторско-технической документации в составе коллектива исполнителей новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</li> </ul> <p><b>владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-навыками разработки конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин в составе коллектива исполнителей.</li> </ul>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.11 Строительная механика и металлоконструкции относится к вариативной части.

Дисциплина Строительная механика и металлоконструкции базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как математика, информатика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов.

Основываясь на изучении вышеперечисленных дисциплин, Строительная механика и металлоконструкции представляет основу для изучения дисциплин: конструкция наземных транспортно-технологических машин, эффективность использования транспортно-технологических систем.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	3	6	252	90	36	36	18	126	кр	экзамен
Заочная	3	-	252	20	8	8	4	223	кр	экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	2	-	252	16	6	6	4	227	кр	экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			6
1	2	3	4
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	90	20	90
Лекции (Лк)	36	17	36
Лабораторные работы (ЛР)	36	3	36
Практические занятия (ПЗ)	18	-	18

Контрольная работа	+	-	+
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	126	-	126
Подготовка к лабораторным работам	33		33
Подготовка к практическим занятиям	33	-	33
Подготовка к экзамену в течение семестра	36	-	36
Выполнение контрольной работы	24	-	24
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен</b>	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины час. зач. ед.	252	-	252
	7	-	7

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Тематическое содержание дисциплины	8	2	-	-	6
2.	Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций	13	2	-	4	7
3.	Расчет статически определимых простых и составных балок и рам	13	2	-	4	7
4.	Энергетические теоремы и определение перемещений	9	2	-	-	7
5.	Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм	26	2	9	6	9
6.	Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем	20	2	9	-	9
7.	Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций.	9	2	-	-	7

	Расчет пластин численными методами					
8.	Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность	9	2	-	-	7
9.	Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов	9	2	-	-	7
10.	Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний	10	2	-	-	8
11.	Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений	9	2	-	-	7
12.	Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений	9	2	-	-	7
13.	Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов	9	2	-	-	7
14.	Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок	9	2	-	-	7
15.	Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции	22	2	9	4	7
16.	Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции	9	2	-	-	7
17.	Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных,	23	4	9	-	10

	строительных и дорожных машин					
	<b>ИТОГО</b>	<b>216</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>126</b>

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Тематическое содержание дисциплины	8,2	0,2	-	-	8
2.	Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций	14,5	0,5	-	1	13
3.	Расчет статически определимых простых и составных балок и рам	14,5	0,5	-	1	13
4.	Энергетические теоремы и определение перемещений	13,5	0,5	-	-	13
5.	Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм	16,5	0,5	2	1	13
6.	Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем	16,5	0,5	2	-	14
7.	Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами	13,5	0,5	-	-	13
8.	Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность	13,5	0,5	-	-	13
9.	Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального	15,3	0,3	-	-	15

	<b>выбора материалов</b>					
10.	Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний	14,5	0,5	-	-	14
11.	Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений	13,5	0,5	-	-	13
12.	Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений	13,5	0,5	-	-	13
13.	Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов	13,5	0,5	-	-	13
14.	Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок	13,5	0,5	-	-	13
15.	Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции	16,5	0,5	2	1	13
16.	Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции	13,5	0,5	-	-	13
17.	Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин	18,5	0,5	2	-	16
	<b>ИТОГО</b>	<b>243</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>223</b>

- для заочной формы обучения (ускоренное обучение):

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Тематическое содержание дисциплины	10,2	0,2	-	-	10
2.	Кинематический анализ	14,4	0,4	-	1	13

	<b>расчетных схем стержневых конструкций</b>					
3.	<b>Расчет статически определимых простых и составных балок и рам</b>	14,4	0,4	-	1	13
4.	<b>Энергетические теоремы и определение перемещений</b>	13,2	0,2	-	-	13
5.	<b>Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм</b>	16,9	0,4	1,5	1	14
6.	<b>Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем</b>	15,9	0,4	1,5	-	14
7.	<b>Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами</b>	13,4	0,4	-	-	13
8.	<b>Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность</b>	13,4	0,4	-	-	13
9.	<b>Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов</b>	15,2	0,2	-	-	15
10.	<b>Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний</b>	14,4	0,4	-	-	14
11.	<b>Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений</b>	13,4	0,4	-	-	13
12.	<b>Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений</b>	14,4	0,4	-	-	14
13.	<b>Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости.</b>	13,3	0,3	-	-	13

	<b>Усталостная долговечность сварных узлов</b>					
<b>14.</b>	<b>Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок</b>	<b>13,3</b>	<b>0,3</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>13</b>
<b>15.</b>	<b>Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции</b>	<b>15,9</b>	<b>0,4</b>	<b>1,5</b>	<b>1</b>	<b>13</b>
<b>16.</b>	<b>Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции</b>	<b>13,4</b>	<b>0,4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>13</b>
<b>17.</b>	<b>Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин</b>	<b>17,9</b>	<b>0,4</b>	<b>1,5</b>	<b>-</b>	<b>16</b>
	<b>ИТОГО</b>	<b>243</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>227</b>

#### **4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам.**

##### **Алгоритм проведения интерактивного занятия в форме лекции – визуализации:**

###### *1. Подготовка занятия*

Слайд-презентацию лекции по теме занятия согласно учебного плана подготавливает преподаватель.

###### *2. Вступление* (мотивация бакалавра на новую форму освоения материала).

Излагается тема, план и цель лекции. Поясняется, что реализуемый в дальнейшем на занятии принцип наглядности компенсирует недостаточную зрелищность учебного процесса. Для создания предпосылки мотивации обучающихся приводится интересный факт, иллюстрируемый средствами мультимедиа, или задаётся мотивирующий вопрос. При этом один из их ожидаемых ответов на него демонстрируется в форме видеоряда.

###### *3. Основная часть* (формулировка и изложение вопросов).

В начале изучения каждого вопроса производится его визуализация на опорных слайдах презентации, а в процессе его изложения используются различные формы наглядности: натуральные, изобразительные или символические. При этом допускаются паузы в изложении для того, чтобы обучающиеся успевали законспектировать воспринятую визуальную информацию – и не механически, а осмысленно, а также, чтобы они имели возможность кратковременной разрядки по истечении пиков внимания. В ходе лекции используются реплики: «это следует записать буквально или изобразить подробно», «сейчас можно просто послушать или пронаблюдать». Повторами и более медленным темпом выделяется наиболее важная информация, проводится контроль за её фиксацией.

###### *4. Заключение*

Напоминание темы и цели занятия, основных позиций лекции с применением опорных слайдов презентации. Подведение итогов в виде фронтальной беседы и ответов на ключевые вопросы темы.

<i>№ раздела и темы</i>	<i>Наименование раздела и темы дисциплины</i>	<i>Содержание лекционных занятий</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2	3	4
1.	Тематическое содержание дисциплины	Введение. Общие сведения о дисциплине. Особенности металлоконструкции СДМ. Расчетные схемы	-
2.	Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций	Кинематический анализ плоских и пространственных стержневых систем Тела и связи. Степень изменяемости системы. Образование и кинематический анализ системы.	Лекция-визуализация (2 часа)
3.	Расчет статически неопределимых простых и составных балок и рам	Расчет статически определимых стержневых систем при действии подвижной нагрузки. Основные понятия. Статический метод построения линий влияния в балках. Кинематический метод построения линий влияния в балках. Определение усилий по линиям влияния. Линии влияния при узловой передаче нагрузки. Построение линий влияния усилий в фермах. Статический и кинематический методы	Разбор конкретных ситуаций (2 часа)
4.	Энергетические теоремы и определение перемещений	Энергетические теоремы и определение перемещений. Обобщенная сила и обобщенное перемещение. Действительная работа внешних и внутренних сил. Потенциальная энергия деформации. Теорема о взаимности работ. Теорема о взаимности перемещений. Теорема о взаимности реакций. Определение перемещений по методу Мора. Формула Мора. Вычисление интеграла Мора. Основы вариационных принципов и методов расчета. Полная энергия деформированной системы. Вариационные принципы деформированных систем.	Лекция-визуализация (2 часа)
5.	Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм	Общие методы определения сил в связях плоских и пространственных систем. Статический метод. Способ вырезания узлов. Способ моментальной точки. Способ сквозных сечений. Основы метода замены связей.	Разбор конкретных ситуаций (1 час)
6.	Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем	Расчет пространственных ферм. Применение общих методов расчета. Расчет сетчатых ферм путем разложения их на плоские системы. Особенности расчета пространственных ферм на кручение.	Разбор конкретных ситуаций (1 час)

7.	Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами	Расчет статически неопределимых стержневых систем. Статически неопределимые системы. Общие предпосылки методов расчета. Метод сил. Порядок расчета и примеры. Особенности расчета симметричных рам. Особенности расчета на температурные и дислокационные взаимодействия. Метод перемещений. Определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений.	Разбор конкретных ситуаций (2 часа)
8.	Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность	Матричные методы расчета стержневых систем. Общие понятия. Матрицы податливости и жесткости системы. Расчет в матричной форме. Определение перемещений. Основы метода конечных конечных элементов. Матрица жесткости и грузовая матрица элемента в местной и общей системе координат. Формирование общей матрицы жесткости и расчет системы.	Лекция-визуализация (1 час)
9.	Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов	Материалы металлоконструкций. Металлы, применяемые для несущих конструкций. Рекомендации по выбору стали с учетом условий эксплуатации машин. Сортамент	-
10.	Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний	Методы расчета на прочность и устойчивость. Нагрузки, действующие на стационарные конструкции. Нагрузки, действующие на несущие конструкции. Расчет по допускаемым напряжениям. Расчет по предельным состояниям. Расчет на надежность. Основы расчета конструкций на устойчивость и по деформативному состоянию. Основные методы определения критических нагрузок. Устойчивость пластин. Расчет систем по деформативному состоянию.	-
11.	Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений	Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений. Сварные соединения. Типы сварных соединений и сварных швов. Размеры сечения сварных швов. Сопряжения элементов в сварных узлах. Учет технологических факторов при проектировании сварных узлов. Стыковые	-

		швы. Угловые швы. Болтовые соединения.	
12.	Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений	Конструктивные формы сварных узлов шарнирных соединений. Назначение шарнирных соединений. Типы шарнирных соединений металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений. Распределение напряжений в сварных узлах шарнирных соединений. Определение рациональных параметров проушин.	-
13.	Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов	Усталостная долговечность сварных узлов. Основные понятия. Процесс усталостного разрушения. Факторы, влияющие на усталостную долговечность. Материал конструкции. Условия эксплуатации. Формирование расчетных режимов нагружения	-
14.	Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок	Балочные конструкции. Металлоконструкции балочного типа и общие принципы расчета. Выбор сечения и расчет прокатных балок. Общие принципы расчета коробчатых балок. Особенности расчета тонкостенных балок. Прочность тонкостенных балок. Общая устойчивость тонкостенных балок. Особенности проектирования составных балок. Проектирование балок наименьшей массы. Оптимизация параметров балки. Определение нагрузок и расчет металлоконструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Определение нагрузок и расчет телескопических стрел.	-
15.	Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции	Решетчатые конструкции. Примеры решетчатых конструкций и общие принципы их расчета. Классификация решетчатых конструкций. Рекомендации по проектированию решетчатых конструкций. Устойчивость решетчатых конструкций. Влияние остаточных сварных напряжений на нагрузочную способность решетчатых конструкций. Особенности расчета металлоконструкций башенных кранов. Основные сведения о расчете стрел и башен. Нагрузки, действующие на металлоконструкции башенных кранов. Расчет стрел по деформативному состоянию.	Разбор конкретных ситуаций (2 часа)
16.	Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции	Рамные и листовые конструкции. Примеры рамных конструкций и общие принципы их расчета. Рамы машин и оборудования для устройства и ремонта дорожных покрытий. Металлоконструкции автогрейдеров. Металлоконструкции	Лекция-визуализация (2 часа)

		скрепера. Особенности расчета рамных конструкций землеройных машин с навесным оборудованием. Metalloконструкции рыхлителей. Особенности расчета цистерн и бункеров	
17.	Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин	Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Оптимизация конструкции. Применение ПО.	Компьютерная презентация (2 часа)

#### 4.3. Лабораторные работы.

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	5.	Испытание стального образца на растяжение	9	-
2	6.	Исследование деформаций в статически неопределимой рамной конструкции	9	-
3	15.	Испытание стержня на устойчивость при осевом сжатии	9	-
4	17.	Расчет балок и рамных конструкций методом конечных элементов	9	исследовательская деятельность (3 часа)
<b>ИТОГО</b>			<b>36</b>	<b>3</b>

#### 4.4. Практические занятия.

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Кинематический анализ сооружений	4	-
2	3.	Определение внутренних усилий с помощью построения линий влияния	4	-
3	5.	Изучение способов определения усилий в фермах	6	-
4	15.	Построение линий влияния усилий в стержнях простейших ферм	4	-
<b>ИТОГО</b>			<b>18</b>	<b>-</b>

#### 4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа

Цель: закрепление теоретических знаний, приобретение навыков практической работы в области современных методов проектирования, расчета и конструирования металлических конструкций наземных транспортно-технологических средств.

Структура: Отчет по контрольной работе должен иметь следующую структуру:

- титульный лист;
- задание на отдельном листе;
- содержание;
- список использованных сокращений и обозначений;
- введение [1-2 стр.];
- основная часть;
- заключение [1 стр.];
- список использованных источников.

Основная тематика: Конструирование ферм и их расчет.

Рекомендуемый объем: пояснительная записка – 30-50 листов формата А4.

Выдача задания, прием и защита кр проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
отлично	Обучающийся продемонстрировал усвоение ранее изученных сопутствующих вопросов, сформированность и устойчивость используемых при ответе умений и навыков: умение иллюстрировать теоретические положения конкретными примерами, применять их при выполнении практического задания; отвечал самостоятельно без наводящих вопросов преподавателя. Структура оформления контрольной работы соблюдена.
хорошо	При защите контрольной работы обучающийся допустил небольшие пробелы, не исказившие логического и информационного содержания ответа: один-два недочета при освещении основного содержания, исправленные по замечанию преподавателя; при ответе на дополнительные вопросы допущено не более 2-3 ошибок. Структура оформления контрольной работы соблюдена.
удовлетворительно	Содержание материала раскрыто не полностью, но показано общее понимание темы контрольной работы, продемонстрированы умения, достаточные для дальнейшего усвоения программного материала, обучающийся продемонстрировал затруднения или допустил ошибки в определении понятий, использовании терминологии, блок-схем и выкладках, исправленные после нескольких наводящих вопросов преподавателя; при проверке знаний теоретического материала выявлена недостаточная сформированность основных умений и навыков. При оформлении контрольной работы допущены ошибки.
неудовлетворительно	Не раскрыто основное содержание контрольной работы, обнаружено незнание или непонимание обучающимся большей или наиболее важной части учебного материала. При дополнительной самостоятельной работе над материалом курса возможно повышение качества выполнения контрольной работы

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>		<i><math>\Sigma</math> комп.</i>	<i><math>t_{cp}</math>, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ПК</i>	<i>ОПК</i>				
			<i>4</i>	<i>2</i>				
<i>1</i>		<i>2</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<b>1.</b> Тематическое содержание дисциплины		8	+	+	2	4	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>2.</b> Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций		13	+	+	2	6,5	Лк, ПЗ, СРС	кр, экзамен
<b>3.</b> Расчет статически неопределимых простых и составных балок и рам		13	+	+	2	6,5	Лк, ПЗ, СРС	кр, экзамен
<b>4.</b> Энергетические теоремы и определение перемещений		9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>5.</b> Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм		26	+	+	2	13	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	кр, экзамен
<b>6.</b> Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем		20	+	+	2	10	Лк, ЛР, СРС	кр, экзамен
<b>7.</b> Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами		9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>8.</b> Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность		9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен

<b>9.</b> Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>10.</b> Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний	10	+	+	2	5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>11.</b> Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>12.</b> Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>13.</b> Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>14.</b> Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен
<b>15.</b> Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции	22	+	+	2	11	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	кр, экзамен
<b>16.</b> Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции	9	+	+	2	4,5	Лк, СРС	кр, экзамен

17. Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин	23	+	+	2	11,5	Лк, ЛР, СРС	кр, экзамен
<i>всего часов</i>	<b>216</b>	<b>108</b>	<b>108</b>	<b>2</b>	<b>108</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Коваленко Г.В. Строительная механика. Методические указания и контрольные задания для студентов, обучающихся по направлению «Строительство»/ Г.В. Коваленко, И.В. Дудина - Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2013. – 35с.
3. Дудина, И.В. Примеры расчета статически определимых стержневых систем: методическое пособие / И.В. Дудина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 81 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность (экз./чел.)
<b>Основная литература</b>				
1.	Соколов, С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин : учебник / С.А. Соколов. - Санкт-Петербург : Политехника, 2012. - 425 с. : схем., табл., ил. - ISBN 978-5-7325-0969-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=129569">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=129569</a>	Лк, ПЗ, кр, СР	ЭР	1
2.	Глотов, В.А. Строительная механика и металлические конструкции машин : учебное пособие / В.А. Глотов, А.В. Зайцев, В.Ю. Игнатьюгин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 95 с. : ил., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-5266-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=426940">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=426940</a>	Лк, ПЗ, кр, СР	ЭР	1
3.	Глотов, В.А. Теория, конструкции и проектирование подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования : учебное пособие / В.А. Глотов, А.В. Зайцев, А.П. Ткачук. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 146 с. : ил., схем, табл. – Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-8715-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=450596">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=450596</a>	Лк, ПЗ кр СР	ЭР	1
<b>Дополнительная литература</b>				
4.	Живейнов, Н. Н. Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин : учебник для вузов / Н. Н. Живейнов, Г. Н. Карасев, И. Ю. Цвей. - Москва : Машиностроение, 1988. - 278 с. - Б. ц.	Лк, ПЗ, кр, СР	50	1
5.	Светлицкий, В.А. Строительная механика машин. Механика стержней : учебник / В.А. Светлицкий. - Москва : Физматлит, 2009. - Т. 1. Статика. - 408 с. - ISBN 978-5-9221-1123-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68413">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68413</a> (17.04.2018).	Лк, ПЗ, кр, СР	ЭР	1

6.	Светлицкий, В.А. Строительная механика машин. Механика стержней : в 2-х т. / В.А. Светлицкий. - Москва : Физматлит, 2009. - Т. 2. Динамика. - 384 с. - ISBN 978-5-9221-1143-0 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68412">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68412</a> (17.04.2018).	Лк, ПЗ, кр, СР	ЭР	1
----	--	----------------------	----	---

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО - ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ [http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com>.
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru>.
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/>.
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--plai/how-to-search/>.

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Приступая к изучению новой учебной дисциплины, обучающиеся должны ознакомиться с учебной программой, учебной, научной и методической литературой, имеющейся в библиотеке ФГБОУ ВО «БрГУ», получить в библиотеке рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, завести новую тетрадь для конспектирования лекций и работы с первоисточниками.

В ходе лекционных занятий вести конспектирование учебного материала. Обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации.

Желательно оставить в рабочих конспектах поля, на которых делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. Задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.

В ходе подготовки к лабораторным и практическим занятиям изучить основную литературу, ознакомиться с дополнительной литературой, новыми публикациями в периодических изданиях: журналах, газетах и т.д. При этом учесть рекомендации преподавателя и требования учебной программы. Дорабатывать свой конспект лекции, делая в нем соответствующие записи из литературы, рекомендованной преподавателем и предусмотренной учебной программой.

Готовясь к докладу или реферативному сообщению, обращаться за методической помощью к преподавателю. Составить план-конспект своего выступления.

В ходе практических занятий принимать активное участие в обсуждении учебных вопросов: выступать с докладами, рефератами, обзорами научных статей, отдельных публикаций периодической печати, касающихся содержания темы практического занятия. В ходе своего выступления использовать технические средства обучения, доску и мел.

С целью более глубокого усвоения изучаемого материала задавать вопросы преподавателю. После подведения итогов практического занятия устранить недостатки, отмеченные преподавателем.

При подготовке к экзамену повторять пройденный материал в строгом соответствии с учебной программой, примерным перечнем учебных вопросов, выносящихся на зачет и содержащихся в данной программе. Использовать конспект лекций и литературу, рекомендованную преподавателем. Обратит особое внимание на темы учебных занятий, пропущенных студентом по разным причинам. При необходимости обратиться за консультацией и методической помощью к преподавателю.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется обучающимся по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Содержание внеаудиторной самостоятельной определяется в соответствии с рекомендуемыми видами заданий согласно примерной и рабочей программ учебной дисциплины.

Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы являются:

- *для овладения знаниями*: чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы), составление плана текста, графическое изображение структуры текста, конспектирование текста, выписки из текста, работа со словарями и справочниками, ознакомление с нормативными документами, учебно-исследовательская работа, использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернета и др.

- *для закрепления и систематизации знаний*: работа с конспектом лекции, обработка текста, повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио и видеозаписей, составление плана, составление таблиц для систематизации учебною материала, ответ на контрольные вопросы, заполнение рабочей тетради, аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, конспект-анализ и др), подготовка мультимедиа сообщений/докладов к выступлению на семинаре (конференции), подготовка реферата, составление библиографии, тематических кроссвордов, тестирование и др.

- *для формирования умений*: решение задач и упражнений по образцу, решение вариативных задач, выполнение чертежей, схем, выполнение расчетов (графических работ), решение ситуационных (профессиональных) задач, подготовка к деловым играм, проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности, опытно экспериментальная работа, рефлексивный анализ профессиональных умений с использованием аудио- и видеотехники и др.

Самостоятельная работа осуществляется индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся может осуществляться в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине и внеаудиторную самостоятельную работу студентов по дисциплине, может проходить в письменной, устной или смешанной форме.

## 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ и практических занятий.

Отчеты по лабораторным работам оформляются на листах формата А4.

Отчеты должны содержать:

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Принципиальная схема работы лабораторной установки.
4. Поэтапное выполнение задания.
5. Заключение.

Отчеты по практическим оформляются на листах формата А4.

Отчеты должны содержать:

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Поэтапное выполнение задания.
4. Заключение.

### Лабораторная работа № 1

#### Испытание стального образца на растяжение

Цель работы: Определение прогибов и перемещений узлов фермы.

Задание:

1. Рассчитать и построить перемещение узлов фермы.
2. Рассчитать прогиб нижнего пояса фермы.
3. Определить экспериментально величину перемещения узлов и прогиба фермы.

Порядок выполнения:

Фермой называется геометрически неизменяемая система, состоящая из стержней, шарнирно связанных между собой концами.

В реальных фермах стержни соединены между собой не шарнирно, а жестко. Следовательно, в реальных фермах стержни испытывают не только деформацию растяжения (сжатия), но и деформацию изгиба. Учитывая, что изгибная жесткость стержней очень мала по сравнению с продольными силами, полагают, что стержни работают как шарнирно закрепленные.

Для определения прогибов или деформаций элементов фермы следует построить линии влияния. Рассмотрим методику определения прогиба фермы в середине пролета (рис. 1.1). Рассмотрим раскос  $D$ , обозначим усилие в нем через  $S_0^i$ , площадь сечения через  $\omega_i$  и длину через  $l_i$ . Удлинение стержня составит  $\frac{S_0^i \cdot l_i}{E\omega_i}$ . Все прочие стержни будем считать абсолютно жесткими.

Линия прогибов, вызванная единичным удлинением стержня  $i$ , показана на рис. 1.1,б. Как известно из кинематического способа построения линии влияния, линия прогиба, вызванная удлинением стержня  $i$ , равным единице, совпадает с линией влияния усилия в этом стержне. Обозначим ординату этой линии влияния под точкой  $C$  через  $S_1^i$ . Она равна усилию, которое возникает в стержне  $i$  от груза  $P = 1$ , приложенного в точке  $C$ . Следовательно в узле  $C$ , вызванный не единичным, а равным  $\frac{S_0^i \cdot l_i}{E\omega_i}$  удлинением стержня  $i$ , выражается произведением

$$y_i = \frac{S_1^i \cdot S_0^i \cdot l_i}{E\omega_i} \quad (1.1)$$

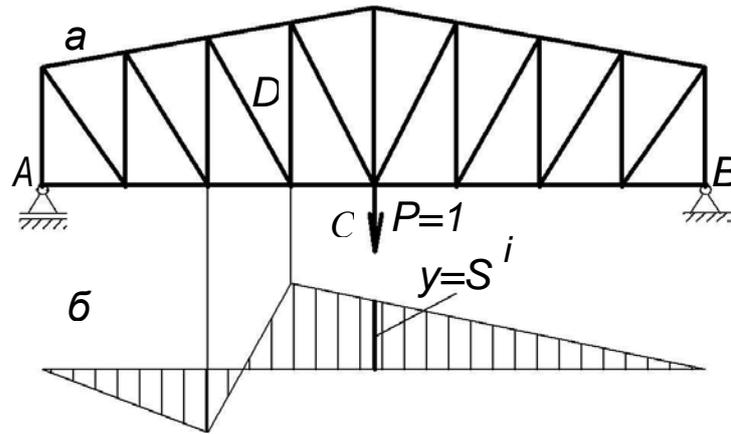


Рис. 1.1. Схема определения прогиба в середине фермы

Если принимать во внимание деформацию не одного стержня ферма, а всех его стержней, то прогиб в узле C выразится суммой всех членов

$$y_c = \sum \frac{s_1^i \cdot s_0^i \cdot l_i}{E \omega_i} \quad (1.2)$$

1. Расчетные схемы металлической и деревянной фермы показаны на рис. 1.2.

По указанию преподавателя выбрать схему фермы, узел, в котором приложена внешняя нагрузка и точку нижнего пояса фермы, в которой следует определить прогиб.

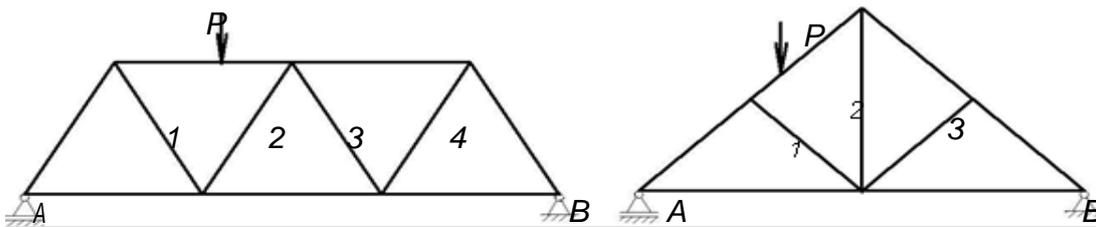


Рис. 1.2. Расчетные схемы металлической и деревянной ферм

2. В таблицу 1.1 занести результаты измерений размеров фермы.

3. Рассчитать теоретически величину прогиба в заданной точке нижнего пояса фермы. Для этого построить линии прогибов для каждого из стержней, вызванных единичной нагрузкой.

4. Рассчитать прогиб искомой точки фермы, вызванной удлинением каждого  $i$ - стержня по формуле (1.1). Результаты расчетов занести в табл. 1.2.

5. По формуле (1.2) рассчитать прогиб в искомой точке.

6. Определить экспериментально прогиб в искомой точке фермы. Для этого установить стрелку индикатора на нуль. Загрузить ферму заданной нагрузкой  $P$  и снять показания с индикатора.

7. Рассчитать расхождение между теоретическими расчетами и экспериментальным значением по формуле

$$\Delta y = \frac{y_1 - y_2}{y_3} \cdot 100\%.$$

8. Сделать выводы.

Таблица 1.1

## Геометрические параметры фермы

$P, H$	Длина стержня			
	$l_{1,м}$	$l_{2,м}$	$l_{3,м}$	$l_{4,м}$

Таблица 1.2

№ стержня	1	2	3	4	Теоретический прогиб ( $y^T$ ), мм	Экспериментальный прогиб ( $y^Э$ ), мм
Прогиб искомой точки						

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с текстом лекций.
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

## Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

## Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Что называется абсолютными и относительными деформациями? Чем определяется их знак?
2. Дать характеристику элементам фермы. Какие деформации испытывают элементы фермы при ее работе?
3. Какой характер деформации бруса предполагается гипотезой плоских сечений?

**Лабораторная работа № 2****Исследование деформаций в статически неопределимой рамной конструкции**

Цель работы: Экспериментально показать справедливость теоретического расчета перемещений в рамах с помощью интеграла Мора и правила Верещагина.

Задание:

1. Изучить деформации модели рамы под действием нагрузки.
2. Провести качественное сравнение форм изогнутой оси рамы, полученных опытным путем и расчетным методом.

Порядок выполнения:

Для оценки жесткости рамной конструкции необходимо определять перемещения, возникающие под действием расчетной нагрузки. Для железобетонных конструкций важно также знать форму изогнутой оси рамы, поскольку растянутые зоны стержней рамы необходимо усиливать дополнительной стальной арматурой. Знание изогнутой оси рамы может оказаться полезным и при расчете рам на колебания и действие ударных нагрузок.

Помимо расчетных способов определения перемещений рамы можно использовать экспериментальный метод непосредственного замера перемещений на модели рамы. Теоретический расчет простейших рам обычно ведется с помощью интеграла Максвелла – Мора и правила Верещагина.

Рассмотрим его применение на примере рамы, изображенной на рис. 7.1,а. Рама один раз статически неопределима. Выберем основную систему ОС так, как показано на рис. 7.1,б. Эквивалентная система ЭС изображена на рис. 7.1,в, а эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки и от единичной силы – на рис. 7.1,г, д.

Вычислив свободный член  $\Delta_{1P}$  и коэффициент  $\delta_{11}$  канонического уравнения по способу Верещагина, получим

$$\Delta_{1P} = -\frac{8Pl^3}{3EJ}, \delta_{11} = \frac{9l^3}{2EJ}, X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}} = \frac{16}{27}P. \quad (3.1)$$

Суммарная эпюра изгибающих моментов  $M_{\Sigma}$  показана на рис. 3.1,е.

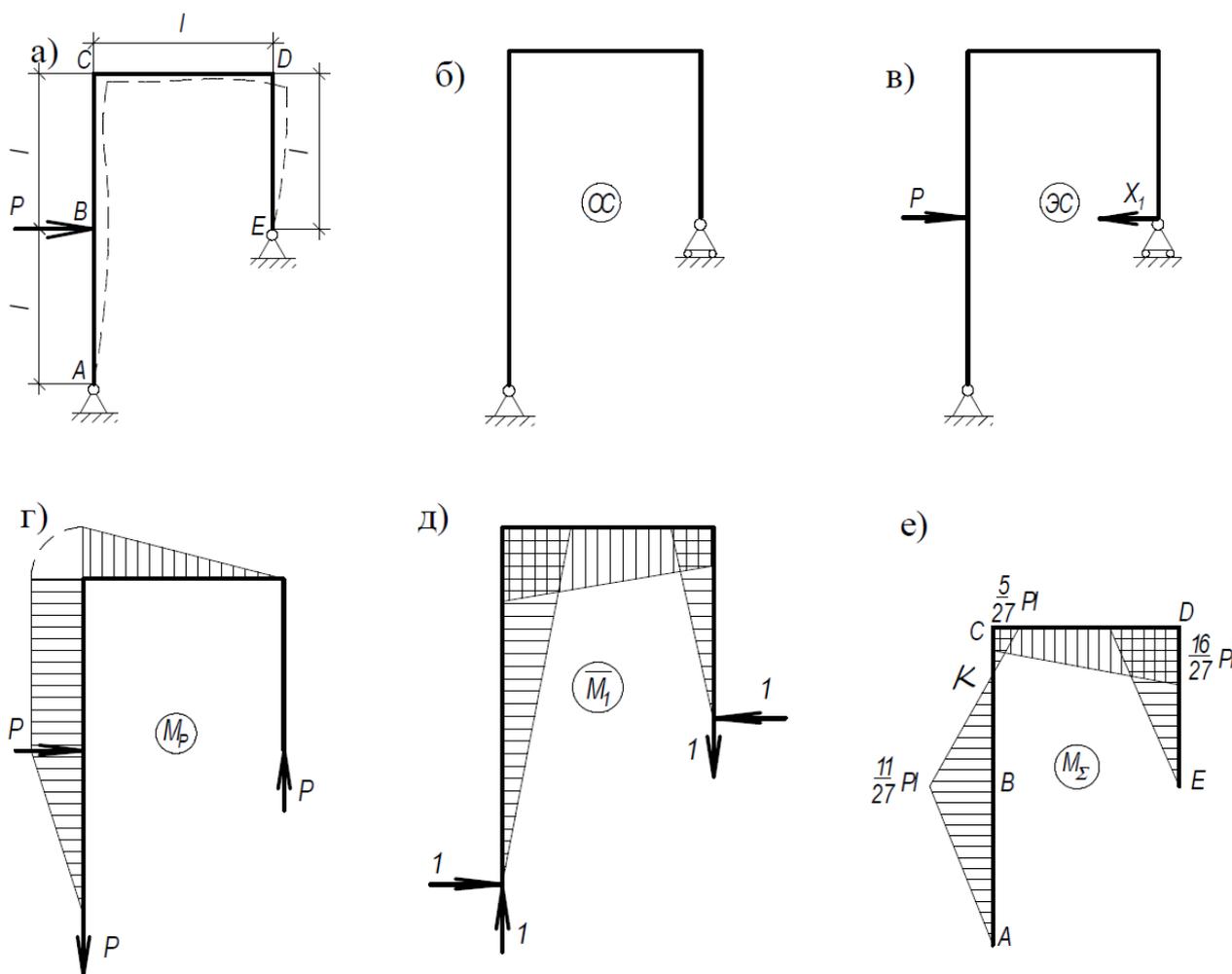


Рис. 3.1. Деформация плоской рамы: а – нагрузка рамы; б – основная система; в – эквивалентная система; г, д, е – эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки, от единичной силы и суммарная эпюра изгибающих моментов соответственно.

Так как ординаты суммарной эпюры  $M_{\Sigma}$  откладываются со стороны сжатых волокон, по виду эпюры можно изобразить изогнутую ось рамы. Участок  $AK$  имеет выпуклость вправо (в сторону растянутых волокон). В точке  $K$ , где  $M_{\Sigma} = 0$ , на оси оказывается точка перегиба. На участке  $KC$  – выпуклость влево, на участке  $CD$  – выпуклость вверх, на участке  $DE$  – выпуклость вправо. В соответствии с этим на рис. 3.1,а штриховой линией показан эскиз изогнутой оси рамы.

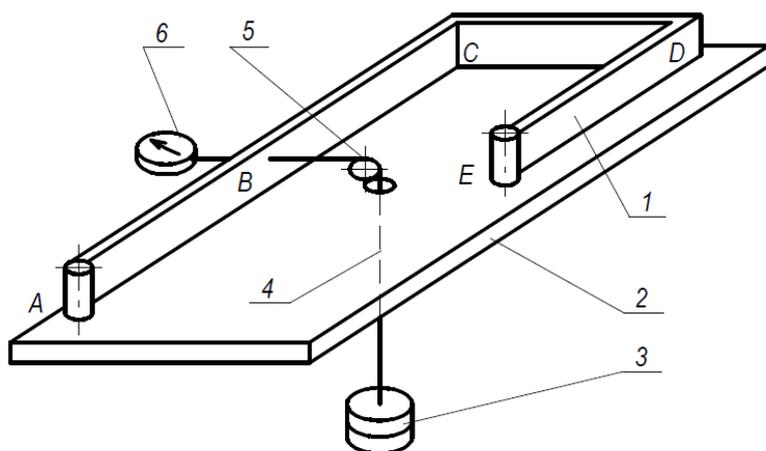
Чтобы вычислить любое перемещение сечения рамы, необходимо в этом сечении к основной системе приложить единичную силу в направлении искомого перемещения,

построить эпюру  $\bar{M}$  от этой единичной силы и перемножить ее по правилу Верещагина на эпюру  $M_{\Sigma}$ . Для вычисления перемещения  $\Delta_B$  точки приложения силы  $P$  воспользуемся эпюрой  $M_P$ . Так как нам нужна эпюра от единичной силы, уменьшим все ординаты эпюры  $M_P$  в  $P$  раз, т.е. будем считать  $P = 1$ . Умножив эту эпюру на  $M_{\Sigma}$ , получим

$$\Delta_B = \frac{1}{EJ} \left( \frac{M_P}{P} M_{\Sigma} \right) = \frac{0,1106Pl^3}{EJ} \quad (3.2)$$

Аналогично вычисляется любое другое перемещение рамы, изгибная жесткость  $EJ$  ее стержней.

Схема испытательной установки показана на рис. 3.2. Рама, выполненная из стальных полос прямоугольного сечения, размещается в горизонтальной плоскости на специальной подставке и укрепляется в точках  $A$  и  $E$  на опорах, допускающих поворот сечений вокруг осей, перпендикулярных плоскости рамы.



1 – рама; 2 – основание; 3 - грузы; 4 – трос; 5 – блок; 6 - индикатор перемещений

Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки

Нагрузка рамы (1), укрепленной на основании (2), осуществляется съемными грузами (3), подвешенными к тросу (4), перекинутому через блок (5). Перемещение сечения  $B$  измеряется индикатором перемещений (6).

1. Произвести замеры поперечного сечения ( $b$  и  $h$ ), геометрических параметров рамы ( $l_1, l_2, l_3$ ). Результаты измерений занести в табл. 3.1. Спросить у преподавателя величину внешней нагрузки  $P$ .
2. По формуле (3.2) рассчитать величину прогиба в точке приложения внешней силы. Результаты расчета внести в табл. 3.2.
3. С помощью индикатора перемещений определить экспериментально величину прогиба в точке приложения внешней силы. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.1

Результаты измерений

$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$h, \text{ м}$

Таблица 3.2

Результаты определения прогиба рамы

$P, \text{ Н}$	$\Delta_B^I, \text{ м}$	$\Delta_B^{\text{э}}, \text{ м}$	$\delta, \%$

4. Вычислить относительную погрешность по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta_B^I - \Delta_B^{\text{э}}}{\Delta_B^I} \cdot 100\%.$$

Результат можно считать удовлетворительным, если относительная погрешность не превышает 5%.

5. Обвести на листе бумаге контур деформированной оси рамы. По эскизу определить положение точки перегиба ( $K$ ) и участки с различными кривизнами. Полученный эскиз сравнить с эскизом, выполненным на основании рассмотрения эпюры  $M_{\Sigma}$ .

6. Сделать вывод о степени качественного совпадения этих двух эскизов.

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с текстом лекций.
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как определить положение точек перегиба на оси рамы? Дайте обоснование ответа.
2. В чем состоит различие в ходе расчетов при определении линейного перемещения и угла поворота сечения рамы?
3. Как учитываются свойства материала, размеры и форма сечения рамы? Как производится расчет для рамы, составленной из стержней различного сечения?
4. В каких случаях можно использовать правило Верещагина? Почему оно применимо при определении перемещения рам, составленных из прямолинейных стержней?

### Лабораторная работа № 3

#### **Испытание стержня на устойчивость при осевом сжатии**

Цель работы: Опытное определение критической силы и критического напряжения продольно сжатого стержня.

Задание:

1. Рассчитать величину критической силы для продольно-сжатого стержня.
2. Рассчитать величину критического напряжения.
3. Определить экспериментально величину критической силы и критического напряжения.

Порядок выполнения:

Испытание на устойчивость дает возможность определить несущую способность тонкостенных элементов (стоек, профилей, труб) при сжатии их продольной силой.

Если прямолинейный стержень сжимать центрально приложенной силой  $P$ , то с возрастанием этой силы стержень вначале упруго укорачивается, сохраняя свою прямолинейную форму, а затем наступает явление потери устойчивости – стержень изгибается.

Критической силой  $P_K$  называется наименьшая по величине сжимающая сила, при которой прямолинейная форма стержня перестает быть устойчивой.

До приложения нагрузки стержень имел прямолинейную форму устойчивого равновесия. Под действием некоторой небольшой осевой силы  $P$  стержень испытывает сжатие, устойчивость прямолинейной формы сохраняется.

При достижении силы критического значения произойдет нарушение устойчивости, ось стержня искривится. Теперь устойчивой будет криволинейная форма равновесия.

Вывод формулы Эйлера рассматривается на лекционных занятиях, для проведения лабораторной работы воспользуемся уже готовой формулой:

$$P_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (2.1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $J_{min}$  – минимальный осевой момент инерции,  $l$  – длина стержня,  $\mu$  – коэффициент длины, который зависит от способа закрепления концов стержня (см. рис. 2.1).

Критическое напряжение, возникающее в момент потери устойчивости

$$\sigma_K = \frac{P_K \pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{F (\mu \cdot l)^2}, \quad (2.2)$$

Где  $F$  – площадь поперечного сечения стержня.

Введем понятие гибкости стержня. Формула для вычисления гибкости

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{min}}, \quad (2.3)$$

где  $i_{min}$  – минимальный радиус инерции сечения, рассчитываемый по формуле

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}. \quad (2.4)$$

Тогда критическое напряжение можно рассчитать по формуле

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}. \quad (2.5)$$

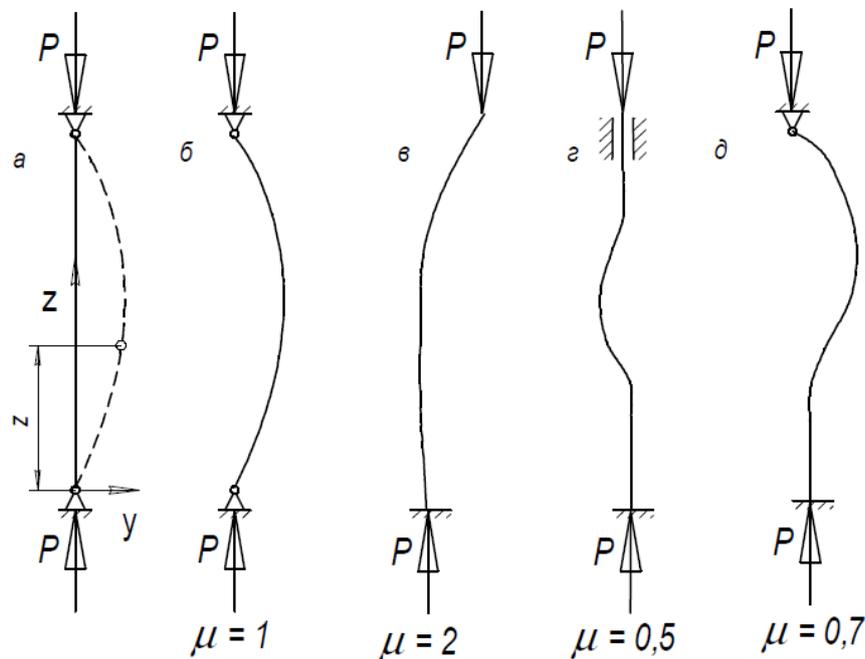


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента приведения длины от способа крепления концов стержня

Если построить график зависимости  $\sigma_K = f(\lambda)$  (рис. 2.2), то можно убедиться, что для данного материала формула (2.5) справедлива, начиная с определенного значения гибкости, которое может быть найдено из условия

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{\text{пц}} \quad (2.5)$$

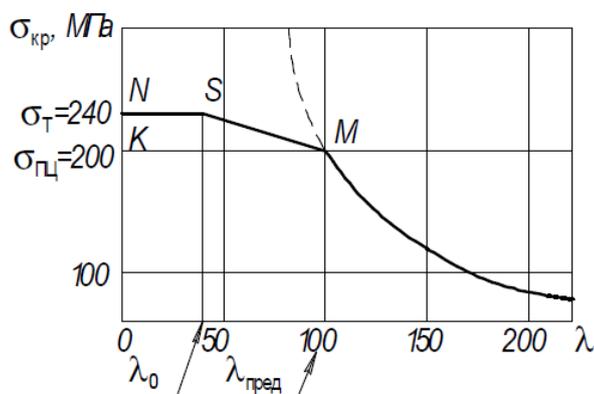


Рис. 2.2. Зависимость напряжения от гибкости стержня

Определим предельную гибкость ( $\lambda_{\text{пред}}$ ), ниже которой формулой (2.5) пользоваться нельзя

$$\lambda_{\text{пред}} \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{\text{пц}}}} \quad (3.6)$$

Для углеродистой стали марки Ст3, модуль упругости которой  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_{\text{пц}} \approx 200$  МПа предельная гибкость составит  $\lambda_{\text{пред}} \approx 100$ . В этом случае формулой (2.5) можно пользоваться на участке гиперболы (рис. 2.2), если гибкость стержня больше 100 единиц. Если гибкость стержня находится в пределах  $40 < \lambda < 100$  (участок SM на рис. 2.2), то значение критического напряжения определяется по эмпирической формуле Ясинского

$$\sigma_K = a - b\lambda, \quad (3.7)$$

где  $a = 310$  МПа,  $b = 1,14$  МПа коэффициенты для материала сталь Ст3. В этом случае потеря устойчивости происходит при пластическом деформировании стержня.

При  $40 < \lambda < 100$  (жесткие стержни) часть графика NS (рис. 3.2) рассматривается как горизонтальная линия.

В момент потери устойчивости, когда стержень принимает форму дуги, в его поперечном сечении начинает действовать изгибающий момент

$$M_{\text{п}} = P_K \cdot u_{\text{max}}, \quad (2.8)$$

Где  $u_{\text{max}}$  – максимальный прогиб стержня.

Тогда величина максимальных напряжений в сечении стержней определится по формуле

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_K}{F} + \frac{M_{\text{п}}}{W_{\text{min}}}, \quad (2.5)$$

где  $W_{\text{min}}$  – момент сопротивления сечения изгибу.

Работа проводится на установке, схема которой приведена на рис. 2.3,а.

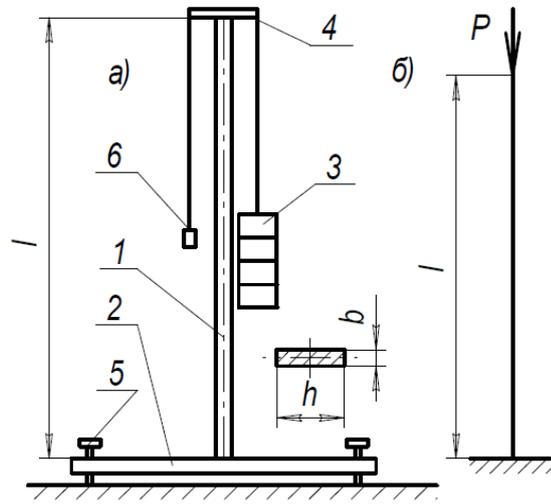


Рис. 2.3. Схема работы

Стержень (1) длиной  $l$ , прямоугольного сечения со сторонами  $b$  и  $h$  жестко закреплен на станине (2). Продольно сжимающая сила  $P$  создается набором гирь (3) через коромысло (4). Установочные винты (5) служат для установки стержня в вертикальное положение, которое проверяется по отвесу (6). Материал стержня – сталь Ст3.

Расчетная схема стержня показана на рис. 3.3,б.

1. Произвести необходимые замеры балки. Рассчитать площадь поперечного сечения, минимальный момент инерции по формуле  $J_{min} = \frac{h \cdot b^3}{12}$ , минимальный момент сопротивления изгибу  $W_{min} = \frac{h \cdot b^2}{6}$  и минимальный радиус инерции по формуле (2.4). Данные занести в таблицу 3.1.

2. По формуле (2.3) рассчитать гибкость стержня и сравнить с предельной величиной гибкости. Если  $\lambda > 100$ , то теоретически величину критической силы  $P_T^K$  следует рассчитать по формуле Эйлера (2.1).

Таблица 2.1

Таблица теоретических расчетов критической силы

$l$ , м	$b$ , м	$h$ , м	$J_{min}$ , $\frac{м^4}{4}$	$W_{min}$ , $\frac{м^3}{3}$	$F$ , $м^2$	$i_{min}$ , м	$\mu$	$\lambda$	$P_K^T$ , Н

Определить величину критической силы экспериментально ( $P_K^Э$ ). Для этого стержень с помощью регулировочных винтов и отвеса устанавливается в вертикальное положение. К коромыслу подвешивается гиря и проверяется устойчивость стержня. Для этого слегка отклонить верхний конец стержня от вертикального положения и отпустить его. Если стержень после нескольких колебаний вернется в первоначальное положение, значит, прямолинейная форма стержня является устойчивой, и критическое значение нагрузки еще не достигнуто.

Увеличивая нагрузку путем добавления гирь, снова проверяют устойчивость. Эту операцию повторяют до тех пор, пока стержень не потеряет способность возвращаться в исходное положение после отклонения от вертикали. Нагрузка, при которой обнаруживается такое явление, представляет собой критическую силу, полученную экспериментально  $P_K^Э$ . При проведении опыта величина критической силы равна сумме веса положенных на поддон гирь  $Q$  и веса подвесной системы  $Q_0$  (16 Н).  $P_K^Э = Q + Q_0$ , Н.

Вычислить расхождение между аналитической и экспериментальной величиной критической силы  $\Delta P_K = \frac{P_K^T - P_K^Э}{P_K^T} \cdot 100\%$ .

Произвести расчет максимального напряжения теоретически и экспериментально. С помощью линейки измерить на какую величину отклонился отвес от вертикального положения – это будет величиной максимального прогиба ( $y_{max}$ ). По формуле (2.8) определить величину

изгибающего момента. По формуле (2.9) рассчитать величину теоретического максимального напряжения  $(\sigma_K^T) \cdot \sigma_K^T = \underline{\hspace{2cm}}$  МПа.

Для определения экспериментального значения напряжения  $(\sigma_K^3)$  следует снять показания тензорезисторов ( $R_2$ ) при нагружении стержня критической силой. Затем снять гири с поддона и снять показания тензорезисторов ( $R_1$ ). Определить относительную деформацию и рассчитать напряжения. Данные занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Экспериментальное определение критического напряжения

№	Показания тензорезисторов, Ом			$\varepsilon_i = \frac{R_{1i} - R_{2i}}{K \cdot R_0}$	$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i$ , МПа	Среднее значение $\sigma_K^3 = \frac{\sum \sigma_i}{3}$ , МПа
	$R_0$	$R_{1i}$	$R_{2i}$			
1						
2						
3						

$K$  – коэффициент чувствительности тензорезистора ( $K = 2,1$ ),  $E$  – модуль упругости материала стержня ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа).

Рассчитать расхождение между теоретическим и экспериментальным значениями напряжений  $\Delta\sigma_K = \frac{\sigma_K^T - \sigma_K^3}{\sigma_K^T} \cdot 100\%$ .

Построить график зависимости  $\sigma_K = f(\lambda)$  (см. рис. 2.3) для стержня с рассмотренными размерами поперечного сечения, но различной длиной. Определить, какую длину должен иметь стержень при  $\lambda = 100$  и  $\lambda = 40$ . Расчеты занести в таблицу 2.3 и построить график.

Таблица 2.3

Зависимость критического напряжения от гибкости стержня

$l, \text{ м}$	1,0	0,8			$l_\lambda = 100$			$l_\lambda = 40$	
$\lambda$									
$\sigma, \text{ МПа}$									

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с текстом лекций.
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Что понимается под выражением «устойчивость продольно сжатого стержня»?
2. Что такое критическая сила?
3. Что такое гибкость стержня? Как она определяется?
4. Условие применимости формулы Эйлера. Чем вызвано это ограничение?
5. Как производится сравнение теоретических и экспериментальных значений критического напряжения?

## Лабораторная работа № 4

### Расчет балок и рамных конструкций методом конечных элементов

Цель работы: Научиться использовать при проектировании инженерных конструкций современные САПР на примере CAE– системы *Winmachine*.

Задание:

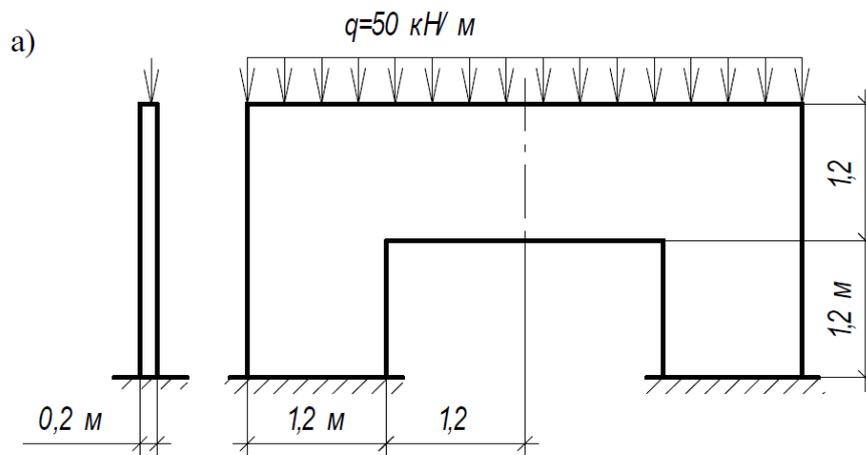
1. Изучить способы создания расчетных схем балок, рамных конструкций.
2. Получить деформированную схему сконструированной схемы и схему полей напряжений.

Порядок выполнения:

Основные этапы использования метода конечных элементов (МКЭ) на примере расчета плоской конструкции, изображенной на рис. 4.1.

На первом этапе выбирается расчетная схема и наносится сетка конечных элементов. На рис. 4.1,б показана рассматриваемая половина конструкции ввиду ее симметрии с выбранной сеткой квадратных элементов  $a = b = 0,2$  м. От нумерации узлов и конечных элементов (в кружках) зависит структура матрицы системы уравнений, к которой сводится решение задачи. Матрица имеет ленточную структуру, показанную на рис. 6.1,б.

В заштрихованной ленте шириной  $2M$  в каждой строке могут находиться ненулевые элементы, вне ее все элементы нулевые. Это связано с тем, что в уравнения равновесия узла входят лишь обобщенные силы, соответствующие элементам, примыкающим к этому узлу. Можно сказать, что данный узел непосредственно взаимодействует только с ближайшими окружающими его узлами. При нумерации надо стремиться к тому, чтобы наибольшая разность номеров взаимодействующих узлов была как можно меньше. В данном случае общее число неизвестных перемещений за вычетом перемещений закрепленных на границе узлов будет  $n = 2 \cdot 133 - 2 \cdot 7 - 7 = 245$ . Таков порядок системы уравнений в данной задаче; полуширина ленты  $M = 30$ . Ленточность структуры уравнений является большим достоинством МКЭ, так как упрощает и ускоряет решение уравнений.



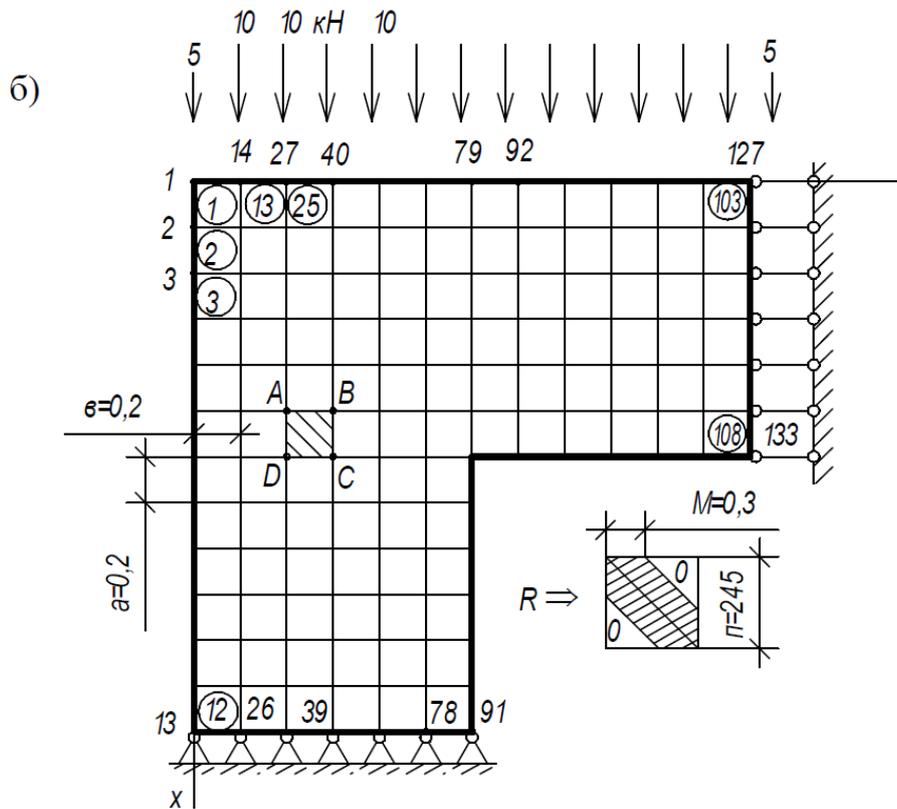


Рис. 4.1. Схема разбиения конструкции на конечные элементы

На следующем этапе строится матрица жесткости (отдельных элементов в местной системе координат). Из отдельных матриц жесткости формируется матрица жесткости всей конструкции в системе координат  $xu$ . После решения системы уравнений находятся перемещения каждого узла конструкции. После того, как определены перемещения узлов, находятся напряжения. На рис. 4.2 показана общая картина перемещения узлов. На рис. 4.3 – эпюры напряжений в двух сечениях конструкции. В расчетах принято  $E = 40$  ГПа,  $\mu = 0,1$ .

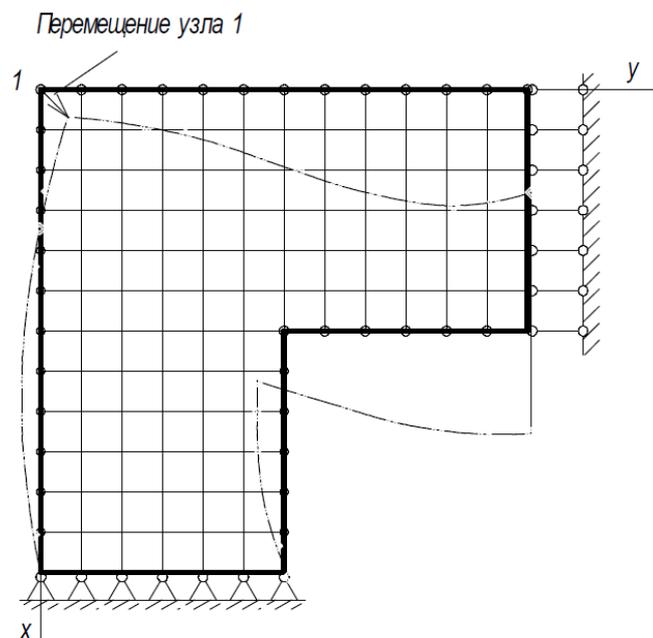


Рис. 4.2. Схема перемещения узлов

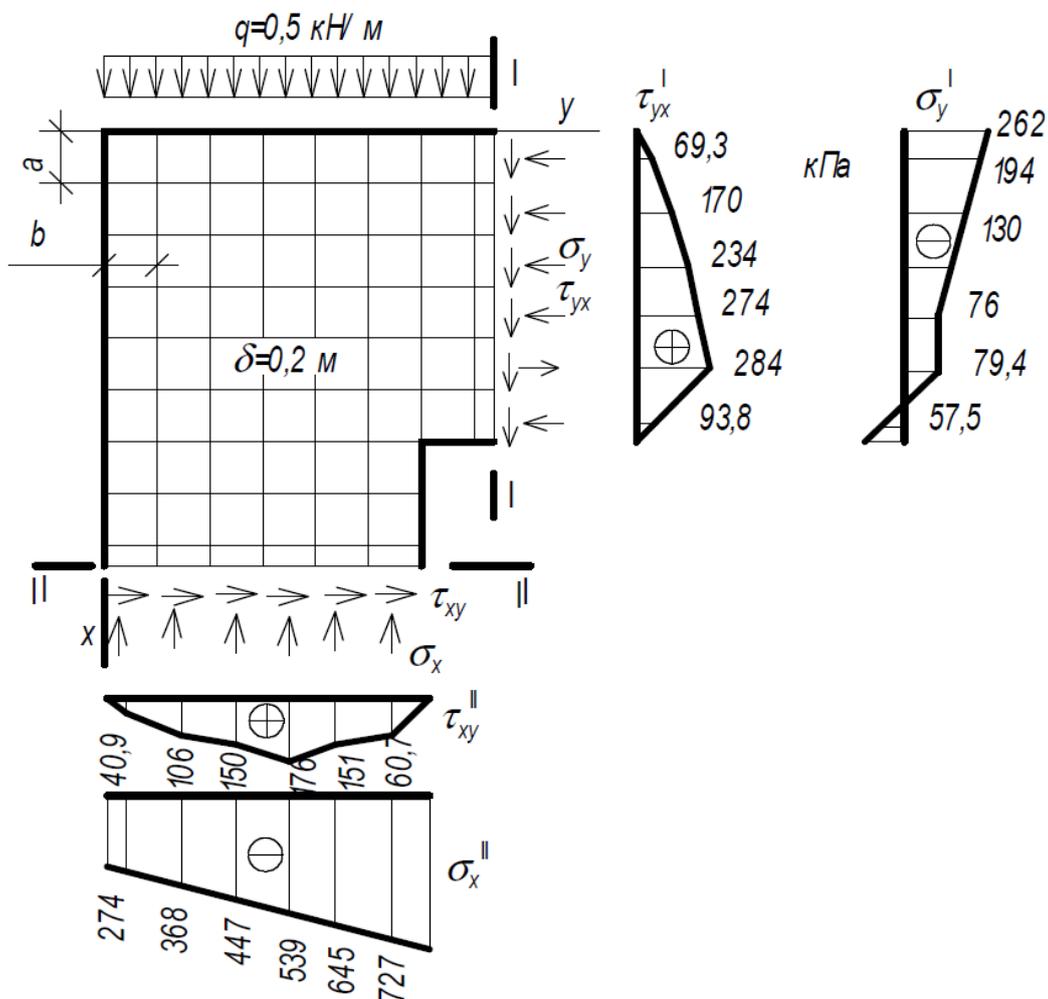


Рис. 4.3. Эпюры напряжений в двух сечениях конструкции

Получить у преподавателя расчетную схему балки или рамы.

Создайте геометрическую схему. Нажмите кнопку на системной панели «Создание новой схемы». Появится окно редактора схем.

Нажать кнопку «Сохранение схемы» и назначить имя файла.

Нажмите левой кнопкой мыши на окно «Текущий тип элемента» (белое поле справа от панелей инструментов). Появится окно «Типы элементов». В нем выберите двойным щелчком левой кнопки мыши «Отрезок» (библиотека Геометрические элементы). Соответствующее изображение появится в поле

«Текущий тип элемента». Таким образом, мы назначили текущий тип элемента.

Нажмите кнопку «Нарисовать элемент». Курсор в окне редактора примет форму перекрестия. Нажмите левую кнопку мыши (первая точка отрезка).

Нажмите клавишу пробел. Появится «Линейка», с помощью которой можно откладывать отрезки заданной длины по данному направлению. Клавишу пробел нужно нажимать при соответствующем положении курсора: если на экране отмечена привязка к точке (изображена красным крестиком), то линейка будет приложена к отмеченной точке.

Созданную схему следует разбить на более мелкие элементы. На этом этапе схему целесообразно сохранить под новым именем (кнопка «Сохранить как...») чтобы можно было попробовать различную разбивку.

Теперь можно приступить к решению задачи. Нажмите кнопку «Решение задачи» и установите галочку на пункте «Прямые методы» (такую схему быстрее решать прямыми методами). Нажав правой кнопкой мыши на кнопке «Рисовать деформированную схему» установить масштаб деформаций (1 : 10).

Изобразить изолинии и получить график напряжений. Подписать характерные точки.

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с текстом лекций.
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Что представляет собой сплошное тело при использовании МКЭ?
2. Чем определяется число степеней свободы конечных элементов?
3. Какие программные продукты разработаны для расчета элементов конструкций по методу МКЭ?
4. Как создается расчетная схема конструкции в WinMachine?
5. Возможно ли использование метода МКЭ без знания традиционных методов расчета инженерных конструкций?

### Практическое занятие №1.

Тема: Кинематический анализ сооружений.

Цель работы: Изучение сути кинематического анализа.

Задание: По заданным характеристикам выполнить кинематический анализ системы.

#### **1. Кинематический анализ сооружений**

##### **1.1. Основные виды опор**

Строительная механика рассматривает *геометрически неизменяемые системы* (сооружения), то есть такие, перемещения точек которых возможны только в результате деформации системы. Неподвижность таких систем (их геометрическая неизменяемость) относительно земли обеспечивается опорными связями (опорами). Реакции, возникающие в опорах, совместно с действующими нагрузками, образуют уравновешенную систему внешних сил.

Техническое исполнение опорных закреплений весьма разнообразно, но при выборе расчетной схемы опоры чаще всего приходят к нескольким их типам (рис.1.1): а – цилиндрическая подвижная, или *шарнирно подвижная*; б – цилиндрическая неподвижная, или *шарнирно неподвижная*; в – защемляющая неподвижная, или *жесткая заделка*; г – защемляющая подвижная, или *скользящая заделка*.

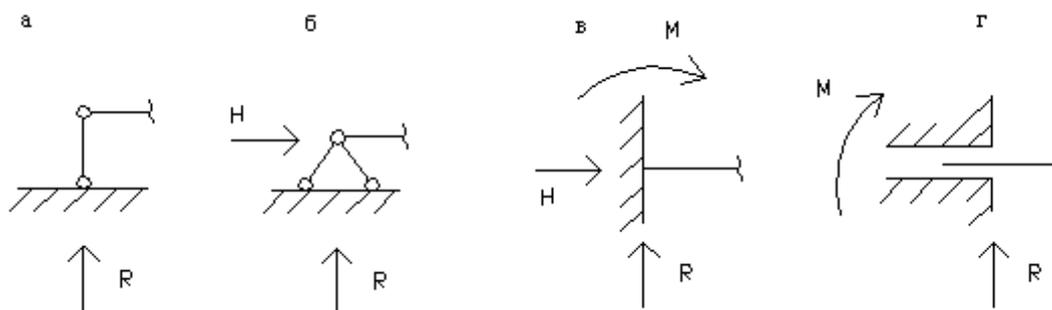


Рис.1.1

Показанные опоры (рис.1.1) эквивалентны соответственно одному, двум, трем и двум опорным стержням, в каждом из которых действует опорная реакция (опорный момент).

Жесткой и скользящей заделкам можно поставить в соответствие их шарнирно-стержневые эквиваленты (рис.1.2). При этом расстояние  $l_0$  называется *глубиной заделки*, а произведение  $M=R_2 l_0$  – *опорным моментом*, или моментом в заделке.



Рис.1.2

## 1. 2. Условия геометрической неизменяемости стержневых систем

Выяснение того, является ли система геометрически неизменяемой, условий, обеспечивающих эту неизменяемость, а также роли отдельных элементов в работе всего сооружения составляет суть *кинематического анализа*, который всегда должен предшествовать расчету.

*Стержневыми системами* называются системы, состоящие из отдельных, чаще прямолинейных, стержней, соединенных между собой в узлах (с помощью сварки, болтов, заклепок и т. д.).

Одним из видов таких систем являются *плоские фермы*. В большинстве случаев соединения стержней в узлах фермы являются жесткими; точный расчет такой системы весьма сложен ввиду того, что она является многократно статически неопределимой системой. Однако экспериментальные и теоретические исследования показывают, что при достаточной длине стержней замена жестких соединений шарнирными не оказывает существенного влияния на величины усилий в стержнях. Расчет же при этом резко упрощается и при определенных условиях может быть выполнен с помощью одних лишь уравнений статики.

Если заменить жесткие узлы системы, состоящей из трех стержней (рис.1.3,а), шарнирными (рис.1.3,б), то система останется геометрически неизменяемой. Но если то же самое проделать с системой, состоящей из четырех стержней (рис.1.3,в), то полученная система (рис.1.3,г) станет геометрически изменяемой, так как ее форма может меняться и без деформации элементов.

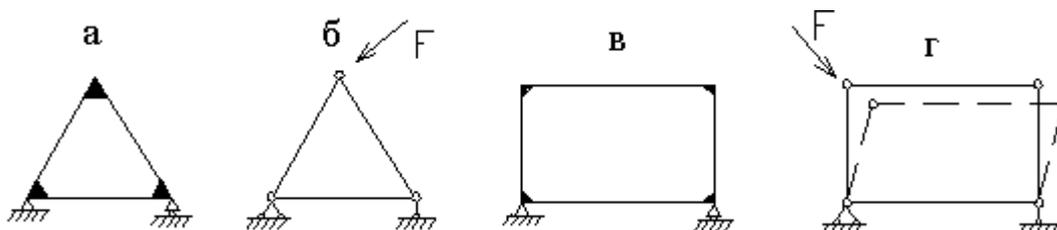


Рис.1.3

Система, состоящая из трех стержней, соединенных шарнирами в треугольник, является простейшей геометрически неизменяемой системой (рис.1.3,б).

Системы, полученные из такого шарнирного треугольника путем последовательного присоединения узлов, причем каждого *двумя стержнями, не лежащими на одной прямой*, также будут геометрически неизменяемыми (рис.1.4).

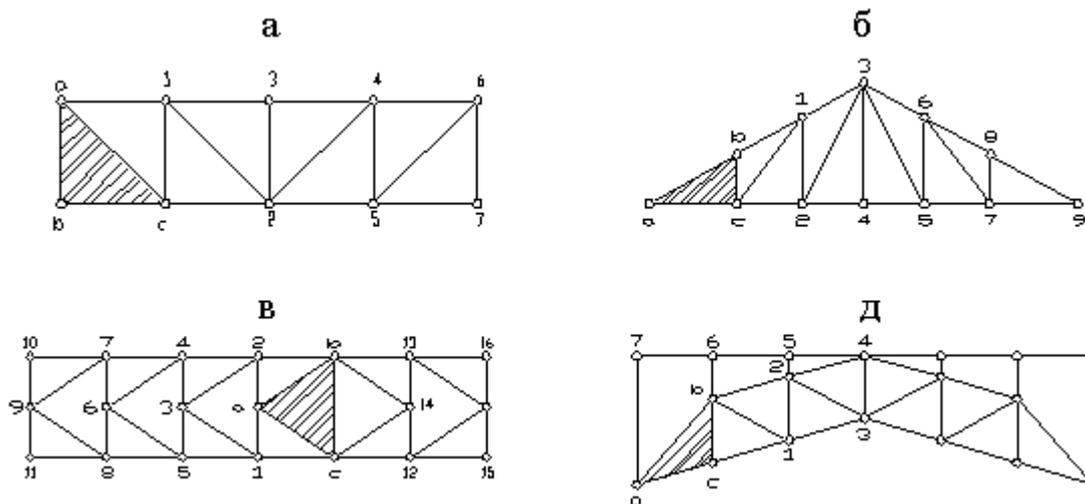


Рис.1.4

Установим зависимость между числом узлов и числом стержней, необходимых для получения простейшей геометрически неизменяемой фермы.

Пусть  $S$  – число стержней фермы, а  $K$  – число узлов. Основной треугольник, на базе которого построена ферма (заштрихованные области на рис.1.4), имеет три узла и три стержня, а каждый из остальных присоединяемых узлов в количестве  $K-3$  прикрепляется двумя стержнями. Следовательно, полное число стержней в простейшей геометрически неизменяемой ферме

$$S=3+2(K-3)$$

или

$$S=2K-3 \quad (1.1)$$

Если  $S < 2K-3$ , то система геометрически изменяема; если  $S > 2K-3$ , то система *может быть* геометрически неизменяемой. Это следует понимать так, что соотношение  $S \geq 2K-3$  является необходимым, но недостаточным условием геометрической неизменяемости фермы. Например, фермы на рис.1.5, являются геометрически изменяемыми, хотя для правой из них (рис.1.5,а)  $S = 2K-3$ , а для второй (рис.1.5,б) –  $S > 2K-3$ . Изменяемость этих ферм объясняется тем, что правые их части – шарнирные четырехугольники.

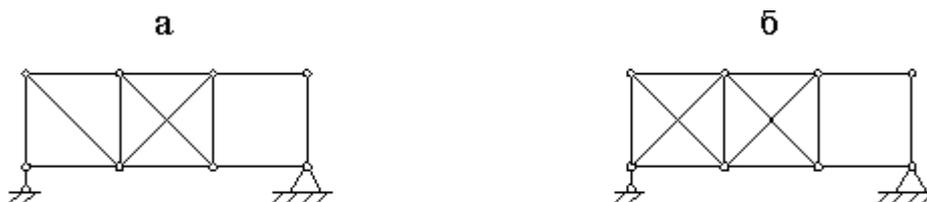


Рис.1.5

Следует также отметить, что стержневые системы, удовлетворяющие условию  $S = 2K-3$ , могут быть мгновенно изменяемыми.

Рассмотрим присоединение геометрически неизменяемой системы к земле с помощью опор. Чаще всего сооружение (диск) опирается на две шарнирные опоры (подвижную и неподвижную, рис.1.6,а), но возможно опирание и на три шарнирно подвижные опоры (рис.1.6,б). Такое опирание возможно лишь в том случае, когда *оси этих стержней не пересекаются в одной точке и не параллельны друг другу*.

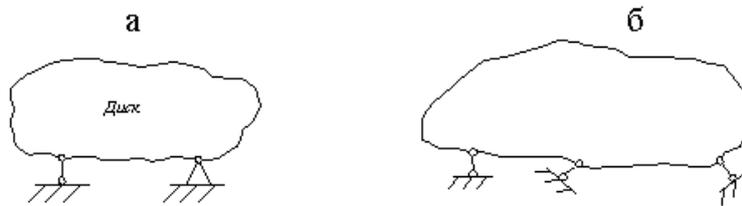


Рис.1.6

Применительно к случаю соединения двух любых геометрически неизменяемых систем (дисков) можно сформулировать *правило*: два диска образуют геометрически неизменяемую систему, если они связаны между собой тремя стержнями, оси которых не пересекаются в одной точке и не параллельны друг другу.

К диску можно также геометрически неизменяемо присоединить другой диск с помощью общего для обоих дисков шарнира и стержня, направление которого не должно проходить через этот шарнир.

Соединение трех дисков в одну общую геометрически неизменяемую систему можно осуществить, соединив их в треугольник с помощью трех шарниров, не расположенных на одной прямой (рис.1.7,а), или с помощью шести стержней (рис.1.7,б), так как каждый шарнир можно заменить двумя стержнями, пересекающимися в этом шарнире.



Рис.1.7

### 1. 3. Статическая определимость геометрически неизменяемых стержневых систем

Сооружение статически определимо *относительно опорных закреплений* только в том случае, когда число параметров, определяющих реакции этих закреплений, равно трем. Этому условию удовлетворяют следующие три системы опорных закреплений:

1. Комбинация шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опор (рис.1.8,а);
2. Комбинация трех шарнирно-подвижных опор (рис.1.8,б) при условии, что направления реакций этих опор не пересекаются в одной точке и не параллельны друг другу;
3. Жестко защемленная система (рис.1.8,в).

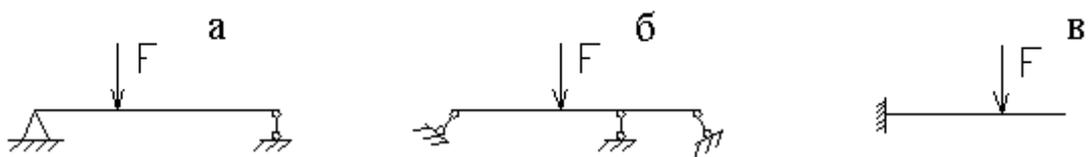


Рис.1.8

Наличие у геометрически неизменяемой системы четырех и более опорных стержней, среди которых есть три стержня с направлениями реакций, не пересекающимися в одной точке и не параллельными друг другу, говорит о том, что сооружение статически неопределимо.

Рассмотрим условия, которым должны удовлетворять сами статически определимые стержневые системы (фермы), то есть такие системы, усилия в элементах которых могут быть найдены с помощью одних лишь уравнений статики.

При действии на шарнирную ферму сосредоточенных сил, приложенных в узлах, в ее *прямолинейных* стержнях возникают только продольные (сжимающие или растягивающие) силы. Если ферма имеет *криволинейные* стержни, то в поперечных сечениях этих стержней кроме продольных сил возникают и изгибающие моменты, вызывающие в них дополнительные напряжения.

Если ферма в целом (рис.1.9,а) находится в равновесии под действием сил, приложенных к ее узлам, то и любой ее узел (рис.1.9,б) также находится в равновесии, то есть внешняя нагрузка, действующая на узел, и внутренние усилия в стержнях, сходящихся в этом узле, взаимно уравниваются.

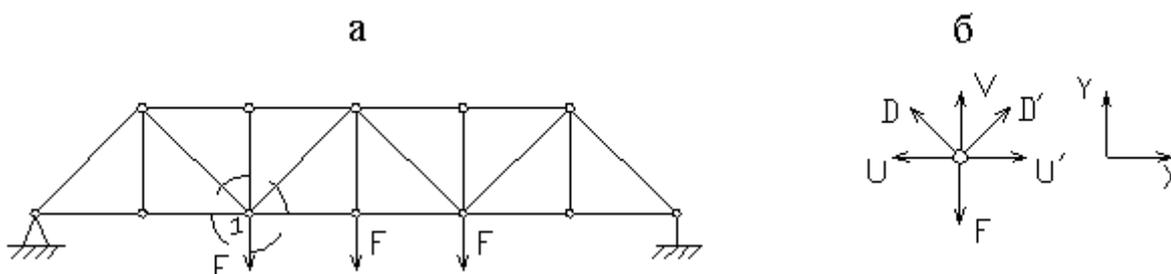


Рис.1.9

На каждый узел фермы действует система сил, пересекающихся в одной точке. Для такой системы сил можно записать два уравнения равновесия:

$$\sum X = 0, \sum Y = 0$$

.Если ферма имеет К узлов, то для них можно записать 2К уравнений равновесия, из которых можно определить усилия во всех стержнях фермы и три неизвестные опорные реакции. Любые другие уравнения равновесия для отдельных частей фермы или для всей фермы в целом могут быть получены из этих уравнений, поэтому они не являются новыми независимыми условиями для определения независимых усилий. Таким образом, ферма будет статически определима, если число ее стержней S равно удвоенному числу узлов минус 3:

$$S = 2K - 3 \quad (1.2)$$

Зависимость (1.2) между числом узлов и числом стержней статически определимой фермы совпадает с условием (1.1) ее геометрической неизменяемости.

Следовательно, всякая простейшая ферма, то есть ферма, образованная на базе шарнирного треугольника последовательным присоединением узлов (каждого с помощью двух стержней, не лежащих на одной прямой), является одновременно геометрически неизменяемой и статически определимой системой.

Все стержни статически определимой системы являются, безусловно, необходимыми с точки зрения геометрической неизменяемости, то есть в такой системе нет ни одной лишней связи; если же число стержней геометрически неизменяемой системы превышает минимально необходимое, то она является статически неопределимой.

#### 1. 4. Примеры кинематического анализа

**Пример 1.** Произвести кинематический анализ системы (рис.1.10,а).

Определяем степень свободы системы по формуле П.Л. Чебышева:

$$W = 3Д - 2Ш - C_0, \quad (1.3)$$

где Д – число дисков, Ш – число простых шарниров,  $C_0$  – количество стержней.

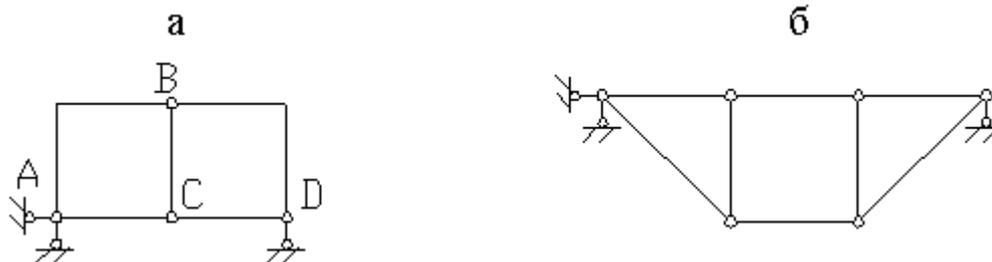


Рис.1.10

Отбрасывая все шарниры и опорные стержни, находим, что система состоит из пяти дисков ( $D=5$ ). Отбрасывая опорные стержни, определяем число шарниров, приведенных к простым ( $\Pi=6$ : по два в точках В и С, по одному – в точках А и Д). Число опорных стержней -  $C_0=3$ .  $W=3 \cdot 5 - 2 \cdot 6 - 3 = 0$ , то есть система может быть геометрически неизменяемой и статически неопределимой. Чтобы убедиться, что это так, выполним анализ структуры системы. Так как диски АВ, ВС и АС связаны тремя шарнирами А, В и С, не лежащими на одной прямой, то они образуют диск, к которому жестко присоединен диск ВД с помощью шарнира В и стержня СД, ось которого не проходит через центр шарнира. Эта неизменяемая фигура жестко присоединена к земле с помощью трех стержней, не пересекающихся в одной точке. Таким образом, система (рис.1.10,а) геометрически неизменяема и не является мгновенно изменяемой.

**Пример 2.** Выполнить кинематический анализ системы (рис.1.10,б).

Так как система является шарнирно-стержневой, то для определения ее степени свободы используем формулу

$$W = 3U - 2C - C_0, \quad (1.4)$$

где  $U$  – число узлов фермы;  $C$  – число внутренних стержней;  $C_0$  – число опорных стержней. Здесь  $U=6$ ,  $C=8$ ,  $C_0=3$ , следовательно,  $W=2 \cdot 6 - 8 - 3 = 1$ .

Таким образом, система имеет одну степень свободы, является механизмом и не может использоваться как строительная конструкция.

**Пример 3.** Исследовать систему (рис.1.11,а).

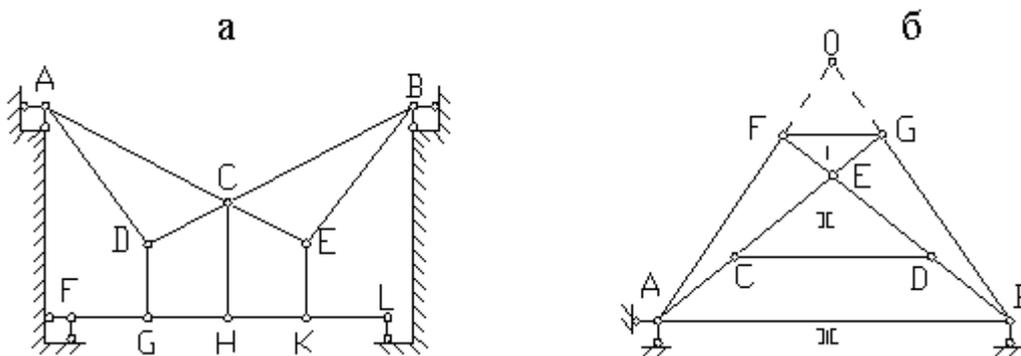


Рис.1.11

Степень свободы системы определим по формуле (1.3):

$$W = 3D - 2\Pi - C_0 = 3 \cdot 11 - 2 \cdot 14 - 7 = -2,$$

Следовательно, система имеет две лишние связи. Чтобы убедиться в ее геометрической неизменяемости, проанализируем структуру системы. Здесь можно выделить два неизменяемых треугольника АСД и ЕВС, которые жестко соединены друг с другом и с землей (рассматриваемой как диск) с помощью трех шарниров А, В, С, не лежащих на одной прямой. Стержень FH прикреплен к этой неизменяемой части системы с помощью шарнира F и стержня

СН, не проходящего через центр шарнира, так же как и стержень НЛ с помощью шарнира Н и опорного стержня L. Стержни ДГ и ЕК – лишние, так как и без них система неизменяема.

**Пример 4.** Произвести кинематический анализ системы (рис.1.11,б).

Используя формулу (1.4), определяем число степеней свободы системы:

$$W = 3U - 2C - C_0 = 2 * 7 - 11 - 3 = 0,$$

следовательно, система имеет необходимое количество связей, чтобы быть геометрически неизменяемой и статически определимой.

Проанализируем структуру. Выделим неизменяемые треугольники FGE и CED. Стержень АВ составляет единое целое с землей (третий диск), так как прикрепляется тремя опорными стержнями, непересекающимися в одной точке. Чтобы проверить, жестко ли соединены диски I, II, III (рис.1.11,б), убедимся три их мгновенных центра вращения не лежат на одной прямой. Шарнир Е является мгновенным центром вращения дисков I и II, а также дисков II и III, так как здесь находится фиктивный шарнир, заменяющий стержни АС и ВД, соединяющие эти два диска. Следовательно, система мгновенно изменяема, так как где бы ни находился мгновенный центр вращения О дисков I и III, через него и точку Е всегда можно провести прямую, на которой будут лежать все три мгновенных центра вращения.

**Пример 5.** Исследовать ферму (рис.1.12).

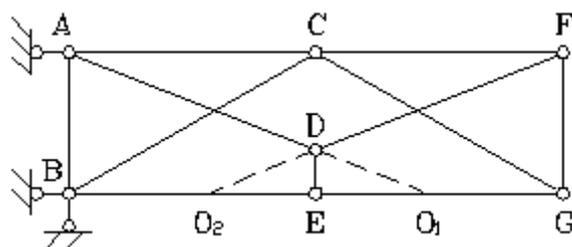


Рис.1.12

По формуле (1.4) определяем степень свободы фермы:

$$W = 2 * 7 - 11 - 3 = 0,$$

следовательно, система может быть геометрически изменяемой и статически определимой.

Проанализируем систему. Она состоит из трех дисков – треугольники ABC, CFG и стержень DE,- связанных между собой стержнями BE, AD, EG, DF, которые можно заменить фиктивными шарнирами O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> и шарниром С. Следовательно, можно сделать вывод: все стержни соединены между собой жестко и прикрепляются к земле так же жестко с помощью трех стержней, не пересекающихся в одной точке.

Для проверки системы на мгновенную изменяемость применим способ нулевой нагрузки – определим опорные реакции и усилия во всех стержнях при условии, что внешней нагрузки нет.

Из условий равновесия всей системы ( $\sum M_A = 0$ ;  $\sum M_B = 0$ ;  $\sum Y = 0$ ) находим, что опорные реакции равны нулю. Вырезая узел Е и проектируя все силы на вертикаль, находим, что усилие в вертикальном стержне  $N_{DE} = 0$ . Затем, записывая уравнения проекций двух сил, сходящихся в узле D (третья сила -  $N_{DE} = 0$ ), на направления нормалей к этим стержням, находим, что усилия в стержнях DA и DF также равны нулю. Наконец, рассматривая равновесие узлов А, F, В, G, находим, что усилия во всех стержнях системы при отсутствии нагрузки равны нулю, следовательно, система неизменяемая.

По формуле (1.4) определяем степень свободы:

$$W = 2 * 9 - 11 - 7 = 0,$$

то есть система обладает необходимым минимумом связей, чтобы быть геометрически неизменяемой. Для проверки того, является ли система действительно неизменяемой, используем метод замены стержней. Выберем заменяющую систему (рис.1.13,б). Здесь отброшен стержень BD, а его действие заменено силами X<sub>1</sub>, и добавлен заменяющий стержень DG. Выбранная заменяющая система неизменяема: стержни АВ, ВС и земля жестко соединены тремя шарнирами, не лежащими на одной прямой. А нижняя часть системы неизменяема, поскольку состоит из треугольника (например, GHI), к которому жестко

прикреплены все остальные узлы с помощью диад, и все это прикреплено к земле тремя опорными стержнями.

**Пример 6.** Выполнить кинематический анализ системы (рис.1.13,а).

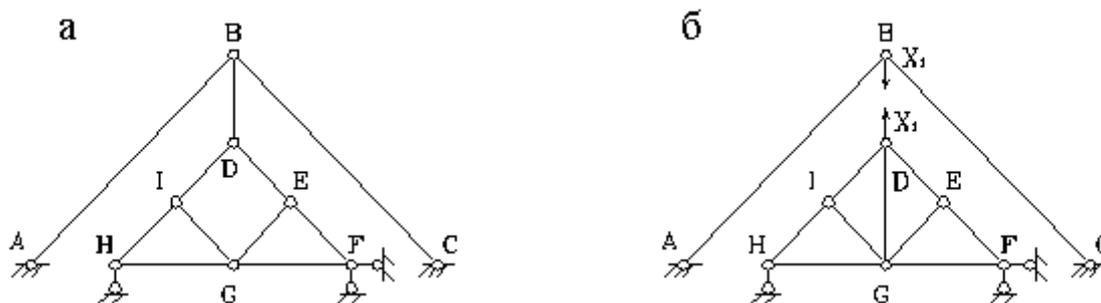


Рис.1.13

Теперь определим усилие в заменяющем стержне от сил  $X_1 = 1$ . Вырезая последовательно узлы E, I, G и рассматривая их равновесие, получим, что усилие в заменяющем стержне равно нулю, следовательно, исходная система - мгновенно изменяемая.

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие опорные связи применяются в расчётных схемах конструкций, какие реакции возникают в них, как они условно обозначаются и какие в них могут появиться перемещения?
2. Что называется расчётной схемой и чем она отличается от действительной конструкции?
3. Что называется расчётной схемой и чем она отличается от действительной конструкции?
4. Что такое геометрическая изменяемость и неизменяемость конструкции, подвижность и неподвижность?

**Практическое занятие №2.**

Тема: Определение внутренних усилий с помощью построения линий влияния.

Цель работы: Изучить способы определения усилий с помощью построения линий влияния.

Задание: По заданным характеристикам определить внутренние усилия, возникающие в поперечных сечениях балок.

## 1. Балки

### 2.1. Нагрузки и внутренние силовые факторы

В курсе строительной механики используются те же способы определения внутренних усилий, возникающих в поперечных сечениях однопролетных статически определимых балок, что и в курсе сопротивления материалов.

Если нагрузки направлены по нормали к оси балки, то в поперечных сечениях в общем случае нагружения возникают поперечная сила  $Q$  и изгибающий момент  $M$ ; если нагрузка приложена под другим углом, то кроме  $Q$  и  $M$  возникают еще и продольные силы  $N$ .

Положительные направления этих внутренних силовых факторов показаны на рис.2.1.

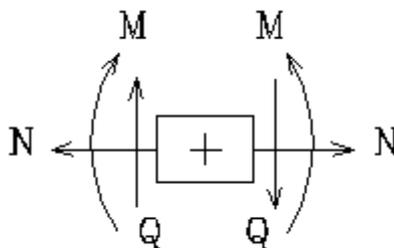


Рис. 2.1

При построении эпюр  $Q$  и  $N$  положительные значения ординат откладываются вверх от оси эпюры, а отрицательные – вниз. При построении эпюры  $M$  положительные значения ординат откладываются *вниз* от оси эпюры, в результате ординаты оказываются расположенными *со стороны растянутых волокон балки* (в отличие от правила, принятого в курсе сопротивления материалов, где ординаты откладываются *со стороны сжатых волокон*).

Основные дифференциальные зависимости между  $q$ ,  $Q$ ,  $M$ , а также те закономерности (правила), которым подчиняются эпюры внутренних силовых факторов, подробно рассматриваются в курсе сопротивления материалов.

Сопротивление материалов рассматривает только однопролетные балки при действии на них *неподвижных нагрузок*. В курсе строительной механики рассматриваются эти же балки, но при действии на них и *подвижных нагрузок*, а также *многопролетные* статически определимые балки при действии на них подвижных и неподвижных нагрузок. С подвижной нагрузкой приходится встречаться при расчетах мостов, кранов и других сооружений. Примерами такой нагрузки являются поезд, движущийся по мосту; кран, движущийся по подкрановой балке и др. При этом усилия (а также напряжения и деформации) зависят от положения подвижной нагрузки. Для определения расчетных значений усилий необходимо из всех возможных положений нагрузки выбрать такое, при котором рассчитываемый элемент будет находиться в самых неблагоприятных условиях. Такое положение нагрузки называется *невыгоднейшим*, или *опасным*.

График, показывающий закон изменения какого-либо фактора (усилие, реакция, прогиб) при передвижении по сооружению силы  $F=1$ , называется его *линией влияния*.

Линии влияния и эпюры – это, по существу, противоположные понятия. Ординаты эпюры характеризуют распределение исследуемого фактора *по различным сечениям* балки при неподвижной нагрузке, а ординаты линии влияния характеризуют изменение исследуемого фактора, возникающего *в одном определенном сечении* при передвижении силы  $F=1$  по длине балки.

## 2.2. Линии влияния опорных реакций для однопролетных и консольных балок

Пусть по шарнирной балке (рис.2.2,а) перемещается груз  $F=1$ . Обозначим расстояние от правой опоры до груза через  $x$ . При перемещении груза расстояние будет изменяться от нуля (когда груз стоит над правой опорой) до  $L$  (когда груз стоит над левой опорой).

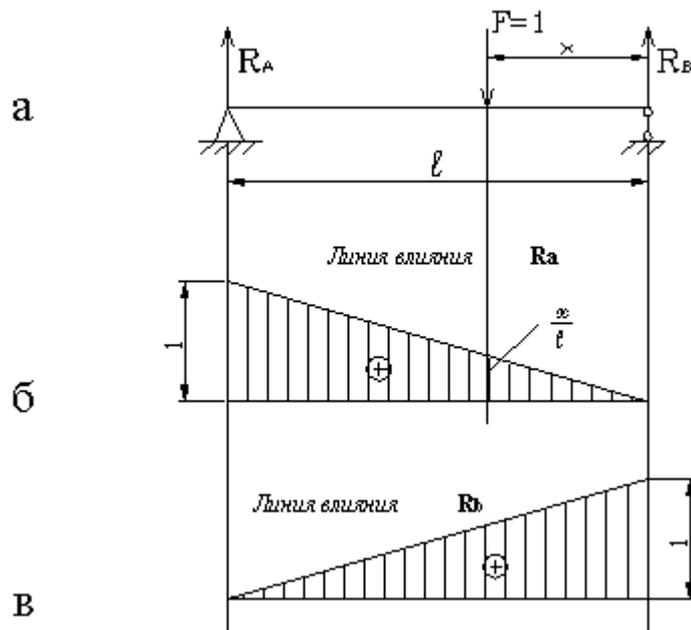


Рис.2.2

Определим величину реакции  $R_A$  в зависимости от расстояния  $X$ :

$$\sum M_B = 0: R_A L - FX = 0 \Rightarrow R_A = \frac{FX}{L} = \frac{X}{L} \quad (5)$$

Графическое отображение этого закона (рис.2.2,б) и есть линия влияния опорной реакции  $R_A$ . Ордината линии влияния  $R_A$  на расстоянии  $x$  от правой опоры (рис.2.2,б) равна  $x/L$ ; эта ордината численно равна величине опорной реакции  $R_A$  в тот момент, когда груз  $F = 1$  стоит на расстоянии  $x$  от правой опоры, или иначе, ордината линии влияния  $R_A$  дает величину  $R_A$  в тот момент, когда подвижный груз  $F = 1$  расположен над данной ординатой.

Если на балку действует груз  $R_A$ , то для вычисления опорной реакции от этого груза нужно ординату линии влияния, измеренную под этим грузом, умножить на величину  $F_1$ . В случае, когда на балку действуют несколько вертикальных сил, нужно найти числовые значения реакций  $R_A$  отдельно от каждой силы, а затем суммированием реакций от отдельных сил получить полную реакцию от заданной системы сил.

Аналогично строится линия влияния опорной реакции  $R_B$  (рис.2.2,в).

Рассмотрим построение линий влияния опорных реакций для шарнирной балки с консолями (рис.2.3,а).

Уравнения для реакций, а, значит и их вид на участке между опорами, будут такими же, как и предыдущем случае. Продолжая эти линии на консоли, получим линии влияния  $R_A$  и  $R_B$  (рис.2.3,б,в). Численные значения крайних ординат могут быть легко найдены из подобия. Отрицательные ординаты линий влияния опорных реакции означают, что когда груз  $F = 1$  расположен над ними, опорные реакции направлены вниз.

Построим линии влияния опорных реакций для жестко защемленной балки (рис.2.4,а).

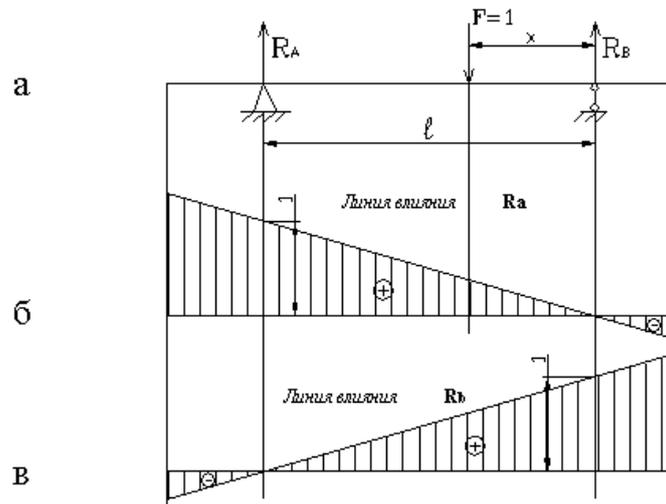


Рис.2.3

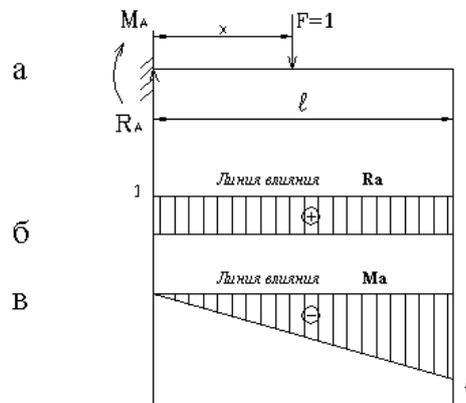


Рис.2.4

В жесткой заделке при вертикальной нагрузке возникают вертикальная реакция  $R_A$  и опорный момент  $M_A$ .

Обозначим расстояние от заделки до груза через  $x$ .

Для построения линии влияния  $R_A$  составим сумму проекций всех сил на вертикальную ось:

$$\sum Y = 0: R_A - 1 = 0 \Rightarrow R_A = 1,$$

следовательно, линия влияния  $R_A$  - прямая, параллельная оси (рис.2.4,б).

Для построения линии влияния:

$$M_A \sum M_A = 0: M_A + 1 \cdot X = 0 \Rightarrow M_A = -X;$$

$$\text{при } X = 0 \quad M_A = 0;$$

$$\text{при } X = l \quad M_A = -l.$$

Ординаты линии влияния изгибающего момента (рис.2.4,в) имеют размерность длины.

### 2.3. Линии влияния поперечных сил и изгибающих моментов для однопролетных и консольных балок

Рассмотрим построение линии влияния изгибающего момента для сечения I балки на двух опорах (рис.2.5,а).

Пока груз находится правее сечения I, то есть пока  $X \leq b$ , левее сечения I имеем только реакцию  $R_A$ , следовательно  $M_I = R_A \cdot a$ , а, значит, линию влияния  $M_I$  можно получить,

умножая ординаты линии влияния  $R_A$  (рис.2.2,б) на  $a$ : 
$$M_I = \frac{X \cdot a}{l}$$

Для построения графика этого уравнения вычислим два значения  $M_I$ :

при  $X = 0$   $M_I = 0$ ,

при  $X = b$   $M_I = \frac{a \cdot b}{l}$ .

По этим данным строим прямую, называемую *правой прямой* линии влияния  $M_I$  (рис.2.5,б). Ее ординаты дают значения изгибающего момента в сечении I, когда груз  $F = 1$  расположен справа от этого сечения, то есть при  $X \leq b$ .

Рассуждая аналогично, можно построить *левую прямую* линии влияния  $M_I$ , умножая ординаты линии влияния  $R_B$  (рис.2.2,в) на  $b$ .

Для этой прямой

$$M_I = \frac{l - X}{l} b$$

и тогда

при  $X = b$  ;  $M_I = \frac{l - b}{l} b = \frac{ab}{l}$

при  $X = 0$   $M_I = 0$ .

Как видно (рис.2.5,б), левая и правая прямые, ограничивающие линию влияния  $M_I$ , пересекаются под сечением I.

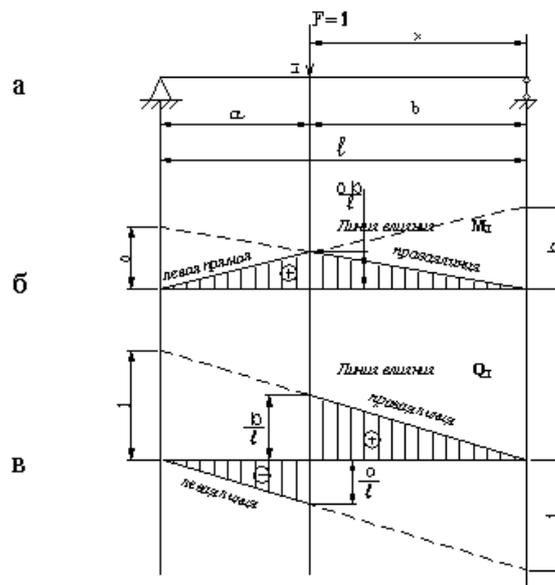


Рис.2.5

Если продолжить прямые, ограничивающие линию влияния  $M_I$  до вертикалей, проведенных через опоры A и B, то эти прямые отсекут над опорами ординаты  $a$  и  $b$  соответственно. Поэтому *практически* линию влияния  $M_I$  часто строят так: над левой опорой в определенном масштабе откладывают ординату  $a$  и проводят прямую через вершину этой ординаты и нулевую точку над правой опорой; над правой опорой откладывают ординату  $b$  и ее

вершину соединяют с нулевой точкой над левой опорой. Проведенные прямые пересекаются под сечением I.

Рассмотрим построение линии влияния поперечной силы  $Q_I$ .

Когда груз расположен правее сечения I ( $X \leq b$ ), из рассмотрения левой части находим:

$$Q_I = R_A = \frac{X}{\ell};$$

таким образом, правая прямая линии влияния  $Q_I$  совпадает с линией влияния  $R_A$ . Если же груз расположен левее сечения I ( $X \geq b$ ), то из рассмотрения правой части имеем:

$Q_I = -R_B = -\frac{\ell - X}{\ell}$ , и левая прямая линии влияния  $Q_I$  повторяет линию влияния  $R_B$ , но с обратным знаком.

При продолжении левой и правой прямых до опор получим ординату +1 под левой опорой и ординату -1 - под правой (рис.2.5,в). Под сечением I линия влияния  $Q_I$  имеет скачок.

Построим линии влияния поперечной силы и изгибающего момента в сечении I для защемленной балки (рис.2.6,а).

Построение линии влияния  $M_I$ .

Если груз  $F = 1$  расположен слева от сечения I ( $X \leq a$ ), то  $M_I = 0$ ; если груз справа от сечения I, то  $M_I = -X_1$  ( $X_1 \leq b$ ):

при  $X_1 = 0$   $M_I = 0$

при  $X_1 = b$   $M_I = -b$ .

Линия влияния  $M_I$  показана на рис.2.6,б.

Построение линии влияния  $Q_I$ .

При положении груза слева от сечения:  $Q_I = 0$ ,

при положении груза справа от сечения  $Q_I = 1$ .

Линия влияния  $Q_I$  показана на рис.2.6,в.

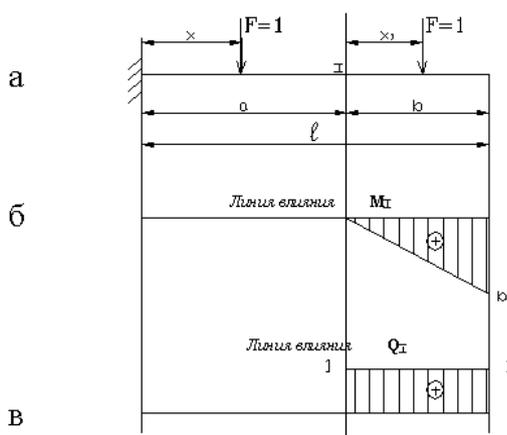


Рис.2.6

## 2. 4. Линия влияния при узловой передаче нагрузки

Во многих случаях внешние силы прикладываются не непосредственно к балкам, а посредством других балок (рис.2.7,а). При этом основная балка называется *главной*; балки,

расположенные перпендикулярно к главной, называются *поперечными*, а верхние однопролетные балки, к которым непосредственно прикладывается нагрузка, - *продольными*, или *вспомогательными*. Такой способ передачи нагрузки на главную балку называется *узловым*, а те сечения главной балки, в которых к ней примыкают поперечные балки, - *узлами*. Участок балки между соседними узлами называется *панелью*.

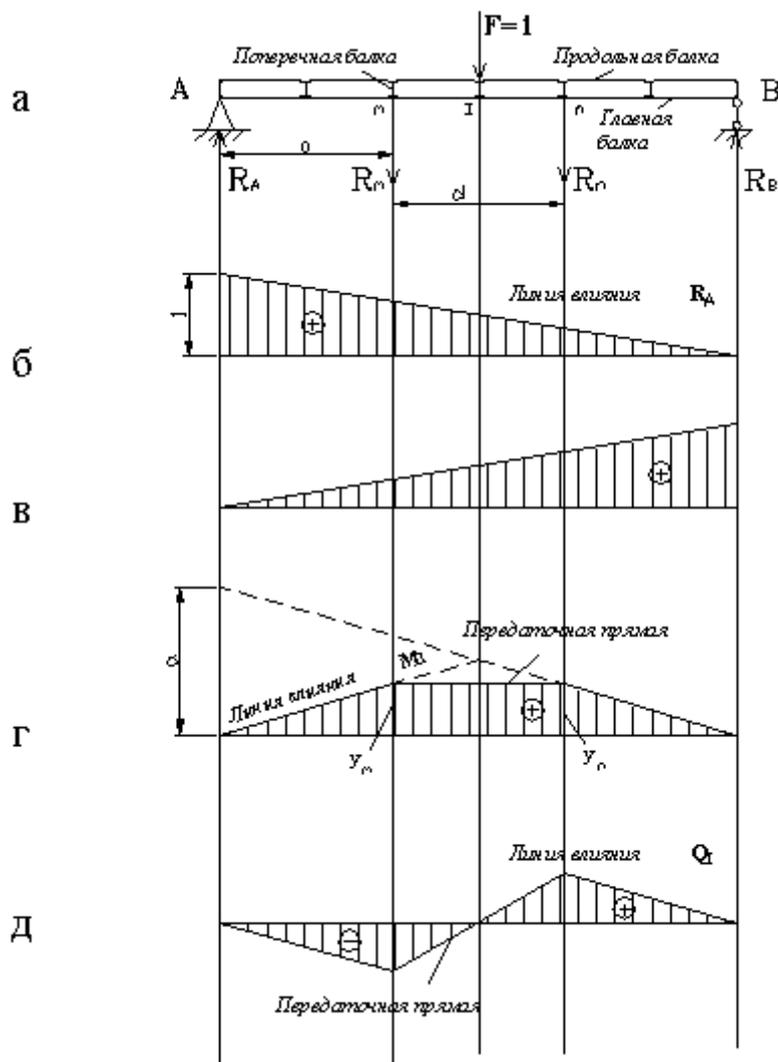


Рис.2.7

Действие груза  $F$ , приложенного к продольной балке в пролете  $mn$  (рис.2.7,а), передается на главную балку только в узлах  $m$  и  $n$ , в которых расположены поперечные балки, поддерживающие данную продольную. На величину опорных реакций  $R_A$  и  $R_B$  (рис.2.7,б,в) будут такими же, как и при нагрузке, приложенной непосредственно к главной балке.

*Построение линии влияния  $M_1$ .*

Величина  $M_1$  остается такой же, как и при нагрузке, приложенной непосредственно к главной балке, пока груз  $F = 1$  расположен на участках  $Am$  и  $nB$ , то есть в любом месте, кроме той панели, на которой находится сечение  $I$ . Поэтому, построив линию влияния  $M_1$  в предположении, что нагрузка приложена непосредственно к главной балке (рис.2.7,г), можно заштриховать эту линию влияния на участках  $Am$  и  $nB$ . Когда груз находится на панели  $mn$ , его воздействие на главную балку передается в узлах  $m$  и  $n$  в виде опорных давлений  $R_m$  и  $R_n$  вспомогательной балки  $mn$  (рис.2.8).

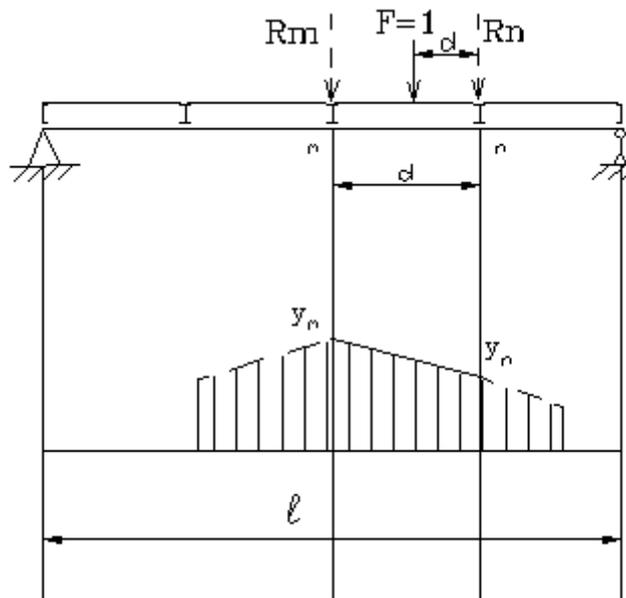


Рис.2.8

Можно показать, что линия влияния усилия главной балки при движении груза  $F = 1$  между узлами  $m$  и  $n$  есть прямая, соединяющая вершины узловых ординат  $y_m$  и  $y_n$ . Эту прямую называют *передаточной* (рис.2.7,г).

Аналогичным образом выполняется построение линии влияния поперечной силы  $Q_1$ . На участках  $Am$  и  $Bn$  ординаты линии влияния будут такими же, как и при нагрузке, приложенной непосредственно к главной балке. А на протяжении панели  $mn$ , на которой находится сечение  $I$ , через вершины ординат под узлами  $m$  и  $n$  проводится передаточная прямая (рис.2.7,д).

На основании изложенного можно сформулировать некий алгоритм построения линии влияния при узловой передаче нагрузки:

- 1) строится линия влияния без учета узловой передачи, то есть в предположении, что нагрузка приложена непосредственно к главной балке;
- 2) на построенной линии влияния отмечают узловые ординаты рассекаемой данным сечением панели и их вершины соединяют передаточной прямой.

## 2. 5. Определение усилий с помощью линий влияния

Будем рассматривать два вида нагружения системы: 1) сосредоточенными силами; 2) равномерно распределенными нагрузками.

*Действие сосредоточенных сил.*

Для определения какого-либо усилия от действия одной силы  $F_1$  нужно измерить под точкой приложения силы ординату линии влияния этого усилия и умножить ее на величину силы. При одновременном действии системы сосредоточенных сил на основании принципа независимости действия сил нужно то же самое проделать для каждой силы и полученные результаты сложить.

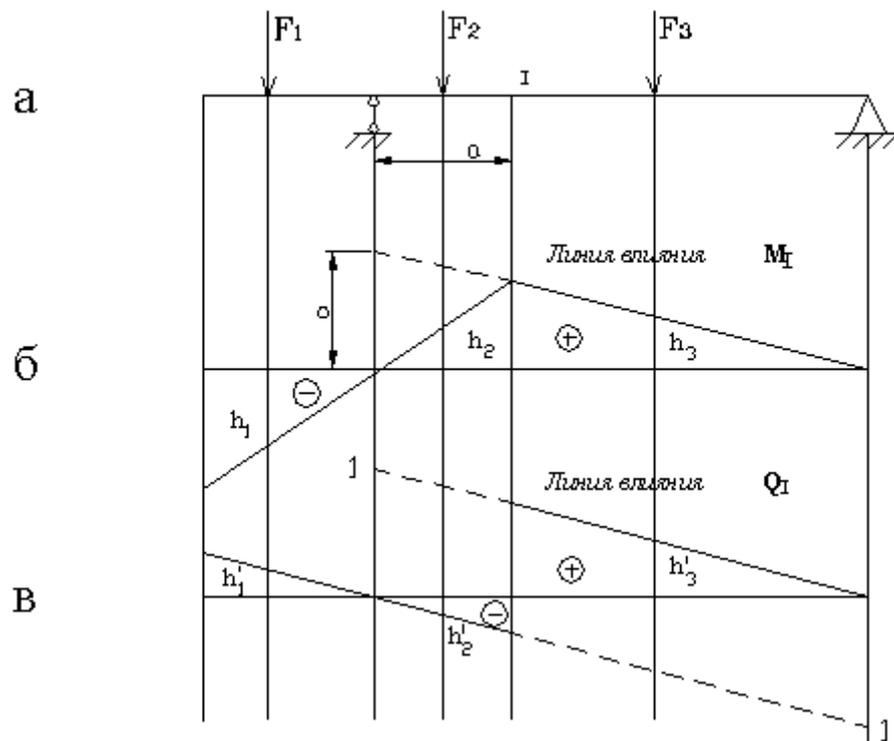


Рис.2.9

Например, для определения изгибающего момента в сечении \$I\$ (рис.2.9,б) нужно силы \$F\_1\$, \$F\_2\$, \$F\_3\$ умножить на расположенные под ними ординаты линии влияния \$M\_I\$ (с учетом знаков этих ординат) и тогда:

$$M_I = \sum_i F_i h_i = -F_1 h_1 + F_2 h_2 + F_3 h_3$$

Аналогичным образом вычисляется и поперечная сила в сечении \$I\$ (рис.2.9,б):

$$Q_I = \sum_i F_i h'_i = -F_1 h'_1 + F_2 h'_2 + F_3 h'_3$$

*Действие равномерно распределенных нагрузок.*

Пусть на некотором участке балки (рис.2.10,а) приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивностью \$q\$. Заменим на бесконечно малом участке \$dx\$ распределенную нагрузку сосредоточенной силой \$q dx\$. От этой сосредоточенной силы изгибающий момент в сечении \$I\$ равен \$q dx h\_x\$, где \$h\_x\$ - ордината линии влияния \$M\_I\$ под силой (рис.2.10,б). Всю распределенную нагрузку можно представить как бесконечно большое число сосредоточенных сил \$q dx\$. Изгибающий момент в сечении \$I\$ от такой системы сил будет равен сумме всех произведений \$q dx h\_x\$:

$$M_I = \int_c^d q dx h_x = q \int_c^d h_x dx$$

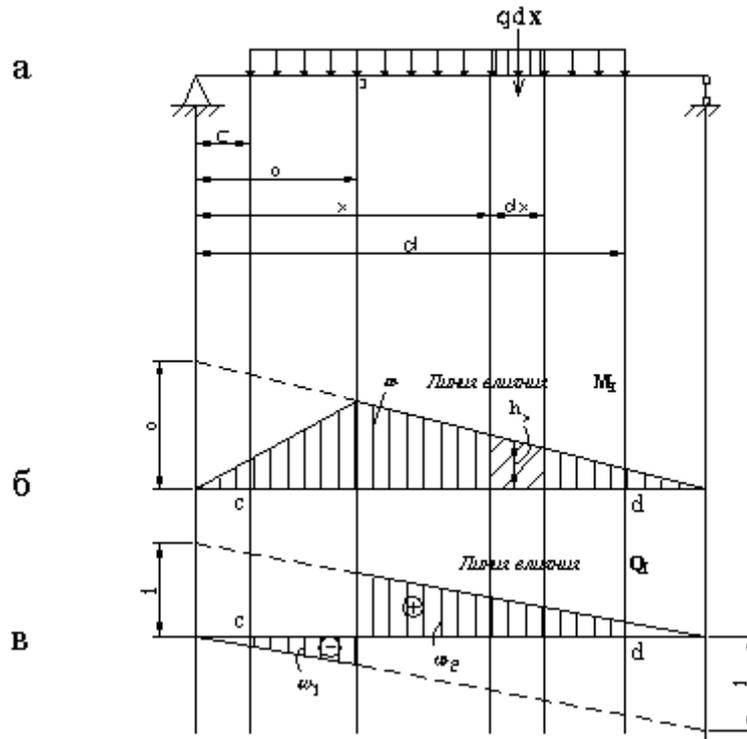


Рис.2.10

Выражение, стоящее под знаком интеграла, представляет собой элементарную площадку линии влияния  $M_I$  на участке  $dx$  (наклонная штриховка на рис.2.10,б), а интеграл, вычисленный в пределах от  $c$  до  $d$  равен площади линии влияния  $M_I$  на участке от  $x = c$  до  $x = d$  (вертикальная штриховка на рис.2.10,б). Если эту площадь обозначить через  $\omega$ , то:

$$M_I = q\omega$$

Таким образом, для определения усилия от равномерно распределенной нагрузки нужно интенсивность этой нагрузки умножить на площадь линии влияния в пределах расположения нагрузки.

Если под распределенной нагрузкой линия влияния имеет разные знаки, то площади отдельных участков берутся с учетом знаков линии влияния, так, поперечная сила в сечении  $I$  (рис.2.10,в) определяется в виде:

$$Q_I = q(\omega_2 - \omega_1)$$

## 2.6. Опасное положение нагрузки на сооружении. Эквивалентная нагрузка

Опасным, или невыгоднейшим, называется такое положение нагрузки, при котором значение рассматриваемого усилия будет максимальным.

Рассмотрим два варианта нагружения.

### 1. Действие подвижной равномерно распределенной нагрузки.

Как известно, величина усилия, возникающего от действия такой нагрузки, равна произведению интенсивности  $q$  на площадь линии влияния  $\omega$ , вычисленную на участке под этой нагрузкой. Поскольку  $q = const$ , то усилие будет максимальным при минимальной площади  $\omega$ , а это будет возможно при условии, что нагрузка  $q$  приложена над всей площадью линии влияния одного знака (рис.2.11).

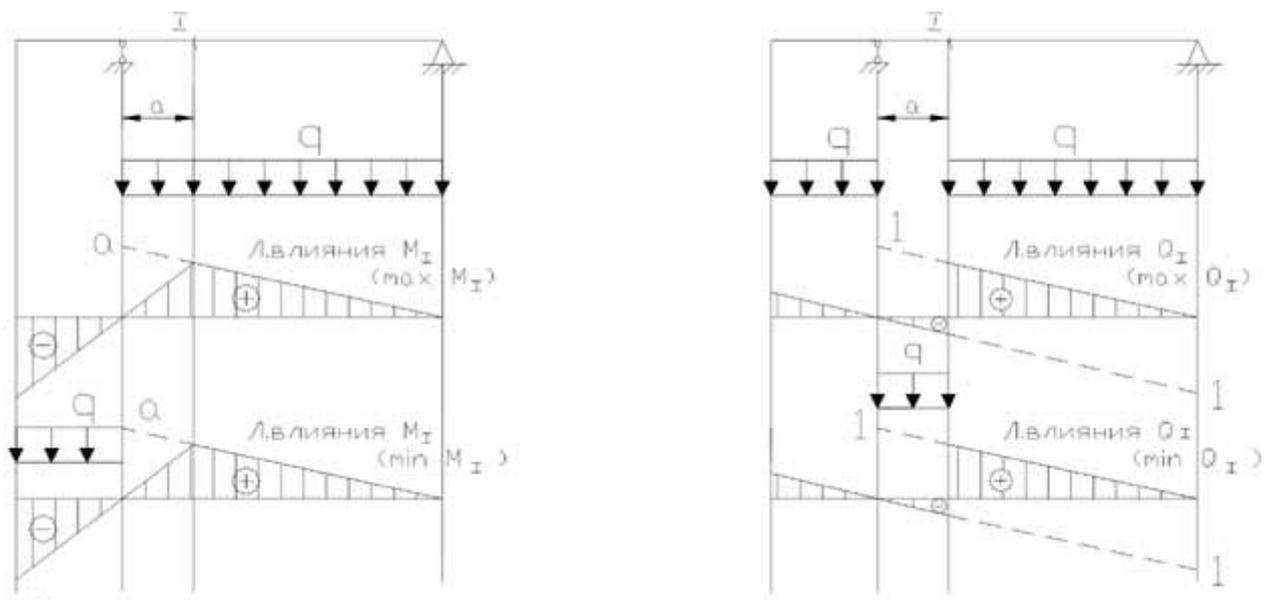


Рис.2.11

2. Действие системы жестко связанных сосредоточенных сил.

Такая нагрузка на сооружение возникает при движении по нему транспортных средств (поезд, автоколонна и так далее).

Рассмотрим систему жестко связанных грузов (рис.2.12,а), положение которой характеризуется расстоянием  $x$  от начала линии влияния до первого груза. Пусть система грузов переместилась на  $\Delta x$ , оставаясь полностью на участке  $av$ . При этом равнодействующая также переместится на  $\Delta x$ , а ордината под ней изменится на  $\Delta h = \Delta x * tg\alpha$ , следовательно, усилие  $S$  получит приращение  $\Delta S = R * \Delta h = R * \Delta x * tg\alpha$ .

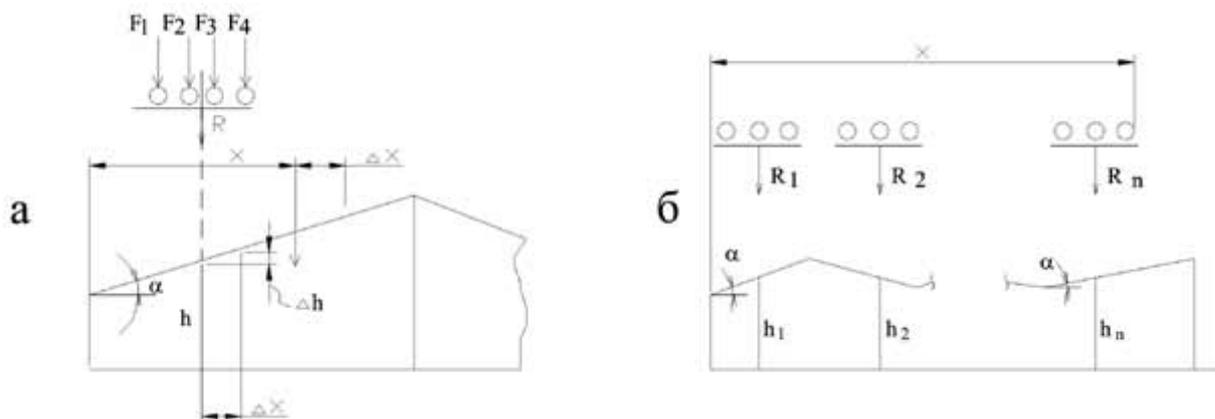


Рис.2.12

Когда загружены несколько участков линии влияния, можно нагрузку на каждом участке заменить равнодействующей (рис.2.12,б):

$$S = \sum_{i=1}^n R_i h_i$$

Если нагрузка переместится на небольшое расстояние  $\Delta x$  так, что грузы останутся на тех же участках, то равнодействующие не изменяются, а усилие  $S$  получит приращение

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n R_i \operatorname{tg} \alpha_i \Delta x = \Delta x \sum_{i=1}^n R_i \operatorname{tg} \alpha_i \quad (2.1)$$

и тогда

$$\frac{\Delta S}{\Delta x} = \sum_{i=1}^n R_i \operatorname{tg} \alpha_i \quad (2.2)$$

В соответствии с (2.1) приращение усилия линейно зависит от  $\Delta x$  до тех пор, пока ни один из грузов не перейдет через вершину, следовательно, график изменения усилия в зависимости от  $\Delta x$  будет линейным (рис.2.13).

Из (2.2) и рис.2.13 следует:

$$\operatorname{tg} \beta = \sum_{i=1}^n R_i \operatorname{tg} \alpha_i \quad (2.3)$$

Критерием достижения усилием  $S$  максимального значения будет изменение знака выражения (2.2) при переезде грузов через одну из вершин линии влияния или обращение его в нуль, что соответствует горизонтальной линии на графике. Этот критерий позволяет определить только локальный максимум. Перебор же всех возможных вариантов вручную может быть достаточно трудоемким.

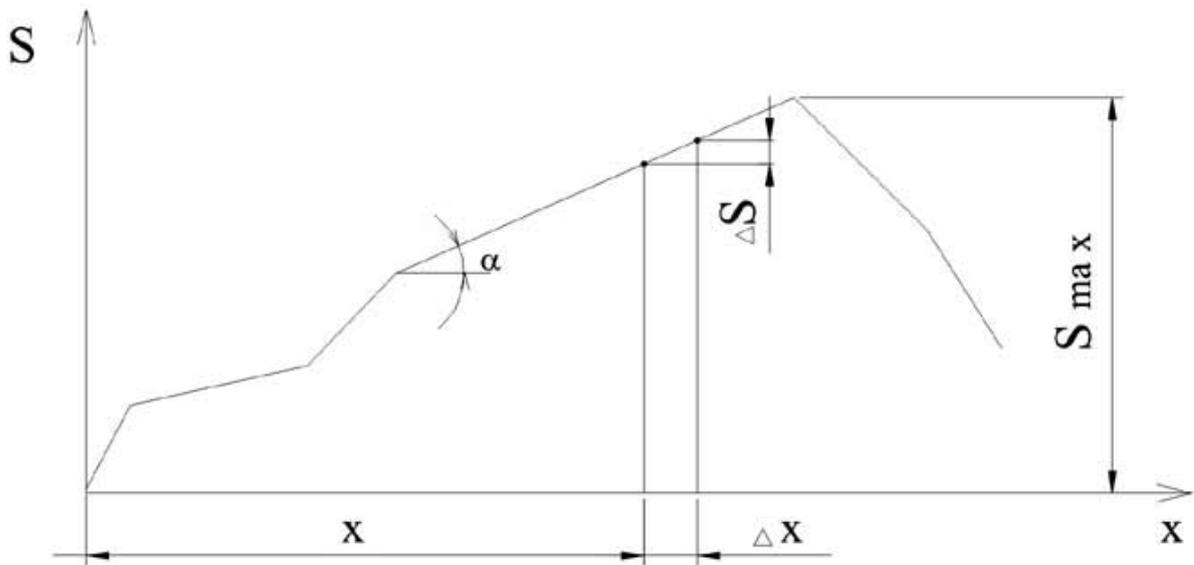


Рис.2.13

В практике расчетов чаще всего встречается загрузка треугольной линии влияния (рис.2.14). Тогда (2.3) записывается в виде

$$R_{\text{лев}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{лев}} - R_{\text{пр}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{лев}} y}{a} - \frac{R_{\text{пр}} y}{b} = \left( \frac{R_{\text{лев}}}{a} - \frac{R_{\text{пр}}}{b} \right) y \quad (2.4)$$

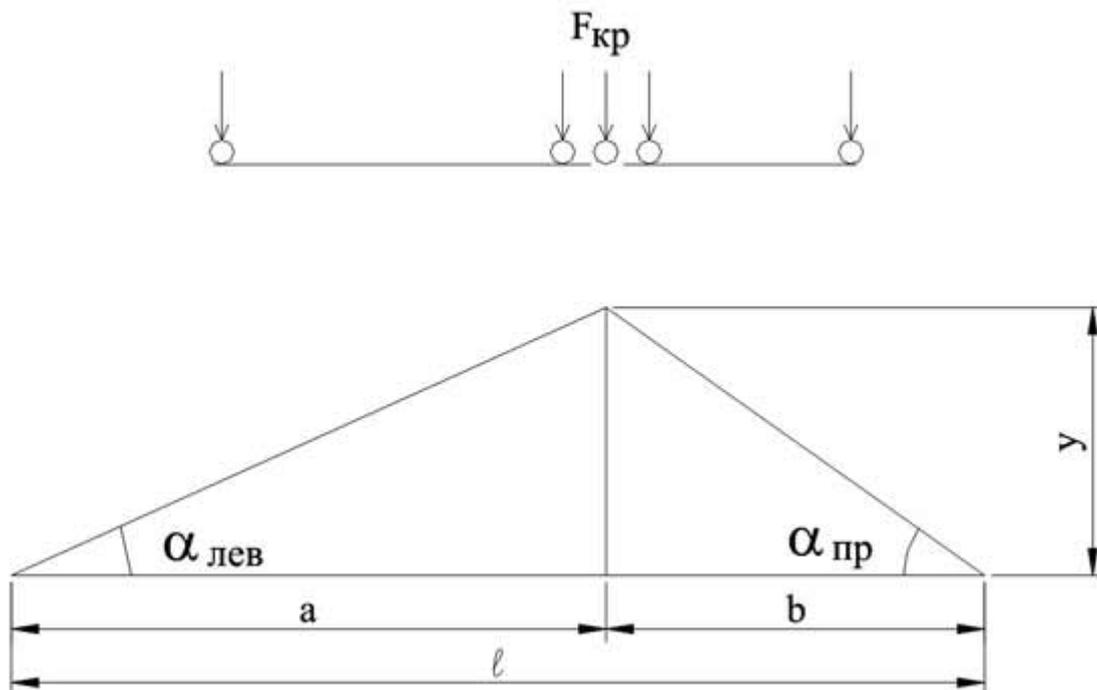


Рис. 2.14

Знак выражения (2.4) не зависит от  $y$ , поэтому задача сводится к определению того груза, переход которого через вершину линии влияния изменяет знак величины, стоящей в скобках выражения (2.4). Этот груз называется *критическим*. Очевидно, что при достижении грузом критического значения

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{лев}} = \frac{a}{l} R; \\ R_{\text{пр}} = \frac{b}{l} R; \\ R_{\text{лев}} + R_{\text{пр}} = R. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

отсюда

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{лев}} = \frac{Ra}{l}; \\ R_{\text{пр}} = \frac{Rb}{l}. \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Формулы (2.6) можно использовать только в том случае, когда система грузов полностью расположена над треугольной линией влияния.

Ввиду того, что невыгодное положение нагрузки не зависит от размера ординаты  $y$ , можно для каждого вида подвижной нагрузки при различных  $l$  и  $a/l$  найти  $S_{\text{max}}$  при  $y = 1$ . Затем действие подвижной нагрузки при невыгодном ее расположении можно заменить действием нагрузки, равномерно распределенной по всей длине  $l$ . Такая нагрузка называется эквивалентной. Ее интенсивность определим из условия

$$S_{\max} = y \overline{S_{\max}} = q_3 \cdot \frac{1}{2} ly,$$

откуда

$$q_{\text{экв}} = \frac{2\overline{S}}{l}. \quad (2.7)$$

Эквивалентная нагрузка зависит от длины треугольной линии влияния, положения ее вершины, типа подвижной нагрузки и приводится в справочных таблицах.

Максимально возможное усилие вычисляется через площадь линии влияния:

$$S_{\max} = q_3 \omega. \quad (2.8)$$

### 2.7. Примеры построения линий влияния и определения усилий с их помощью

**Пример 2.1.** Для шарнирной балки (рис.2.15,а), загруженной равномерно распределенной нагрузкой, определить опорную реакцию левой опоры, поперечную силу и изгибающий момент в среднем сечении с помощью линий влияния.

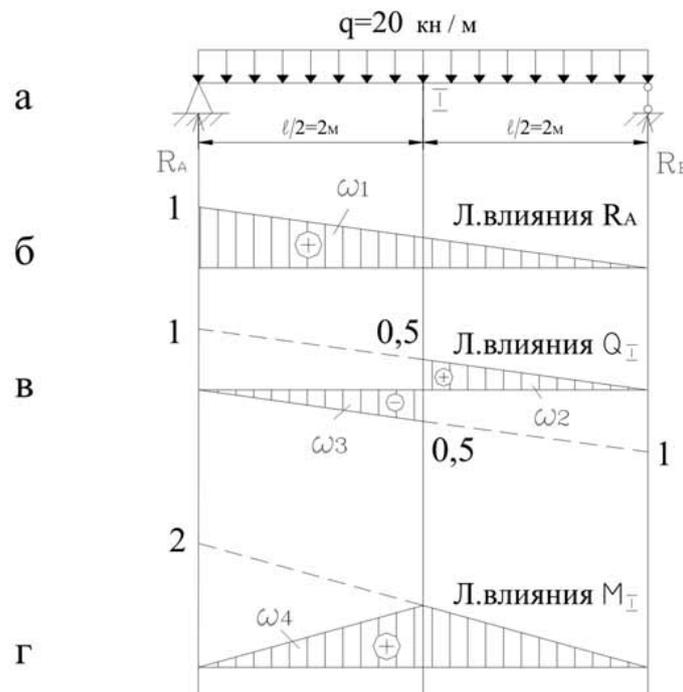


Рис. 2.15

#### Решение

Строим линии влияния  $R_A$  (рис.2.15,б),  $Q_I$ (рис.2.15,в) и  $M_I$ (рис.2.15,г).

$$R_A = q\omega_1 = 20 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 4 = 40 \text{ kH};$$

$$Q_I = q(\omega_2 + \omega_3) = 20\left(\frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2 - \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2\right) = 0;$$

$$M_I = q\omega_4 = 20 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 4 = 40 \text{ kH} \cdot \text{м}.$$

**Пример 2.2.** С помощью линий влияния определить опорную реакцию правой опоры, поперечную силу и изгибающий момент в сечении I балки (рис.2.16,а).

**Решение.**

Строим линии влияния  $R_B$ ,  $Q_I$ ,  $M_I$  (рис.2.16,б,в,г).

$$R_B = q\omega_1 + Fh_1 = 20 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 7 + 70 \cdot \frac{9}{7} = 160 \text{ кН};$$

$$Q_I = q(\omega_2 + \omega_3) + Fh_2 = 20\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{7} \cdot 4 - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{7} \cdot 3\right) - 70 \cdot \frac{2}{7} = -10 \text{ кН};$$

$$M_I = q\omega_4 + Fh_3 = 20 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{12}{7} \cdot 7 - 70 \cdot \frac{6}{7} = 60 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

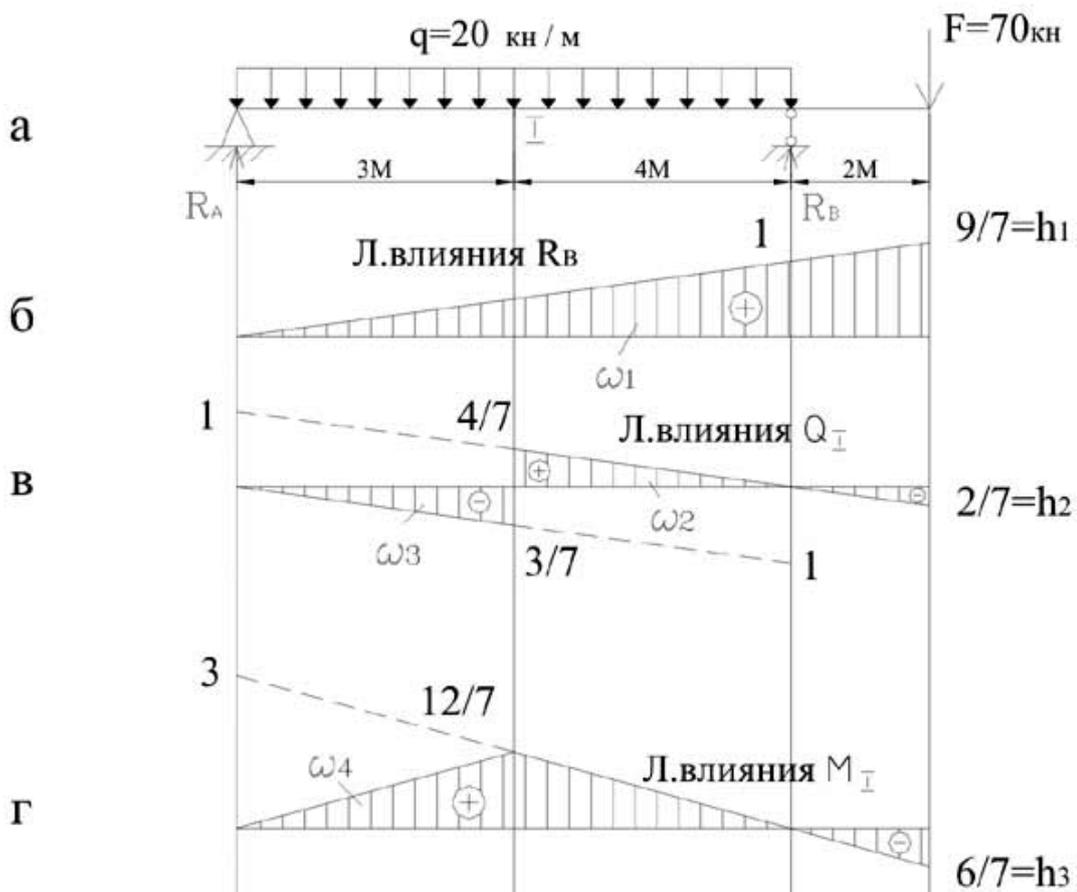


Рис.2.16

**Пример 2.3.** Определить максимальный изгибающий момент и максимальную поперечную силу в сечении I балки (рис.2.17,а) от подвижной системы сил.

**Решение.**

Строим линии влияния  $M_I$  и  $Q_I$  (рис.2.17,б,в). Линия влияния  $M_I$  имеет треугольное очертание, поэтому критическое положение нагрузки определяем с помощью неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{\text{ЛЭВ}} + F_{\text{КР}}}{a} \geq \frac{R_{\text{ПР}}}{e}; \\ \frac{R_{\text{ЛЭВ}}}{a} \leq \frac{R_{\text{ПР}} + F_{\text{КР}}}{b}; \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Принимаем  $F_{\text{КР}} = F_3 = 2 \text{ кН}$ ,  $R_{\text{ЛЭВ}} = 3 + 2 = 5 \text{ кН}$ ;  $R_{\text{ПР}} = 3 + 3 = 6 \text{ кН}$ .

Проверяем условия (2.9):

$$\frac{5+2}{2} > \frac{6}{6}; \quad \frac{5}{2} < \frac{6+2}{6}$$

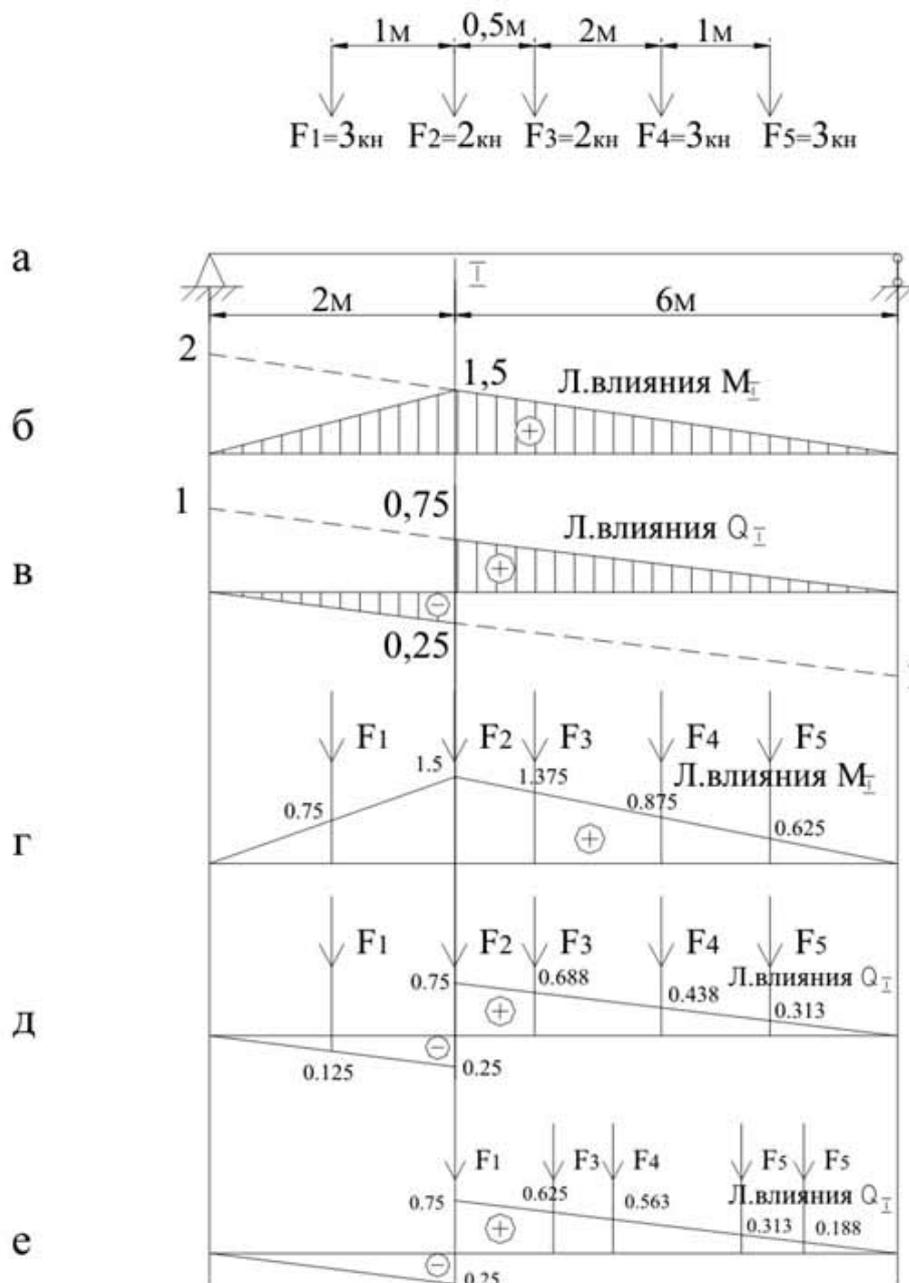


Рис. 2.17

Так как второе неравенство не удовлетворяется, то сдвигаем нагрузку вправо:

$$F_{\text{КР}} = F_2 = 2 \text{ кН}, \quad R_{\text{ЛЕВ}} = 3 \text{ кН}; \quad R_{\text{ПР}} = 2 + 3 + 3 = 8 \text{ кН}.$$

Подставляя эти значения в (2.9), убеждаемся, что оба неравенства выполняются, следовательно,  $F_{\text{КР}} = F_2$ .

При таком положении нагрузки (рис. 2.17,г) вычисляем:

$$M_{I, \text{MAX}} = 0,75 \cdot 3 + 1,5 \cdot 2 + 1,375 \cdot 2 + 0,875 \cdot 3 + 0,625 \cdot 3 = 12,5 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для определения  $Q_{I, \text{MAX}}$  устанавливаем над вершиной линии влияния  $Q_I$  груз  $F_2$  (рис.2.17,д):

$$Q_I = 3 \cdot (-0,125) + 2 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,688 + 3 \cdot 0,438 + 3 \cdot 0,313 = 4,754 \text{ кН}.$$

Теперь сдвигаем систему сил вправо, располагая над вершиной линии влияния  $Q_1$  груз  $F_2$  (рис.2.17,е):

$$Q_1^{\text{в}} = 3 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,625 + 2 \cdot 0,563 + 3 \cdot 0,313 + 3 \cdot 0,188 = 6,129 \text{ кН.}$$

Так как  $Q_1^{\text{в}} > Q_1^{\text{л}}$  и слева от  $F_1$  сил в заданной системе нет, то  $Q_{1, \text{MAX}} = Q_1^{\text{в}} = 6,129 \text{ кН.}$

**Пример 2.4.** Определить критическое положение нагрузки, состоящей из шести связанных сосредоточенных сил (рис.2.18), вычислить  $S_{\text{MAX}}$  и соответствующие значения эквивалентной нагрузки  $q_{\text{Э}}$ .

$F_1 = F_2 = F_3 = F_6 = 10 \text{ кН; } F_4 = 18 \text{ кН; } F_5 = 14 \text{ кН.}$

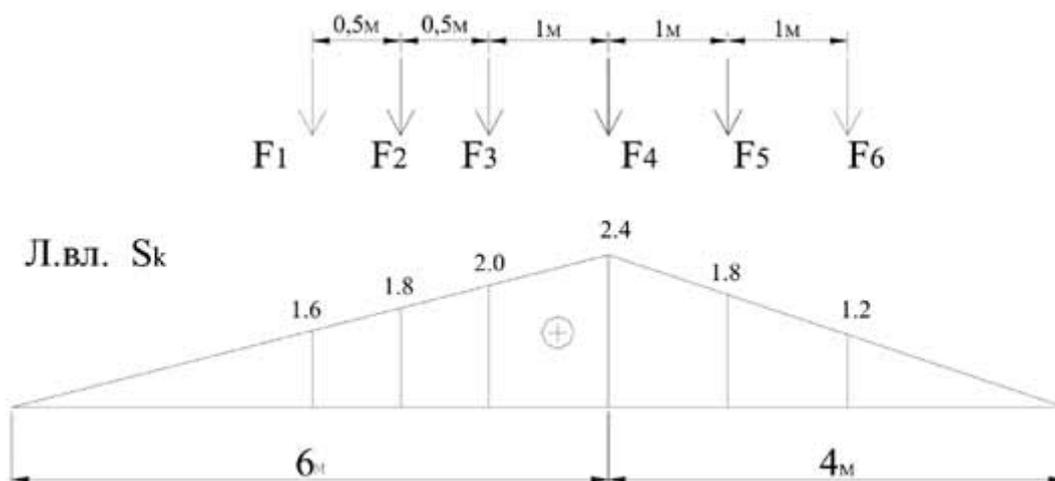


Рис. 2.18

**Решение.**

Методом попыток определяем, что неравенства (2.9) удовлетворяются одновременно только при расположении над вершиной линии влияния  $S_K$  груза  $F_4$  (предлагается убедиться в этом самостоятельно).

Максимальная величина усилия  $S_K$  :

$$S_{K, \text{MAX}} = 10(1,6 + 1,8 + 2) + 18 \cdot 2,4 + 14 \cdot 1,8 + 10 \cdot 1,2 = 134,4 \text{ кН}$$

Вычисляем эквивалентную нагрузку:

$$q_{\text{Э}} = \frac{\sum F_i y_i}{\omega} = \frac{134,4}{\left(\frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 2,4\right)} = 11,2 \text{ кН / м.}$$

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Понятие о линиях влияния.
2. Статический метод построения линий влияния реакций опор, по перечных сил, изгибающих моментов в простых балках.

### Практическое занятие №3.

Тема: Изучение способов определения усилий в фермах.

Цель работы: Изучить способы определения усилий.

Задание: Применить рассмотренные способы определения усилий в стержнях в решении задач.

## 3. Плоские фермы

### 3.1. Классификация ферм

*Фермой* называется стержневая система, остающаяся геометрически неизменяемой после условной замены ее жестких узлов шарнирными. Как правило, фермы используют для перекрытия больших пролетов, когда применение сплошных балок становится экономически невыгодным вследствие неполного использования материала стенки, где напряжения существенно меньше, чем в полках (рис.3.1), и необходимости утолщения вертикальной стенки в связи с возможностью ее выпучивания.

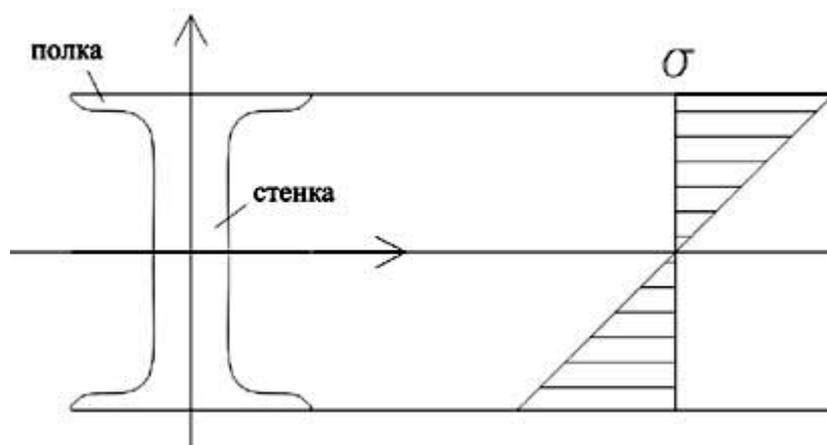


Рис.3.1

В таких случаях сплошную балку заменяют стержневой системой – фермой, элементы которой (стержни) при действии сосредоточенных нагрузок, приложенных в узлах, работают, в основном, на центральное растяжение–сжатие, что дает возможность существенно лучше использовать материал конструкции, так как напряжения распределяются практически равномерно. Ферма легче балки со сплошной стенкой при одинаковых пролете и высоте.

Иногда используются *пространственные фермы*, расчет которых обычно сводится к расчету нескольких плоских ферм.

Расстояние между осями опор фермы называется ее *пролетом*. Стержни, расположенные по внешнему контуру, называются *поясными* и образуют пояса. Вертикальные стержни, соединяющие пояса, называются *стойками*, наклонные – *раскосами*. Стойки и раскосы образуют *решетку* фермы. Расстояние между соседними узлами пояса фермы называется *панелью*.

Классификацию ферм обычно проводят по *пяти признакам*:

1) характеру очертания внешнего контура; 2) типу решетки; 3) типу опирания фермы; 4) назначению; 5) уровню езды.

По *характеру очертания* различают фермы с параллельными поясами и с ломанным, или полигональным расположением поясов (рис.3.2).

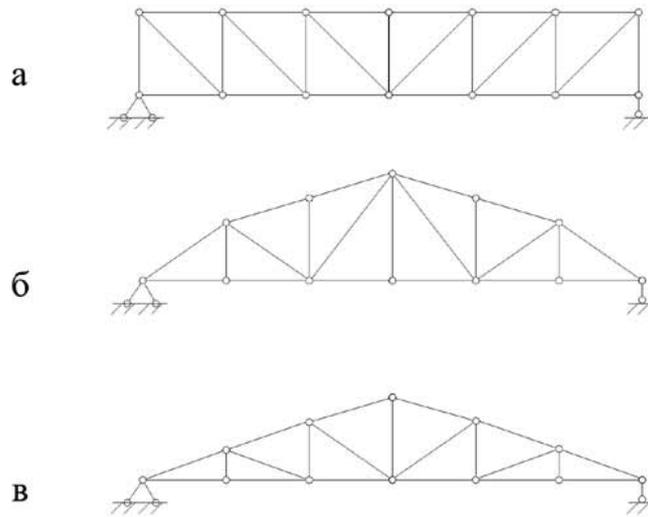


Рис.3.2

По типу решетки различают фермы с треугольной решеткой (рис.3.3,а), с раскосной (рис.3.3,б), с полураскосной (рис.3.3,в), и с ромбической (рис.3.3,г).

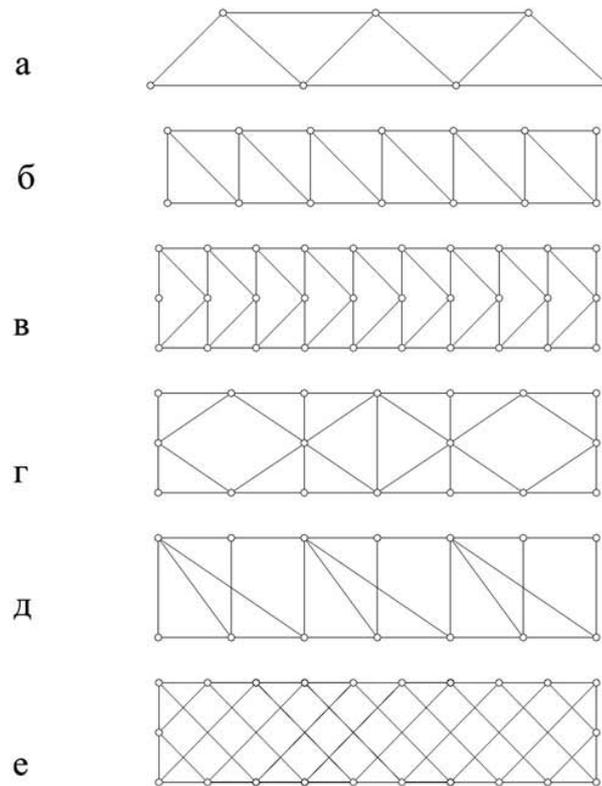


Рис.3.3

По типу опирания фермы могут быть закрепленными с обоих концов – балочными (рис.3.4,а) или арочными (рис.3.4,б,в), консольными (рис.3.4,г), балочно-консольными (рис.3.4,д).

В зависимости от назначения различают фермы стропильные, крановые, башенные, мостовые.

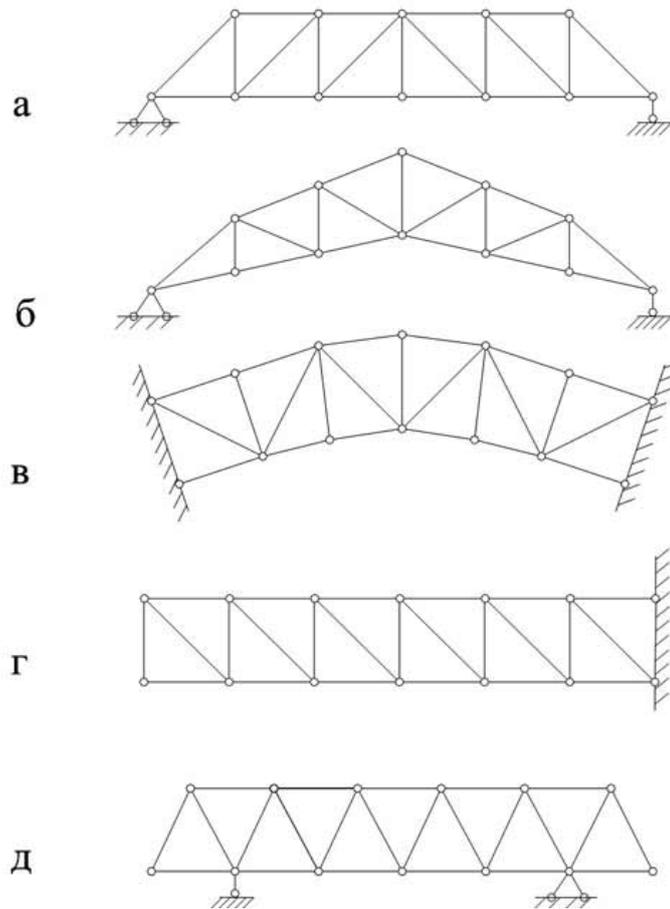


Рис.3.4

Мостовые фермы в зависимости от уровня езды делятся на фермы с ездой понизу, с ездой поверху и с ездой посередине.

### 3.2. Определение усилий в стержнях простейших ферм

*Простейшими* называются фермы, образованные из шарнирного треугольника путем последовательного присоединения узлов, причем, каждого с помощью двух стержней, не лежащих на одной прямой.

Такие фермы всегда будут геометрически неизменяемыми и статически определимыми. Для определения опорных реакций такой фермы можно составить три уравнения равновесия. Внутренние усилия (продольные силы) определяют, выделяя сечениями узлы или отдельные части фермы и рассматривая условия их равновесия под действием внешних нагрузок и усилий в рассеченных стержнях. Если  $K$  - число узлов фермы, то можно составить  $2K-3$  независимых уравнений равновесия. Определение внутренних усилий можно выполнять разными способами: 1) *способом моментной точки*; 2) *способом проекций*; 3) *способом замены стержней* (обычно используется при расчете сложных ферм); 4) *графический способ*.

#### 3.2.1. Способ моментной точки

Этот способ обычно используется в тех случаях, когда удастся провести сечение фермы так, чтобы перерезанными оказались три ее стержня, направления осей которых не пересекаются в одной точке.

Составляя последовательно уравнения сумм моментов всех внешних сил, действующих на отсеченную часть фермы, относительно каждой из моментных точек (точек пересечения осей перерезанных стержней), будем получать всякий раз уравнение с одним неизвестным – усилием в рассеченном стержне, ось которого не проходит через рассматриваемую моментную точку.

При составлении уравнений равновесия все неизвестные усилия в стержнях условно принимаются положительными, то есть растягивающими и, следовательно, направленными от

узлов. Если в результате расчета усилие окажется отрицательным, значит, оно является сжимающим и направленным к узлу.

Усилия в элементах фермы обычно принято обозначать так:

$U_{mn}$  – в элементах нижнего пояса;

$O_{mn}$  – в элементах верхнего пояса;

$D_{mn}$  – усилия в раскосах;

$V_{mn}$  – усилия в стойках;

где  $m, n$  – номера узлов, соединяемых стержнем.

Рассмотрим ферму (рис.3.5,а).

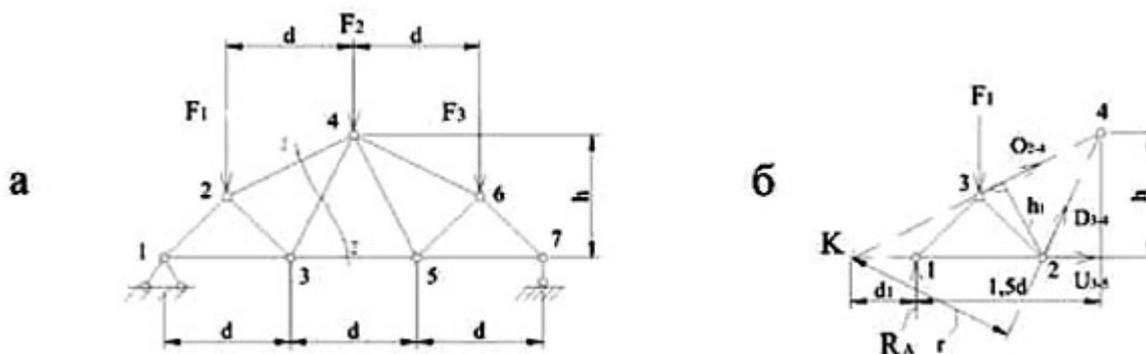


Рис.3.5

Для определения усилий в стержнях 2-4, 3-4, 3-5 разрежем ферму сечением I-I, пересекающим все эти стержни. Как видно (рис.3.5,а), сечение I-I полностью пересекает ферму на две части (“насквозь”), поэтому в литературе иногда встречается иное название способа моментной точки – *способ сквозных сечений*.

Для определения усилия  $U_{3-5}$  составим сумму моментов всех сил, действующих на левую часть фермы, относительно точки пересечения стержней 2-4 и 3-4 – точки 4. Эта точка и является *моментной* при определении усилия  $U_{3-5}$ :

$$\sum M_4^{лев} = 0: R_a \cdot 1,5d - F_1 \cdot d - U_{3-5} \cdot h = 0;$$

$$U_{3-5} = \frac{R_a \cdot 1,5d - F_1 \cdot d}{h} = \frac{M_4^0}{h};$$

где  $M_4^0$  – момент всех сил, приложенных к левой отсеченной части фермы, относительно узла 4, равный изгибающему моменту в обычной шарнирной балке в сечении, соответствующем по расположению моментной точке 4. Отсюда следует *вывод*: усилие в элементе нижнего пояса фермы равно отношению изгибающего (балочного) момента в соответствующем сечении простой балки к плечу (в данном случае -  $h$ ).

При определении усилия в элементе 2-4 моментной будет точка 3 (рис.3.5,б). Запишем сумму моментов всех сил, приложенных к левой отсеченной части, относительно этой точки:

$$\sum M_3^{лев} = 0: R_a \cdot d - F_1 \cdot 0,5d + O_{2-4} \cdot h = 0;$$

$$O_{2-4} = -\frac{R_a \cdot d - F_1 \cdot 0,5d}{h} = -\frac{M_3^0}{h_1}.$$

Так как балочный момент  $M_3^0$  при заданной нагрузке положителен, то усилие  $O_{24} < 0$ , то есть стержень 2-4 сжат.

При определении усилия в раскосе 3-4 моментная точка (точка К) лежит вне контура фермы (рис.3.5,б):

$$\sum M_K^{лев} = 0: R_a \cdot d_1 - F_1(d_1 + 0,5d) + D_{3-4} \cdot r = 0,$$

$$D_{3-4} = \frac{-R_a \cdot d + F_1(d_1 + 0,5d)}{r} = \frac{M_K^0}{r}.$$

Способ моментной точки можно использовать не только при расчете простейших ферм, но и при определении усилий в некоторых стержнях сложных ферм (соответствующие примеры расчета будут рассмотрены ниже).

Можно рекомендовать следующие *пределы применимости способа моментной точки*:

1. Когда удастся провести сечение, рассекающее кроме рассматриваемого стержня любое число стержней, сходящихся в одной общей точке, не лежащей на оси данного стержня (моментная точка).
2. Когда разрез пересекает более трех стержней, не сходящихся в одной точке, если усилия во всех стержнях, кроме трех, известны.
3. Когда можно провести сечения, пересекающие любое число стержней более трех, если при этом каждый из дополнительных (сверх трех) стержней пересекается дважды (при этом выделенные сечением такие стержни будут уравновешены усилиями, положенными по их концам).

### 3.2.2.Способ проекций

Этот способ применяется в двух вариантах:

- 1) рассматривается равновесие отсеченной части фермы, когда два из рассеченных стержней параллельны друг другу; 2)рассматривается равновесие выделенного узла (*способ вырезания узлов*).

Для иллюстрации первого варианта рассмотрим ферму (рис.3.6) и определим усилия в стойке 5-6 и раскосе 6-7.

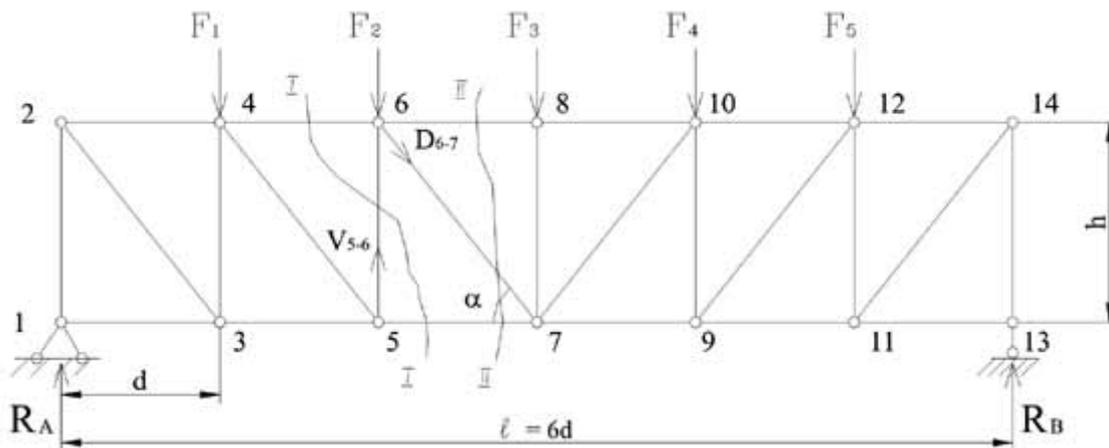


Рис.3.6

Для определения усилия  $V_{5-6}$  разрежем ферму сечением 1-2. Так как стержни 4-5 и 5-7 параллельны друг другу, то моментная точка находится в бесконечности и способ моментной точки неприменим. Составим условие равновесия – сумму проекций всех сил, приложенных к левой отсеченной части, на вертикальную ось:

$$\sum Y = 0: R_a - F_1 + V_{5-6} = 0 \Rightarrow V_{5-6} = -(R_a - F_1) = -Q^0,$$

где  $Q^0$  – балочная поперечная сила.

Для определения усилия  $D_{6-7}$  проведем сечение 2-2. Из рассмотрения левой отсеченной части:

$$\sum Y = 0: R_a - F_1 - F_2 - D_{6-7} \sin \alpha = 0;$$

$$D_{6-7} = \frac{R_a - F_1 - F_2}{\sin \alpha} = \frac{Q^0}{\sin \alpha}.$$

Теперь рассмотрим второй вариант способа проекций – способ вырезания узлов. Применяя его последовательно к каждому узлу, можно определить усилия во всех стержнях фермы, причем, начинать нужно с узла, в котором сходятся два стержня (рис.3.7,а).

Определим усилия в стержнях 1-2, 1-3, 2-3, 3-5. Вырежем узел 1 и рассмотрим условия его равновесия (рис.3.7,б).

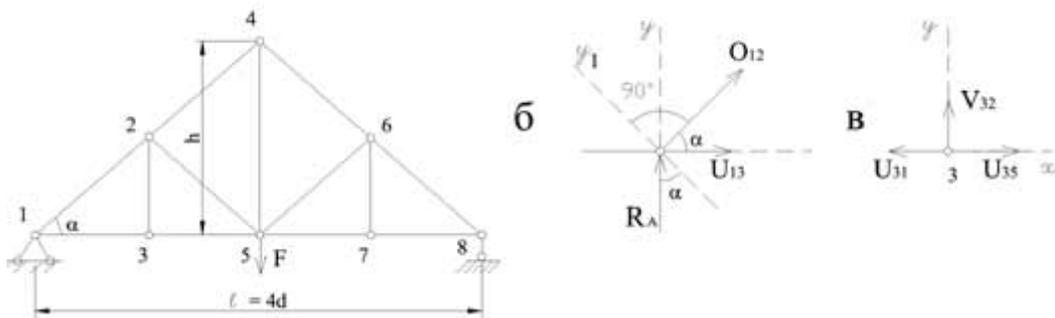


Рис.3.7

Для определения усилия  $O_{12}$  спроектируем все силы на вертикальную ось:

$$\sum Y = 0: R_a + O_{12} \sin \alpha = 0 \Rightarrow O_{12} = -\frac{R_a}{\sin \alpha}.$$

Для определения усилия  $U_{13}$  проведем вспомогательную ось  $y$ , перпендикулярную направлению  $O_{12}$ :

$$\sum Y_1 = 0: R_a \cos \alpha - U_{13} \sin \alpha = 0 \Rightarrow U_{13} = R_a \operatorname{ctg} \alpha.$$

Усилие  $U_{13}$  можно определить и из условия  $\sum X = 0$ , но тогда оно будет выражено через найденное ранее усилие  $O_{12}$ :

$$\sum X = 0: U_{13} + O_{12} \cos \alpha = 0 \Rightarrow U_{13} = -O_{12} \cos \alpha.$$

Для определения усилий в стержнях 2-3 и 3-5 вырежем узел 3 (рис.3.7,в):

$$\sum X = 0: -U_{13} + U_{35} = 0 \Rightarrow U_{35} = U_{13};$$

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

Последний результат позволяет сделать вывод о том, что если в узле сходятся три стержня, два из которых лежат на одной прямой то усилия в этих двух стержнях при отсутствии в узле внешней нагрузки равны друг другу, а усилие в третьем стержне при любом его расположении (стойка, раскос) равно нулю.

Если продолжить определение усилий в стержнях фермах, вырезав, например, узел 2 (рис.3,7,а), то они будут определяться через вычисленные ранее усилия, следовательно, при расчете фермы способом вырезания узлов усилия в некоторых стержнях можно найти, только определив предварительно усилия в других стержнях, а это означает накопление погрешностей в процессе расчета.

В заключение заметим, что если к углу, в котором сходятся два стержня, не лежащие на одной прямой, не приложена внешняя нагрузка, то усилия в обоих стержнях равны нулю. Такие стержни обычно называются нулевыми.

### 3.2.3. Способ замены стержней

При определении усилий в сложных фермах, как правило, приходится решать системы уравнений. Но в некоторых случаях сложную ферму можно преобразовать в простейшую или в систему, при расчёте которой не требуется совместного решения уравнений. Для этого в исходной системе удаляются определенные стержни и вводятся другие – *заменяющие*. Так как в заданной системе заменяющих стержней нет, то для определения усилий можно составить дополнительные уравнения, выражающие равенство нулю усилий в каждом заменяющем стержне. Такой способ расчета называется *способом замены стержней*.

Рассмотрим сложную ферму (рис.3.8,а). При использовании для определения усилий в стержнях такой фермы способа моментной точки или способа проекций придётся решать системы уравнений.

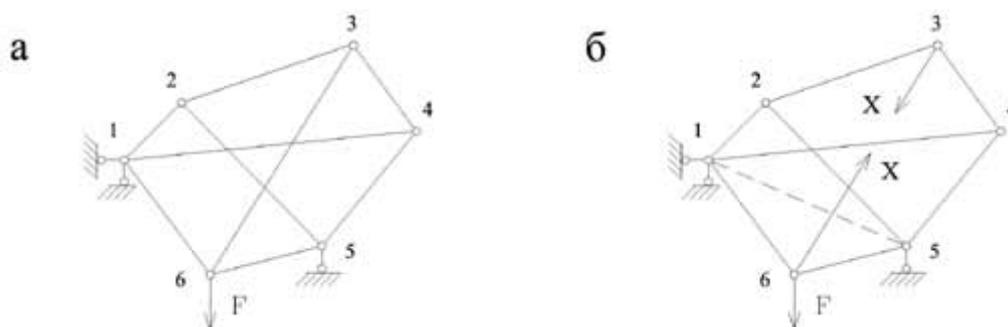


Рис.3.8

Заменяем стержень 6-3 стержнем 1-5. Такая замена преобразует ферму в простейшую и не является единственно возможной. Легко убедиться, что полученная система (рис.3.8,б) является геометрически неизменяемой.

Для определения усилий в преобразованной системе можно использовать один из рассмотренных ранее способов, например, способ вырезания узлов. Если силы  $X$  в *заменяемом* стержне 3-6 подобрать так, что усилие в *заменяющем* стержне 1-5 будет равно нулю, то обе системы (рис.3.8,а,б) будут эквивалентны, а усилия в их соответствующих стержнях – одинаковыми.

На основании принципа независимости действия сил усилие в любом  $i$ -ом элементе (как заданной, так и преобразованной системы) может быть найдено по формуле

$$N_i = N_{iF} + \overline{N_{iX}} X,$$

где  $N_{iF}$  – усилие в преобразованной системе от заданной нагрузки,  $\overline{N_{iX}}$  – усилие от единичной силы  $\overline{X} = 1$ .

Вычисленное по этой формуле усилие  $N_e$  в заменяющем стержне должно быть равно нулю, так как в заданной системе этого стержня нет:

$$N_e = N_{eF} + \overline{N_{eX}} X = 0,$$

откуда

$$X = -\frac{N_{eF}}{\overline{N_{eX}}}.$$

По формуле (3.1) с учетом (3.2) можно определить усилия во всех элементах системы.

В более сложных случаях производится замена двух и более стержней, что приводит к решению системы уравнений:



повторяются в обоих сечениях. Ниже будет рассмотрен пример определения усилий способом совместных сечений.

### Графический способ определения усилий (диаграмма Максвелла-Кремоны)

Этот способ основан на графическом приеме разложения силы на два направления и состоит в следующем: буквами или цифрами обозначают полигоны (поля), т.е. площади, ограниченные со всех сторон стержнями или примыкающие к наружному контуру фермы и отделенные друг от друга внешними силами, включая опорные реакции (рис.3.10).

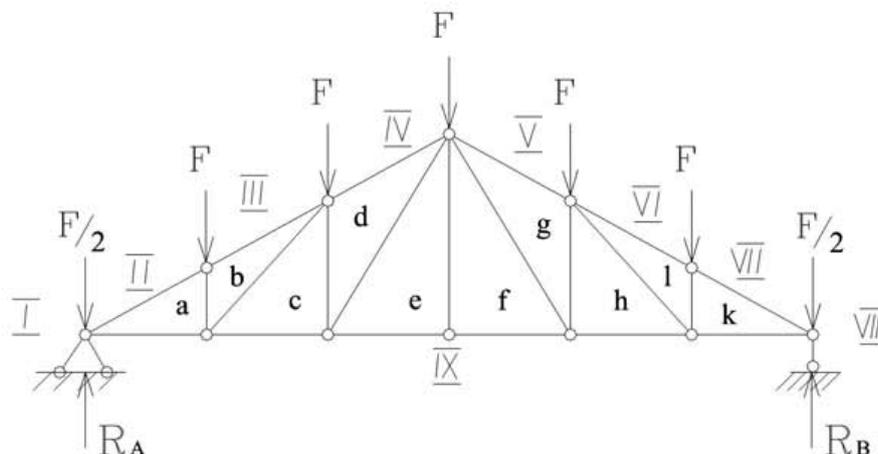


Рис.3.10

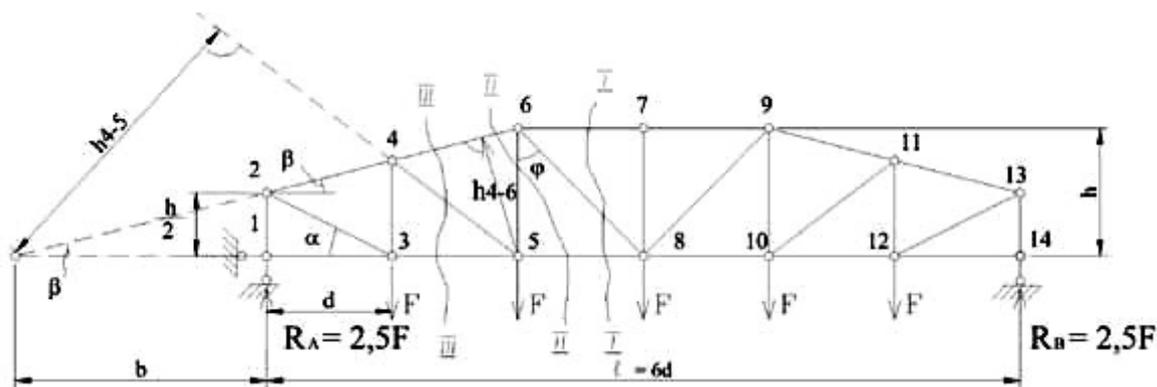
В результате каждое внутреннее усилие и каждая внешняя сила обозначаются двумя значками, соответствующими названиям тех полигонов, границей которых эта внешняя сила или усилие является. Строят многоугольник сил на внешних силах, включая опорные реакции. Каждая из сил этого многоугольника обозначается буквами или цифрами, поставленными на ее концах, при этом сохраняется направление сил.

Затем выбирают узел, в котором сходятся два стержня. Приложенную в узле силу раскладывают по направлениям этих стержней, в результате чего определяют значения и направления действующих в них усилий (направления определяют растяжение–сжатие). Разложить силы на две составляющие можно построением силового треугольника. Такой треугольник должен быть замкнут, так как узел, для которого он строится, находится в равновесии. Если к узлу приложены две и более известных сил, то строят многоугольник равновесия известных и неизвестных сил. После этого переходят к следующему узлу и для него проводят аналогичные построения. Таким образом определяют усилия во всех стержнях фермы.

### 3.2.5. Примеры расчёта ферм на неподвижную нагрузку

Покажем применение рассмотренных выше способов определения усилий в стержнях ферм на конкретных примерах.

**Пример 3.1.** Определить усилия в стержнях фермы (рис.3.11), используя способ вырезания узлов и способ моментной точки ( $F = 50\text{кН}$ ;  $d = h = 1\text{м}$ ).



**Решение.**

Начнём с определения опорных реакций.

Так как нагрузка симметричная, то очевидно

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} \sum F = \frac{5F}{2} = 125 \text{ кН}.$$

Вырежем узел 1 (рис.3.12,а). Из уравнения проекций на вертикальную ось находим:

$$\sum Y = 0: V_{12} + R_A = 0 \Rightarrow V_{12} = -R_A = -125 \text{ кН}.$$

Из уравнения проекций на горизонтальную ось следует, что  $U_{13} = 0$ , т.е. стержень 1-3 является нулевым.

Вырежем узел 2 (рис.3.12,б) и проведём вспомогательные оси  $Z_{23}$ , перпендикулярную стержню 2-3, и  $Z_{24}$ , перпендикулярную стержню 2-4.

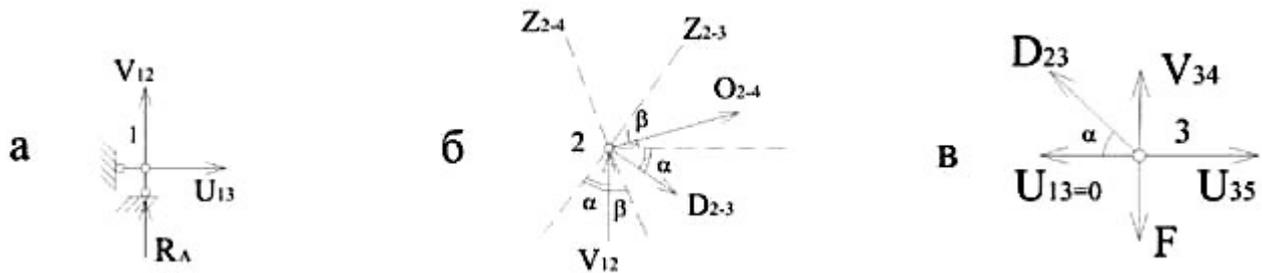


Рис.3.12

$$\sum Z_{23} = 0: V_{12} \cos \alpha + O_{24} \sin(\alpha + \beta) = 0 \Rightarrow O_{24} = -\frac{V_{12} \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} = -\frac{125 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}.$$

Решая сугубо геометрическую задачу, находим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0.5h}{d} = \frac{1}{2} \Rightarrow \alpha = 26.56^\circ; \sin \alpha = 0.45; \cos \alpha = 0.89;$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{0.5h}{2d} = \frac{1}{4} \Rightarrow \beta = 14.04^\circ; \sin \beta = 0.24; \cos \beta = 0.97;$$

$$\alpha + \beta = 40.6^\circ; \sin(\alpha + \beta) = 0.65.$$

$$\sum Z_{24} = 0: V_{12} \cos \beta + D_{24} \sin(\alpha + \beta) = 0 \Rightarrow D_{24} = \frac{V_{12} \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{125 \cdot 0.97}{0.65} = 186.54 \text{ кН}.$$

$$O_{24} = -\frac{125 \cdot 0.89}{0.65} = -171.15 \text{ кН}.$$

Теперь вырежем узел 3 (рис.3.12,в). Проектируя все силы на ось у, найдём усилие  $V_{34}$ :

$$\sum Y = 0: D_{23} \sin \alpha + V_{34} - F = 0 \Rightarrow V_{34} = F - D_{23} \sin \alpha = 50 - 186.54 \cdot 0.45 = 33.94 \text{ кН},$$

а из суммы проекций на ось X - усилие  $U_{35}$ :

$$\sum X = 0: -D_{23} \cos \alpha + U_{35} = 0 \Rightarrow U_{35} = D_{23} \cos \alpha = 186.54 \cdot 0.89 = 166 \text{ кН}.$$

Последовательно вырезая узлы 4, 5, ..., 14, можно определить усилия во всех стержнях фермы. Причём, при вырезании узла 13 окажется, что два уравнения равновесия будут содержать одно неизвестное усилие  $V_{13-14}$ , поэтому одно из уравнений можно использовать для проверки. А при вырезании узла 14 оба уравнения равновесия будут проверочными.

Из приведенных выше вычислений следует, что способ вырезания узлов приводит к накоплению погрешностей, так как последующее усилие вычисляется через предыдущее.

Этого недостатка можно избежать, если использовать для расчёта способ моментной точки. Определим этим способом усилия в стержнях 6-7, 6-8, 5-8, 5-6, 4-6, 4-5, (рис.3.11).

Проведём сечение I-I и определим из равновесия левой части:

$$\sum M_6^{лев} = 0: R_A \cdot 2d - F \cdot d - U_{5-8} \cdot h = 0;$$

$$U_{5-8} = \frac{4Fd}{h} = 200 \text{кН}.$$

$$\sum M_8^{лев} = 0: R_A \cdot 3d - F \cdot 2d - F \cdot d + O_{6-7} \cdot h = 0;$$

Усилие  $D_{6-8}$  найдём способом проекций:

$$\sum Y^{лев} = 0: R_A - F - F - D_{6-8} \cos \varphi = 0$$

( $\varphi = 45^\circ$ , так как  $h = d$ );

$$D_{6-8} = \frac{0.5F}{\cos 45^\circ} = 35.36 \text{кН}.$$

Проведём сечение II-II:

$$\sum M_k^{лев} = 0: R_A \cdot b - F \cdot (b + 2d) - F(b + d) + V_{5-6}(b + 2d) = 0.$$

Из геометрических соображений:

$$b + 2d = h \operatorname{ctg} \beta = 1 \cdot 4 = 4 \text{м}, \quad b = 4 - 2d = 2 \text{м},$$

тогда  $V_{5-6} = \frac{2F}{4} = 25 \text{кН}$ .

$$\sum M_5^{лев} = 0: R_A \cdot 2d - F \cdot d + O_{4-6} \cdot h_{4-6} = 0,$$

$$h_{4-6} = (b + 2d) \sin \beta = 4 \cdot 0.24 = 0.96 \text{м}, \quad O_{4-6} = -\frac{4F}{0.96} = -208.3 \text{кН}.$$

Для определения усилия  $D_{4-5}$  проводим сечение III-III:

$$\sum M_k^{лев} = 0: -R_A \cdot b + F(b + d) + D_{4-5} h_{4-5} = 0;$$

$h_{4-5} = 2,4\text{м}$  (рекомендуем убедиться в этом самостоятельно!) и тогда

$$D_{4-5} = \frac{2F}{h_{4-5}} = 41,67\text{kH}$$

**Пример 3.2.** Определить усилия в стержнях фермы (рис.3.13), используя способ совместных сечений ( $F=100\text{kH}$ ).

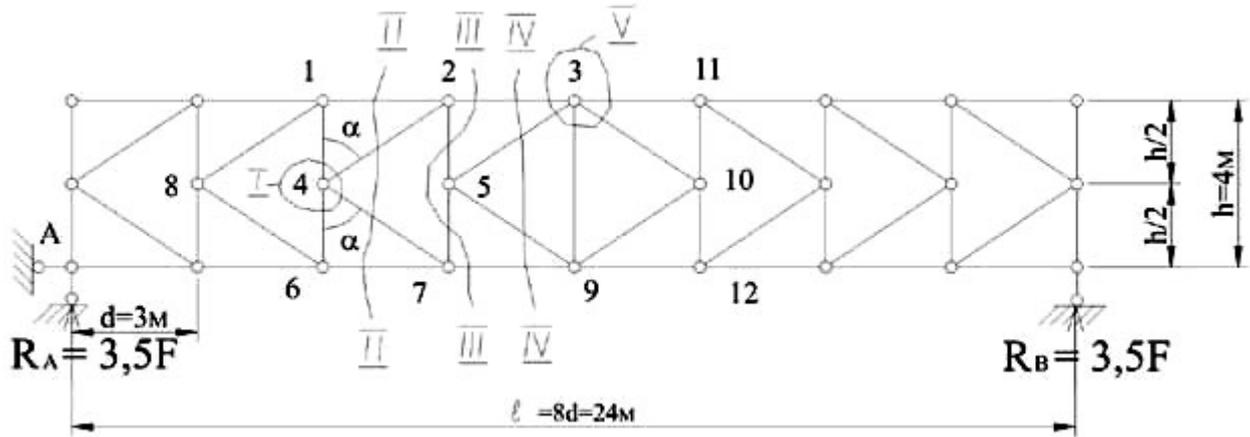


Рис.3.13

**Решение.**

Вырежем узел 4 круговым сечением I (рис.3.13) и составим уравнение проекций на горизонтальную ось (рис.3.14,а):

$$\sum X = 0: D_{4-2} \sin \alpha + D_{4-7} \sin \alpha = 0 \Rightarrow D_{4-2} = -D_{4-7}$$

Теперь разрежем ферму сечением II-II и, рассматривая равновесие левой части, составим сумму проекций всех сил на вертикальную ось:

$$\sum Y^{лев} = 0: D_{4-2} \cos \alpha - D_{4-7} \cos \alpha + 3,5F - F - F = 0;$$

$$D_{4-7} = \frac{0,75F}{\cos \alpha} = \frac{0,75 \cdot 100}{0,555} = 135\text{kH}$$

где  $\alpha = 56,3^\circ$ , что легко определить из геометрических соображений.

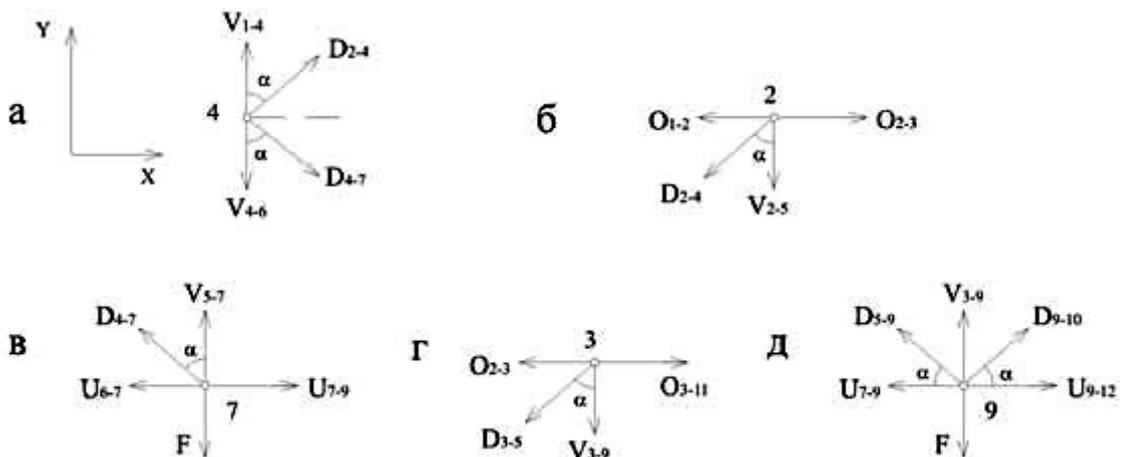


Рис. 3.14

Вырезая узел 2 (рис.3.14,б) и проектируя все силы на вертикальную ось, определим усилие в стержне 2-5, а вырезая узел 7 (рис.3.14,в) – усилие в стержне 5-7:

$$\sum Y_2 = 0: \quad -D_{2-4} \cos \alpha - V_{2-5} = 0 \Rightarrow V_{2-5} = 0,75F = 75kH;$$

$$\sum Y_7 = 0: \quad D_{4-7} \cos \alpha + V_{5-7} - F = 0 \Rightarrow V_{5-7} = 0,25F = 25kH.$$

Для определения усилий в стержнях 2-3 и 7-9 проведем сечение III-III (рис.3.13) и составим суммы моментов левых сил:

$$\sum M_7^{лев} = 0: \quad 3,5F \cdot 3d - F \cdot 2d - Fd + O_{2-3}h = 0 \Rightarrow O_{2-3} = -\frac{7,5Fd}{h} = -1000kH,$$

$$\sum M_2^{лев} = 0: \quad 3,5F \cdot 3d - F \cdot 2d - Fd - U_{7-9}h = 0 \Rightarrow U_{7-9} = \frac{7,5Fd}{h} = 1000kH$$

Для определения усилия в стержне 3-9 вырежем круговым сечением узел 5 (рис.3.13) и из уравнения проекций на горизонтальную ось найдем  $D_{5-3} = -D_{5-9}$ , а затем проведем сечение IV-IV, отбросим правую часть, а для левой части составим уравнение проекций всех сил на вертикальную ось:

$$\sum Y^{лев} = 0: \quad D_{5-3} \cos \alpha - D_{5-9} \cos \alpha + 3,5F - 3F = 0,$$

откуда

$$D_{5-3} = -\frac{0,25F}{\cos \alpha} = -45kH; \quad D_{5-9} = 45kH$$

Исходя из симметрии фермы и нагрузки, усилия в симметрично расположенных стержнях 3-5 и 3-10, а также 5-9 и 9-10 равны. Тогда, вырезая круговым сечением V узел 3, из суммы проекций на вертикальную ось (рис. 3.14,г) найдем:

$$\sum Y = 0: \quad -D_{3-5} \cos \alpha - D_{3-10} \cos \alpha - V_{3-9} = 0 \Rightarrow V_{3-9} = 0,5F = 50kH$$

Этот же результат можно получить, если вырезать узел 9 и составить уравнение проекций всех сил на ось Y (рис.3.14,д).

**Пример 3.3.** Определить усилия в стержнях фермы (рис.3.15), используя способ замкнутых сечений.

**Решение.**

проведем замкнутое сечение, охватывающее узлы 1, 4, 5 (рис.3.15), и рассмотрим равновесие части фермы, расположенной внутри этого сечения. При этом уравнения сумм моментов

Определив из условий равновесия ( $\sum X = 0, \sum M_a = 0, \sum M_b = 0$ ) опорные реакции,

составим относительно точек  $m$  и  $n$ , лежащих на пересечении стержня 3-4 со стержнями 1-2 и 5-6 соответственно. Усилия в стержнях 3-6 и 2-6 в уравнения равновесия не войдут, так как эти стержни дважды пересекаются замкнутым сечением и усилия в них взаимно уравновешиваются.

$$\sum M_m = 0: 1,5F2a + V_{5-6}3a + F2a = 0: \quad V_{5-6} = -5F/3;$$

$$\sum M_n = 0: 0,5F3a + 1,5F2a - Fa + V_{1-2} = 0: \quad V_{1-2} = -7F/6;$$

$$\sum X = 0: -1,5F - O_{3-4} = 0: \quad O_{3-4} = -1,5F.$$

Используя полученные результаты, способом вырезания узлов можно определить усилия во всех остальных стержнях фермы.

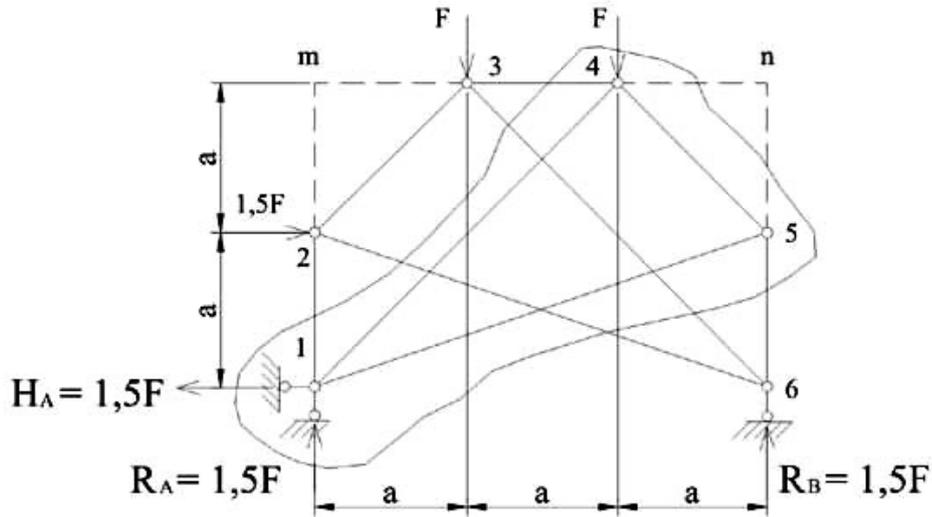


Рис.3.15

**Пример 3.4.** Определить усилия в стержнях фермы (рис.3.16,а) способом замены стержней.

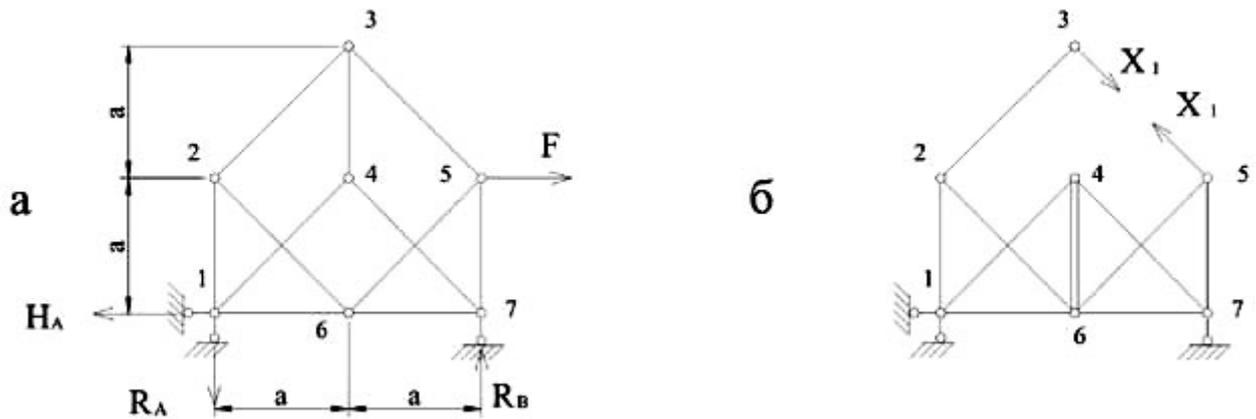


Рис.3.16

**Решение.**

Отбросим стержень 3-5, заменив его действие силой  $X_1$ , и введем заменяющий стержень 4-6 (рис. 3.16,а). Усилия в стержнях получившейся таким образом фермы можно определить способом вырезания узлов.

Опорные реакции от внешней нагрузки (рис.3.16,б):

$$H_A = F; R_A = 0,5F; R_B = 0,5F.$$

Опорные реакции от  $\bar{X}_1$ :

$$H_A' = R_A' = R_B' = 0.$$

Результаты определения усилий в стержнях заменяющей фермы (рис.3.16,б) от внешней нагрузки ( $N_{iF}$ ), и от единичной силы  $\bar{X}_1 = 1 (\bar{N}_i)$  и значения усилий в заданной ферме ( $N_i$ ) приведены в табл.3.1, причем

$$N_i = N_{iF} + \bar{N}_i X_1.$$

Для определения  $X_1$  используем уравнение:

$$A_{11} X_1 + A_{1F} = 0,$$

где из таблицы находим (стержень 4-6):

$$A_{1F} = -F; A_{11} = 1,414$$

и тогда

$$X_1 = 0,707F.$$

Таблица 3.1

Номер стержня	$N_{iF}$	$\bar{M}_i$	$\bar{M}X_1$	$N_i$	$l_i$	$N_i l_i$
3 – 2	0	1	0,707F	0,707F	1,414a	aF
3 – 4	0	-1,414	-F	-F	a	-aF
2 – 1	0	1,414	F	F	a	aF
2 – 6	0	-1	-0,707F	-0,707F	1,414a	-aF
1 – 4	0,707F	-2	-1,414F	-0,707F	1,414a	-aF
1 – 6	0,5F	1,414	F	1,5F	a	1,5aF
4 – 7	0,707F	-2	-1,414F	-0,707F	1,414a	-aF
4 – 6	-F	1,414	F	0	a	0
5 – 6	1,414F	-1	-0,707F	0,707F	1,414a	aF
5 – 7	-F	1,414	F	0	a	0
6 – 7	-0,5F	1,414	F	0,5F	a	0,5aF
3 – 5	0	1	0,707F	0,707F	1,414a	aF

Для проверки правильности выполненного расчета используем условие:

$$\sum N_i l_i = \sum F_x x + \sum F_y y,$$

где  $N_i$  – расчетная величина усилия в стержне;

$l_i$  – длина стержня;

$x, y$  – координаты точек приложения нагрузки;

$F_x, F_y$  – проекции нагрузки, включая опорные реакции, на оси  $x$  и  $y$ .

Суммируя цифры последнего столбца табл.3.1, получим:  $\sum N_i l_i = 2aF$ .

Проекция нагрузки  $F$  и ее координаты:  $F_x = F, F_y = 0, x = 2a, y = a$ .

Проекция опорной реакции  $R_A$  и ее координаты:  $F_x = -F, F_y = -0,5F, x = 0, y = 0$ .

Проекция опорной реакции  $R_B$  и ее координаты:  $F_x = 0, F_y = 0,5F, x = 2a, y = 0$ .

$$\sum F_x x + \sum F_y y = F \cdot 2a - F \cdot 0 + 0 \cdot 2a + 0 \cdot a - 0,5F \cdot 0 + 0,5F \cdot 0 = 2aF,$$

что подтверждает правильность расчета.

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. Фермы. Особенности работы элементов, составляющих ферму.
2. Классификация ферм по очертанию поясов, типу решётки, условиям опирания, уровню езды.

## Практическое занятие №4.

Тема: Построение линий влияния усилий в стержнях простейших ферм.

Цель работы: Изучить линии влияния усилий в стержнях простейших ферм.

Задание: По заданным характеристикам построить линии влияния усилий в стержнях фермы.

### 4.1 Линии влияния усилий в стержнях простейших ферм

Нагрузки на ферму передаются в узлах, следовательно, здесь применима методика построения линий влияния для балок при узловой передаче нагрузки, изложенная ранее. При этом используются те же приёмы, что и при определении усилий в стержнях фермы – способ моментной точки, способ проекций и так далее.

#### Способ моментной точки

Построим линию влияния усилия  $U_{7-9}$  в стержне нижнего пояса фермы (рис.4.1) при движении груза  $F=1$  по верхнему поясу. Проведём разрез I-I. Когда груз  $F=1$  находится правее узла 8, удобнее рассматривать равновесие левой отсечённой части фермы. Составим уравнение суммы моментов всех сил, действующих на левую часть фермы, относительно моментной точки 6:

$$\sum M_6^{\text{лев}} = 0: R_A \cdot 3d - U_{7-9} \cdot h = 0 \Rightarrow U_{7-9} = 3R_A d / h,$$

следовательно, линию влияния усилия  $U_{7-9}$  при положении груза  $F=1$  правее узла 8 можно получить, умножая ординаты линии влияния “балочной” опорной реакции  $R_A$  на величину  $3d/h$ . Откладывая на левой опорной вертикали вверх от оси  $3d/h$  и соединяя эту точку с нулём на правой опорной вертикали, получим *правую прямую* искомой линии влияния.

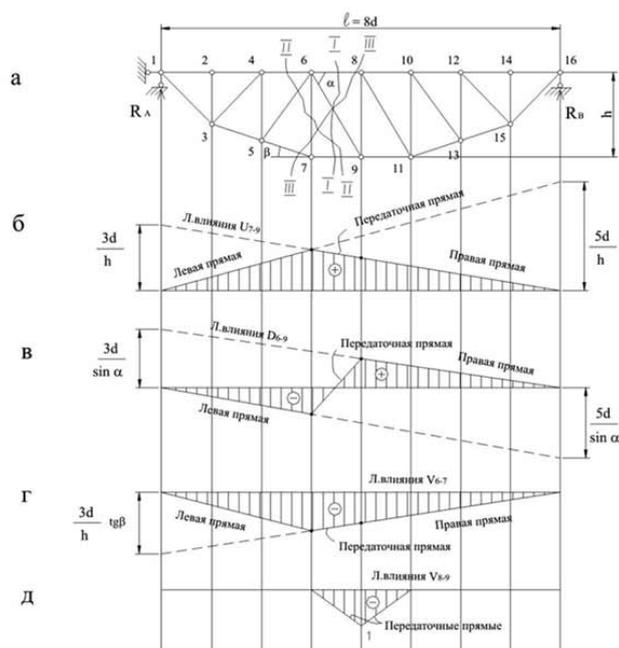


Рис.4.1

Если груз  $F=1$  расположен левее узла 6, то из условия равновесия правой части фермы относительно той же моментной точки 6 получим:

$$\sum M_6^{прае} = 0: R_B \cdot 5d - U_{7-9} \cdot h = 0 \Rightarrow U_{7-9} = 5R_B d / h,$$

что позволяет построить левую прямую линии влияния усилия  $U_{7-9}$ , умножая ординаты линии влияния “балочной” опорной реакции  $R_B$  на множитель  $5d/h$  (рис.4.1,б).

В соответствии с рассмотренным положением груза  $F=1$ , на правую прямую сносим узлы 8, 10, 12, 14 и 16, а на левую прямую – узлы 1, 2, 4 и 6. Как видно (рис.4,1,б), левая и правая прямые линии влияния пересекаются под моментной точкой (точка б).

*Передаточная прямая*, соответствующая движению груза  $F=1$  между узлами 6 и 8, в данном случае совпадает с правой прямой линии влияния.

Сформулируем в виде алгоритма рассмотренный выше порядок построения линии влияния способом моментной точки:

1. При построении правой прямой откладываем на левой опорной вертикали ординату  $a/h$ , где  $a$  - расстояние от моментной точки до левой опорной вертикали,  $h$  - плечо определяемого усилия относительно моментной точки.
2. Вершину опорной ординаты соединяем с нулевой точкой на правой опорной вертикали и на полученную правую прямую сносим правые узлы фермы.
3. На правую прямую сносим моментную точку, соединяя которую с нулём на левой опорной вертикали, проводим левую прямую линии влияния.
4. На левую прямую сносим левые узлы фермы.
5. Вершины узловых ординат рассеченной панели соединяем передаточной прямой.

### Способ проекций

Применим этот способ для построения линии влияния усилия  $D_{6-9}$  в раскосе фермы (рис.4,1,в), по-прежнему считая, что груз  $F=1$  движется по верхнему поясу.

Когда движение происходит правее узла 8, из рассмотрения равновесия левой части фермы имеем:

$$\sum Y = 0: R_A - D_{6-9} \sin \alpha = 0 \Rightarrow D_{6-9} = R_A / \sin \alpha$$

и для построения правой прямой откладываем на левой опорной вертикали (вверх от оси) ординату  $1/\sin \alpha$ , которую соединяем с нулём на правой опорной вертикали, перенося на неё узлы 8, 10, 12, 14, 16.

При расположении единичного груза левее узла 6 рассматриваем равновесие правой части фермы:  $\sum Y = 0: R_B + D_{6-9} \sin \alpha = 0 \Rightarrow D_{6-9} = -R_B / \sin \alpha$ .

Для построения левой прямой откладываем на правой опорной вертикали (вниз от оси) ординату  $1/\sin \alpha$  и соединяем ее с нулем на левой опорной вертикали. На полученную прямую сносим узлы 1, 2, 4, 6. Вершины узловых ординат рассеченной панели соединяем передаточной прямой (рис.4.1,в).

Положительные и отрицательные участки линии влияния  $D_{6-9}$  свидетельствуют о том, что при движении груза по ферме стержень 6-9 может быть как растянут, так и сжат.

### Способ вырезания узлов

Построим линию влияния усилия  $V_{6-7}$  в стойке.

Способ моментной точки неприменим, так как любое требуемое сечение (II-II или III-III, рис.4.1,а) разрезает четыре стержня.

Вырежем узел 7 (рис.4.2,а).



Рис.4.2

Составим для узла 7 уравнение равновесия в виде суммы проекций всех сил на вертикальную ось:

$$\sum Y = 0: V_{6-7} + U_{7-5} \sin \beta = 0 \Rightarrow V_{6-7} = -U_{7-5} \sin \beta.$$

Так как груз движется по верхнему поясу фермы и непосредственно к узлу 7 не прикладывается, то получившаяся зависимость между  $V_{6-7}$  и  $U_{7-5}$  сохраняется при любом положении груза.

Усилие  $U_{7-5}$  неизвестно и для его определения составим еще одно уравнение равновесия – сумму проекций всех действующих на узел 7 сил на горизонтальную ось:

$$\sum X = 0: -U_{7-5} \cos \beta + U_{7-9} = 0 \Rightarrow U_{7-5} = U_{7-9} / \cos \beta$$

и тогда

$$V_{6-7} = -U_{7-5} \sin \beta = -U_{7-9} \operatorname{tg} \beta,$$

следовательно, линию влияния  $V_{6-7}$  можно получить из построенной выше способом моментной точки линии влияния  $U_{7-9}$  умножением ординат последней на величину  $(-\operatorname{tg} \beta)$  (рис.4.1,г).

Построим этим же способом линию влияния  $V_{8-9}$ . Вырезая узел 8 (рис.4.2,б), из условия его равновесия  $\sum Y = 0$  получим  $V_{8-9} = 0$  при нагрузке в любом узле, кроме 8, и  $V_{8-9} = -F = -1$  при нагрузке в узле 8, следовательно, линия влияния  $V_{8-9}$  имеет вид треугольника (рис.4.1,д), причем стойка 8-9 работает только на сжатие.

### Примеры построения линий влияния усилий в фермах

**Пример 4.1.** Построить линии влияния усилий в стержнях 4-5, 9-10, 3-10, 3-8, 1-8 фермы (рис.4.3,а) при движении по нижнему поясу.

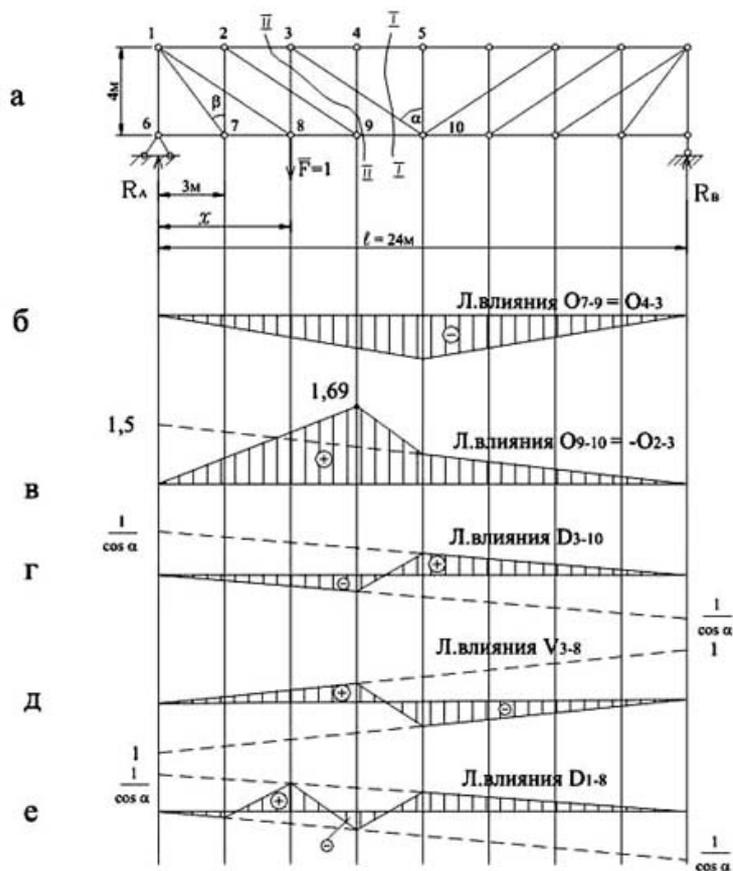


Рис.4.3

## Решение

Проведем сечение I-I (рис.4.3,а). Для построения линии влияния усилия  $O_{4-5}$ , используя способ моментной точки, составим уравнение равновесия относительно узла 10, рассматривая левую (или правую) часть фермы, тогда  $O_{4-5} = -M_{10}^0 / 4$ , т.е. линию влияния  $O_{4-5}$  получим из линии влияния момента  $M_{10}$  для шарнирной балки зеркальным отображением последней с одновременным уменьшением всех ее ординат в четыре раза (рис.4.3,б).

Аналогичным образом получим уравнение линии влияния  $U_{9-10} = M_3^0 / 4$ , левая ветвь будет продолжаться до проекции узла 9, правая - до проекции узла 10, а в пределах разрезанной сечением I-I панели 9-10 пройдет передаточная прямая (рис.4.3,в).

Проведем сечение II-II. Используя способ проекций, из суммы проекций на горизонтальную ось получим  $O_{2-3} = -U_{9-10}$ .

Для построения линии влияния  $D_{3-10}$  составим уравнение равновесия  $\sum Y = 0$ . Из равновесия левой части при положении груза  $F=1$  справа от сечения I-I получим уравнение правой ветви линии влияния  $D_{3-10} = R_A / \cos \alpha$ , а из равновесия правой части получим уравнение левой ветви линии влияния (груз  $F=1$  слева от сечения I-I):  $D_{3-10} = -R_B / \cos \alpha$ . В пределах разрезанной панели пройдет передаточная прямая (рис.4.3,г).

Используя способ вырезания узлов, рассмотрим узел 3. Из суммы проекций на вертикальную ось следует, что  $V_{3-8} = -D_{3-10} \cdot \cos \alpha$ , тогда уравнение левой ветви линии влияния (левее узла 9) будет  $V_{3-8} = R_B = x/l$ , а правой ветви -  $V_{3-8} = -R_A = -(l-x)/l$ . Эти ветви соединим передаточной прямой под панелью 9-10 (рис.4.3,д).

Применяя тот же способ, вырежем узел 8 и составим уравнение равновесия  $\sum Y = 0$ . Если груз  $F=1$  левее узла 7 или правее узла 9, то  $D_{1-8} = -V_{3-8} \cdot \cos \alpha$ , а если груз в узле 8, то  $D_{1-8} = (1 - V_{3-8}) / \cos \alpha$  (рис.4.3,е).

**Пример 4.2.** Построить линии влияния усилий в стержнях 1-10, 2-3, 8-9, 9-10 фермы (рис.4.4,а) при движении груза по нижнему поясу.

## Решение

Начнем с линий влияния опорных реакций. Их уравнения:  $R_A=1$ ;  $H_A=H_B=x/h$  (рис.4.4,б,в).

Проведем сечение I - I и будем рассматривать равновесие правой части фермы, в которую не попадают уравнений равновесия при положении груза  $\bar{F} = 1$  в этом узле:

$2d/r_{2-3}$  - для линий влияния  $O_{1-2} = O_{2-3} = O_{3-4}$ ;

$-4d/h$  - для линии влияния опоры.

Для стержней 2-3, 8-9, 1-8 моментными точками будут узлы 8,1 и точка К соответственно. Левые ветви линий влияния усилий в этих стержнях будут нулевыми, а правые ветви пересекаются с левыми под моментными точками. Ординаты под узлом б определим из  $U_{8,9}$ ;

$b/r_{1-8}$  - для линии влияния  $D_{1-8}$ (рис.4.4,г,д,е).

Вырезая узел 10, из уравнения равновесия  $\sum X=0$  получим для усилия в стержне 9-10:  $U_{9-10} = -H_a = -x/h$  (рис.4.4,в), а из уравнения  $\sum Y=0$  для усилия в стержне 1-10 получим  $V_{1-10} = -1$ , что справедливо для точек правее узла 9 (пунктир на рис.4.4,б).

Вырезая узел 9, из уравнения равновесия  $\sum X=0$  получим  $D_{1-9}=0$  при положении груза в узлах 8,10 и правее узла 8 и  $D_{1-9}=1/\cos \alpha$  при положении груза в узле 9 (рис.4.4,ж).

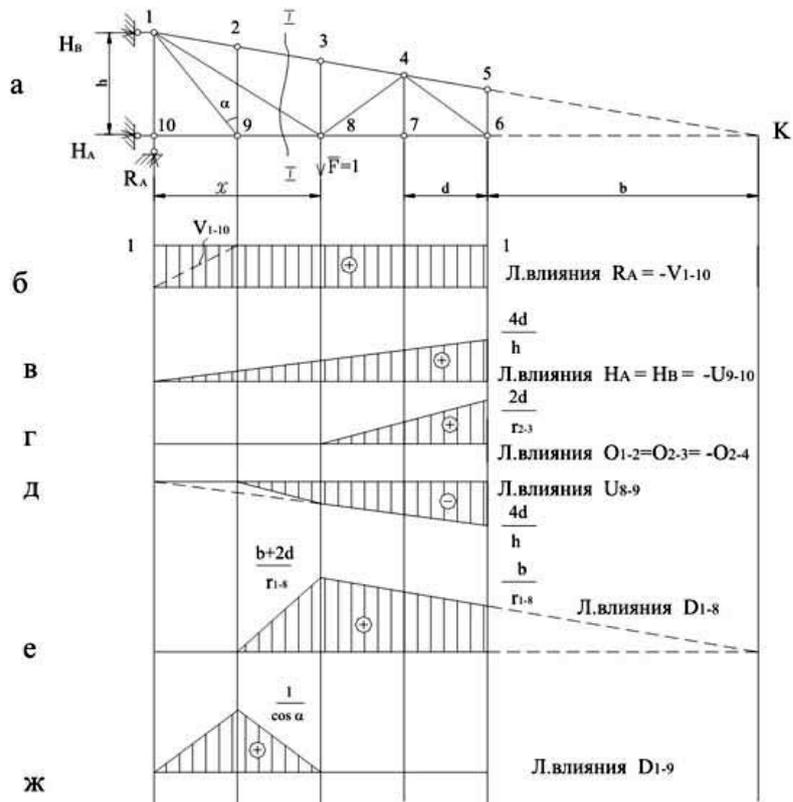


Рис.4.4

**Пример 4.3.** Построить линии влияния усилий в стержнях 1-2, 1-3, 3-4, 5-6 фермы (рис.4.5,а) при движении груза по верхнему поясу.

**Решение**

Для построения линии влияния  $U_{3-4}$  применим способ моментной точки. Если груз находится справа от сечения 1-1:

$$\sum M_1^{лев} = 0; R_a \cdot 4 - U_{3-4} \cdot 4 = 0 \Rightarrow U_{3-4} = R_a = (16 - x)/16;$$

при  $x = 8$  м:  $U_{3-4} = 0.5$ ;

при  $x = 16$ :  $U_{3-4} = 0$ .

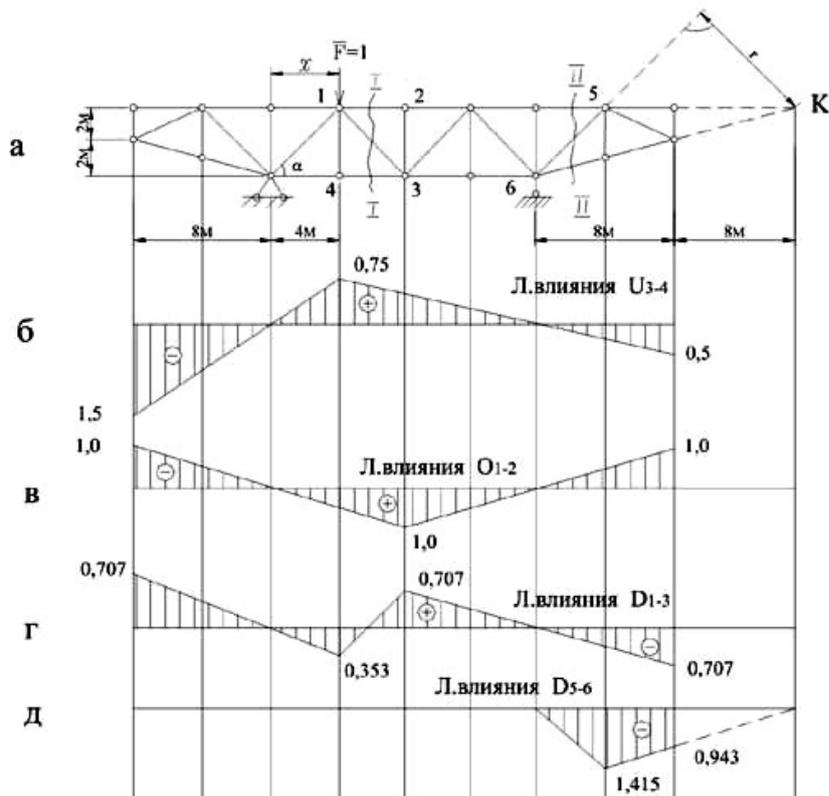


Рис.4.5

По этим данным строим правую ветвь линии влияния (рис.4.5,б).

Если груз находится слева от сечения I-I:

$$\sum M_1^{прав} = 0; R_B \cdot 12 - U_{3-4} \cdot 4 = 0 \Rightarrow U_{3-4} = 3R_B = 3x/16;$$

при  $x = 0$ :  $U_{3-4} = 0$ ;

при  $x = 4$ :  $U_{3-4} = 0,75$ ,

что позволяет построить левую ветвь линии влияния (рис.4.5,б) которая, как и должно быть, пересекается с правой ветвью под моментной точкой 1.

Таким же способом (моментной является точка 3) строится линия влияния  $O_{1-2}$  (рис.4.5,в).

Для построения линии влияния  $D_{1-3}$  используем способ проекций.

При положении груза  $F=1$  справа от сечения 1-1:

$$\sum Y^{лев} = 0: R_A - D_{1-3} \cdot \sin \alpha = 0 \Rightarrow D_{1-3} = R_A / 0,707 = \frac{16-x}{16} \cdot 0,707;$$

при  $x = 8$ м:  $D_{1-3} = 0,707$ ;

при  $x = 16$ м:  $D_{1-3} = 0$ .

По этим данным строим правую ветвь линии влияния, которая пройдет правее узла 3 (рис.4.5,г).

При положении груза  $F=1$  слева от сечения 1-1:

$$\sum Y^{прав} = 0: R_B + D_{1-3} \cdot \sin \alpha = 0 \Rightarrow D_{1-3} = -\frac{x}{16} 0,707;$$

при  $x = 0$ :  $D_{1-3} = 0$ ;

при  $x = 4$ м:  $D_{1-3} = -0,353$ .

Левая ветвь пройдет левее узла 4 (рис.4.5,г) и соединяется с правой ветвью передаточной прямой.

Для построения линий влияния  $D_{5-6}$  проводим сечение II-II (рис.4.5,а) и используем способ моментной точки.

Положение груза  $F=1$  здесь удобно определять абсциссой  $x_k$ , отсчитываемой от моментной точки К. При этом выражения для опорных реакций  $R_A$  и  $R_B$  изменятся, и усилие лучше вычислять из условия равновесия правой консольной части фермы.

Если  $F=1$  слева от сечения II-II, то  $D_{5-6}=0$ ;

Если  $F=1$  справа от сечения II-II, то  $\sum M_k = F \cdot x_k + D_{5-6} \cdot r = 0$ ,  
где  $r = 8,48$ м.

$D_{5-6} = -x_k/8,48$ ;

при  $x_k = 8$ м:  $D_{5-6} = -0,943$ ;

при  $x_k = 12$ м:  $D_{5-6} = -1,415$ .

Линия влияния  $D_{5-6}$  показана на рис.4.5,д.

Форма отчетности:

Отчет.

Задания для самостоятельной работы:

Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

Основная литература:

[1-3] из раздела 7.

Дополнительная литература:

[4-6] из раздела 7.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Аналитический метод расчёта ферм (способ вырезания узлов, способ моментной точки, способ проекций, способ совместных сечений).
2. Определение усилий в стержнях ферм в частных случаях. Выявление нулевых стержней.
3. Построение линий влияния усилий для плоских балочных ферм.

## 9.2. Методические указания по выполнению контрольной работы

Выполнение обучающимися курсовой работы производится с целью:

- 1) систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений;
- 2) углубления теоретических знаний в соответствии с заданной темой;
- 3) формирования умений применять теоретические знания при решении поставленных вопросов;
- 4) формирования умений использовать справочную, нормативную документацию;
- 5) развития творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности.

Основная тематика: Проектирование ферм и их расчет.

Структура: контрольная работа носит практический характер, который состоит из:

- 1) введения, в котором раскрывается актуальность и значение темы, формулируются цели и задачи работы;
- 3) основной части, которая обычно состоит из двух разделов: в первом разделе содержатся теоретические основы разрабатываемого приложения; вторым разделом является практическая часть, которая представлена расчетами, графиками, таблицами, схемами, формами и т.п.;
- 4) заключения, в котором содержатся выводы и рекомендации относительно возможностей практического применения материалов работы;
- 5) списка используемой литературы;
- 6) приложения.

Во введении (объемом 2-3 страницы) раскрывается актуальность и новизна темы, ее научная и практическая значимость, основные направления исследования, формулируются цели

и задачи исследования, указываются предмет и объект исследования, а также характеризуются источники и материалы, использованные в процессе исследования.

Основная часть контрольной работы, как правило, состоит из теоретического и практического разделов. Основная часть должна содержать данные, отражающие сущность, методику и основные результаты выполненного исследования:

- выбор направления исследования, включающий обоснование принятого направления исследования, метода решения задач и их сравнительную оценку, разработку общей методики исследования;
- теоретические и (или) экспериментальные исследования, включающие определение характера и содержания теоретических исследований, методов исследований;
- обобщения и оценку результатов исследования, включающие оценку полноты решения поставленной задачи.

Основную часть контрольной работы следует делить на разделы. Разделы основной части могут делиться на пункты или на подразделы и пункты. Пункты при необходимости могут делиться на подпункты. Каждый подпункт должен содержать законченную информацию.

Заключение (объемом не менее 2 страниц) должно содержать итоги работы, выводы, полученные в ходе работы, разработку рекомендаций по конкретному использованию результатов курсовой работы. Заключение должно быть кратким, обстоятельным и соответствовать поставленным целям и задачам.

Оформление контрольной работы: объем отчета должен составлять 30-50 листов печатного текста. Следует придерживаться следующих параметров оформления отчёта: формат листа отчёта – А4, размеры полей: слева 30 мм, справа 10 мм, сверху и снизу 20 мм. Шрифт Times New Roman, кегль 14. Абзацный отступ – 1,5 см, выравнивание абзаца – по ширине, межстрочный интервал – полуторный. Текст печатается только на одной стороне листа. Страницы должны быть пронумерованы внизу страницы справа. Нумерация страниц – сквозная для всего отчёта, на первом (титальном) листе номер не ставится.

Контрольная работа должна быть правильно оформлена, написана грамотно и аккуратно. Начинать работу нужно с тщательного изучения дисциплины в объеме программы. Далее необходимо подобрать соответствующий литературный и практический материал. В процессе написания можно привлечь дополнительную литературу. Не возбраняется использование переработанных данных электронных ресурсов. Работа должна быть логичной, научной по своему содержанию; в ней в систематизированной форме должны быть изложены материалы проведенного исследования и его результаты.

## **10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

- Microsoft Imagine Premium (ОС Windows 7 Professional);
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
- Kaspersky Endpoint Security для бизнеса – Расширенный Russian Edition. 1000-1499 Node 1 year Educational Renewal License;
- КОМПАС-3D V13;
- APM WinMachine.

**11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР ПЗ</i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
ЛР	Лаборатория автоматизации систем проектирования	Учебная мебель, системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD; Системный блок Cel D-315; Системный блок CPU 4000.2*512MB; Монитор Терминал TFT 19 LG L1953S-SF; Системный блок AMD Athlon 64X2; Системный блок Celeron 2,66; Сканер HP 3770; Монитор 15 LG; Системный блок iCel 433; Принтер HP LJ P2015	№ 1- № 4
ПЗ	Лаборатория автоматизации систем проектирования	Учебная мебель, системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD; Системный блок Cel D-315; Системный блок CPU 4000.2*512MB; Монитор Терминал TFT 19 LG L1953S-SF; Системный блок AMD Athlon 64X2; Системный блок Celeron 2,66; Сканер HP 3770; Монитор 15 LG; Системный блок iCel 433; Принтер HP LJ P2015	№ 1- № 4
кр	Лаборатория автоматизации систем проектирования	Учебная мебель, системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD; Системный блок Cel D-315; Системный блок CPU 4000.2*512MB; Монитор Терминал TFT 19 LG L1953S-SF; Системный блок AMD Athlon 64X2; Системный блок Celeron 2,66; Сканер HP 3770; Монитор 15 LG; Системный блок iCel 433; Принтер HP LJ P2015	-

Лк	Лекционная аудитория (мультимедийный класс)	Учебная мебель, проектор мультимедийный «CASIO» XJ-UT310WN с настенным креплением CASIO YM-88 Интерактивная доска Promethean 88 ActivBoard Touch Dry Erase 6 касаний с настенным креплением и программным обеспечением Promethean ActivInspire Монитор 17"LG L1753-SF (silver-blek) Системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD	-
СР	ЧЗ-1	Учебная мебель, оборудование 10-ПК i5-2500/H67/4Gb (монитор TFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	ФОС
<b>ОПК-2</b>	способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	<b>1.</b> Тематическое содержание дисциплины	Экзаменационные вопросы 1-3
		<b>2.</b> Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций	Экзаменационные вопросы 4-7
		<b>3.</b> Расчет статически определимых простых и составных балок и рам	Экзаменационные вопросы 8-15
<b>ПК-4</b>	способность в составе коллектива исполнителей участвовать в разработке конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-технологических машин и комплексов	<b>4.</b> Энергетические теоремы и определение перемещений	Экзаменационные вопросы 16-22
		<b>5.</b> Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм	Экзаменационные вопросы 23-26
		<b>6.</b> Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем	Экзаменационные вопросы 27-30
		<b>7.</b> Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами	Экзаменационные вопросы 31-37
		<b>8.</b> Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность	Экзаменационные вопросы 38-42
		<b>9.</b> Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов	Экзаменационные вопросы 43-44
		<b>10.</b> Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний	Экзаменационные вопросы 45-54
		<b>11.</b> Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений	Экзаменационные вопросы 55-60
		<b>12.</b> Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений	Экзаменационные вопросы 61-63

		<b>13.</b> Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов	Экзаменационные вопросы 64-66
		<b>14.</b> Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок	Экзаменационные вопросы 67-74
		<b>15.</b> Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции	Экзаменационные вопросы 75-81
		<b>16.</b> Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции	Экзаменационные вопросы 82-88
		<b>17.</b> Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин	Экзаменационные вопросы 89-90

## 2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование темы
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ОПК-2	способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	1. Введение. Общие сведения о дисциплине. 2. Особенности металлоконструкции СДМ. 3. Расчетные схемы. 4. Кинематический анализ плоских и пространственных стержневых систем. 5. Тела и связи. 6. Степень изменяемости системы. 7. Образование и кинематический анализ системы.	1. Тематическое содержание дисциплины  2. Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций
2.	ПК-4	способность в составе коллектива исполнителей участвовать в разработке конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-	8. Расчет статически определимых стержневых систем при действии подвижной нагрузки. 9. Основные понятия. 10. Статический метод построения линий влияния в балках. 11. Кинематический метод построения линий влияния в балках. 12. Определение усилий по линиям влияния. 13. Линии влияния при узловой передаче нагрузки. 14. Построение линий влияния	3. Расчет статически определимых простых и составных балок и рам

		<p>технологических машин и комплексов</p>	<p>усилий в фермах.  15. Статический и кинематический методы  16. Энергетические теоремы и определение перемещений.  17. Обобщенная сила и обобщенное перемещение.  18. Действительная работа внешних и внутренних сил.  18. Потенциальная энергия деформации.  19. Теорема о взаимности работ. Теорема о взаимности перемещений. Теорема о взаимности реакций.  20. Определение перемещений по методу Мора. Формула Мора. Вычисление интеграла Мора.  21. Основы вариационных принципов и методов расчета.  22. Полная энергия деформированной системы. Вариационные принципы деформированных систем.  23. Общие методы определения сил в связях плоских и пространственных систем.  24. Статический метод.  25. Способ вырезания узлов. Способ моментальной точки. Способ сквозных сечений.  26. Основы метода замены связей.  27. Расчет пространственных ферм.  28. Применение общих методов расчета.  9. Расчет сетчатых ферм путем разложения их на плоские системы.  30. Особенности расчета пространственных ферм на кручение.  31. Расчет статически неопределимых стержневых систем. Статически неопределимые системы.  32. Общие предпосылки методов расчета.  33. Метод сил. Порядок расчета и примеры.  34. Особенности расчета симметричных рам.  35. Особенности расчета на температурные и дислокационные</p>	<p>4. Энергетические теоремы и определение перемещений</p> <p>5. Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм</p> <p>6. Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем</p> <p>7. Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами</p>
--	--	---	---	--

		<p>взаимодействия.</p> <p>36. Метод перемещений.</p> <p>37. Определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений.</p> <p>38. Матричные методы расчета стержневых систем. Общие понятия.</p> <p>39. Матрицы податливости и жесткости системы. Расчет в матричной форме.</p> <p>40. Определение перемещений. Основы метода конечных конечных элементов.</p> <p>41. Матрица жесткости и грузовая матрица элемента в местной и общей системе координат.</p> <p>42. Формирование общей матрицы жесткости и расчет системы.</p> <p>43. Материалы металлоконструкций. Металлы, применяемые для несущих конструкций.</p> <p>44. Рекомендации по выбору стали с учетом условий эксплуатации машин. Сортамент.</p> <p>45. Методы расчета на прочность и устойчивость.</p> <p>46. Нагрузки, действующие на стационарные конструкции.</p> <p>47. Нагрузки, действующие на несущие конструкции.</p> <p>48. Расчет по допускаемым напряжениям.</p> <p>49. Расчет по предельным состояниям.</p> <p>50. Расчет на надежность.</p> <p>51. Основы расчета конструкций на устойчивость и по деформативному состоянию.</p> <p>52. Основные методы определения критических нагрузок.</p> <p>53. Устойчивость пластин.</p> <p>54. Расчет систем по деформативному состоянию.</p> <p>55. Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений.</p> <p>56. Сварные соединения. Типы сварных соединений и сварных</p>	<p><b>8.</b> Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность</p> <p><b>9.</b> Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов</p> <p><b>10.</b> Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний</p> <p><b>11.</b> Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений</p>
--	--	---	--

		<p>швов.</p> <p>57. Размеры сечения сварных швов. Сопряжения элементов в сварных узлах.</p> <p>58. Учет технологических факторов при проектировании сварных узлов.</p> <p>59. Стыковые швы. Угловые швы.</p> <p>60. Болтовые соединения.</p> <p>61. Конструктивные формы сварных узлов шарнирных соединений. Назначение шарнирных соединений. Типы шарнирных соединений металлоконструкций.</p> <p>62. Сварные узлы шарнирных соединений. Распределение напряжений в сварных узлах шарнирных соединений.</p> <p>63. Определение рациональных параметров проушин.</p> <p>64. Усталостная долговечность сварных узлов. Основные понятия.</p> <p>65. Процесс усталостного разрушения. Факторы, влияющие на усталостную долговечность.</p> <p>66. Материал конструкции. Условия эксплуатации. Формирование расчетных режимов нагружения</p> <p>67. Балочные конструкции. Металлоконструкции балочного типа и общие принципы расчета.</p> <p>68. Выбор сечения и расчет прокатных балок.</p> <p>69. Общие принципы расчета коробчатых балок.</p> <p>70. Особенности расчета тонкостенных балок. Прочность тонкостенных балок.</p> <p>71. Общая устойчивость тонкостенных балок. Особенности проектирования составных балок.</p> <p>72. Проектирование балок наименьшей массы. Оптимизация параметров балки.</p> <p>73. Определение нагрузок и расчет металлоконструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора.</p> <p>74. Определение нагрузок и расчет телескопических стрел.</p> <p>75. Решетчатые конструкции. Примеры решетчатых</p>	<p><b>12.</b> Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений</p> <p><b>13.</b> Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов</p> <p><b>14.</b> Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок</p> <p><b>15.</b> Расчет и проектирование</p>
--	--	---	--

			<p>конструкций и общие принципы их расчета. Классификация решетчатых конструкций.</p> <p>76. Рекомендации по проектированию решетчатых конструкций. Устойчивость решетчатых конструкций.</p> <p>77. Влияние остаточных сварных напряжений на нагрузочную способность решетчатых конструкций.</p> <p>78. Особенности расчета металлоконструкций башенных кранов.</p> <p>79. Основные сведения о расчете стрел и башен.</p> <p>80. Нагрузки, действующие на металлоконструкции башенных кранов.</p> <p>81. Расчет стрел по деформативному состоянию.</p> <p>82. Рамные и листовые конструкции. Примеры рамных конструкций и общие принципы их расчета.</p> <p>83. Рамы машин и оборудования для устройства и ремонта дорожных покрытий.</p> <p>84. Металлоконструкции автогрейдеров.</p> <p>85. Металлоконструкции скрепера.</p> <p>86. Особенности расчета рамных конструкций землеройных машин с навесным оборудованием.</p> <p>87. Металлоконструкции рыхлителей.</p> <p>88. Особенности расчета цистерн и бункеров</p> <p>89. Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций.</p> <p>90. Оптимизация конструкции. Применение ПО.</p>	<p>стержней ферм. Решетчатые конструкции</p> <p><b>16.</b> Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции</p> <p><b>17.</b> Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин</p>
--	--	--	--	---

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать:</b> ОПК-2 -основные методы исследования и проектирования металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</p> <p>ПК-4 -основы конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</p> <p><b>Уметь:</b> ОПК-2 -разрабатывать расчётные схемы при расчёте металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</p> <p>ПК-4 -разрабатывать основы конструкторско-технической документации в составе коллектива исполнителей новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин;</p> <p><b>Владеть:</b> ОПК-2 -современными средствами информационных технологий и машинной графики.</p> <p>ПК-4 -навыками разработки конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов металлоконструкций наземных транспортно-технологических машин в составе коллектива исполнителей.</p>	<b>отлично</b>	Оценка «отлично» выставляется обучающемуся, если он демонстрирует полное освоение теоретического содержания дисциплины; представляет практические навыки работы на учебных стендах учетом основных требований безопасности; все учебные задания выполнены правильно, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.
	<b>хорошо</b>	Оценка «хорошо» выставляется обучающемуся, если в усвоении учебного материала им допущены небольшие пробелы, не исказившие содержание ответа; допущены один – два недочета в формировании навыков решений практических задач.
	<b>удовлетворительно</b>	Оценка «удовлетворительно» выставляется обучающемуся, если в его ответе содержание теоретического материала раскрыто неполно, но показано общее понимание вопроса.
	<b>неудовлетворительно</b>	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие знаний основных понятий строительной механики и металлоконструкций, навыков решения практических задач на учебных стендах.

#### **4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности**

Изучение дисциплины «Строительная механика и металлоконструкции» охватывает круг вопросов, относящихся к проектно-конструкторскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Тематическое содержание дисциплины.
2. Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций.
3. Расчет статически определимых простых и составных балок и рам.
4. Энергетические теоремы и определение перемещений.
5. Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм.
6. Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем.
7. Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами.
8. Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность.
9. Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов.
10. Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний.
11. Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений.
12. Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений.
13. Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов.
14. Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок.
15. Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции.
16. Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции.
17. Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин.

Закрепление всех вопросов, рекомендуемых для лабораторных и практических занятий, а также при подготовке к экзамену, требует основательной самостоятельной подготовки. Учитывая значимость самостоятельной работы, литература, вопросы для самопроверки - в разделах «Практическая работа» и «Фонд оценочных средств».

Работа с литературой является обязательной. При этом приветствуется привлечение дополнительных источников из Интернета. В случае возникновения определенных вопросов, обучающийся может обратиться к преподавателю за консультацией, как на практических занятиях, так и во время индивидуальных консультаций.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в виде лекций, лабораторных и практических занятий в сочетании с внеаудиторной работой.

**АННОТАЦИЯ**  
**рабочей программы дисциплины**  
**Строительная механика и металлоконструкции**

**1. Цели и задачи дисциплины**

Основной целью изучения дисциплины «Строительная механика и металлоконструкции» является дать обучающемуся необходимый объем фундаментальных знаний в области разработки конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

Задачей изучения дисциплины является формирование у обучающегося системы инженерно-конструкторских знаний, позволяющих успешно решать научно-технические проблемы, возникающие в процессе профессиональной деятельности.

**2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 36 час., ЛР – 36 час., ПЗ – 18 час., СР – 126 часов. Общая трудоемкость дисциплины составляет 252 часа, 7 зачетных единиц.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Тематическое содержание дисциплины.
2. Кинематический анализ расчетных схем стержневых конструкций.
3. Расчет статически определимых простых и составных балок и рам.
4. Энергетические теоремы и определение перемещений.
5. Расчет статически определимых плоских и пространственных ферм.
6. Расчет статически неопределимых плоских стержневых систем: балок рам, ферм. Матричные методы расчета стержневых систем.
7. Динамические расчетные схемы при расчетах металлоконструкций. Расчет пластин численными методами.
8. Основы динамики конструкции. Расчетные нагрузки на металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и их комбинации при расчетах на прочность.
9. Материалы несущих металлоконструкций, их характеристики, сортамент, особенности работы при низкой и высокой температурах, принципы рационального выбора материалов.
10. Методы расчета на прочность и устойчивость. Принципы расчета конструкций по методам допускаемых напряжений и предельных состояний.
11. Расчет и проектирование сварных, заклепочных и болтовых соединений.
12. Расчет и проектирование соединений элементов металлоконструкций. Сварные узлы шарнирных соединений.
13. Расчет элементов металлоконструкций на сопротивление усталости. Усталостная долговечность сварных узлов.
14. Балочные конструкции. Выбор рациональных параметров сечений балок.
15. Расчет и проектирование стержней ферм. Решетчатые конструкции.
16. Проверка элементов на местную устойчивость. Рамные и листовые конструкции.
17. Применение ЭВМ при проектировании металлоконструкций. Основы проектирования и расчета металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин.

**3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 - способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы;

ПК-4 - способность в составе коллектива исполнителей участвовать в разработке конструкторско-технической документации новых или модернизируемых образцов наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

**4. Вид промежуточной аттестации: экзамен.**

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Протокол заседания кафедры СДМ №\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.,

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(Ф.И.О.)

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы от «06» марта 2015г. №162.

**для набора 2018 года:** и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. №130, для заочной формы обучения от «12» марта 2018г. №130

**Программу составил:**

Лобанов Дмитрий Викторович, к.т.н., доцент

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры СДМ от «\_\_» декабря 2018г., протокол № \_\_

И.о. заведующего кафедрой СДМ \_\_\_\_\_ К.Н. Фигура

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего кафедрой СДМ \_\_\_\_\_ К.Н. Фигура

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией МФ от «\_\_» декабря 2018 г., протокол № \_\_\_\_\_

Председатель методической комиссии МФ \_\_\_\_\_ Г.Н. Плеханов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_