

ОПД.Р.03 СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Методические указания и контрольные задания
для студентов-заочников строительных специальностей

ВВЕДЕНИЕ

Для студентов строительных специальностей строительная механика является одной из основных базовых дисциплин. Задача строительной механики заключается в переходе от общих разделов физики, теоретической механики, теории упругости к непосредственному проектированию сооружений.

Многообразие и сложность задач, стоящих перед строительной механикой, приводят к невозможности ее изучения в рамках одного курса и вызывают деление его на ряд связанных между собой дисциплин: сопротивление материалов, прикладная теория упругости и пластичности, строительная механика самолета, строительная механика корабля, строительная механика стержневых систем и др. Цель строительной механики стержневых систем, называемой обычно просто строительной механикой, но уже в узком смысле слова, — вооружить будущего инженера знаниями, необходимыми для проектирования сооружений промышленного и гражданского строительства.

Обеспечение прочности и надежности сооружений в сочетании с высокой экономичностью возможны только при высокой квалификации инженера и овладении им современными методами строительной механики, получившими большое развитие за последние годы в связи с внедрением в практику проектирования электронных вычислительных машин. Умение решать задачи строительной механики — это есть умение проектировать сооружения, умение оценивать их прочность и надежность.

В программе курса строительной механики указано, что не все вопросы, включенные в нее, являются в равной мере необходимыми для различных строительных специальностей и что для изложения материалов всех четырех частей курса в полном объеме отводимого учебными планами количества часов не достаточно. Поэтому кафедрам вузов дано право при составлении рабочих программ курса определять глубину проработки тех или иных тем и разделов с учетом объема часов и специфики данной специальности.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К изучению строительной механики следует приступать после усвоения дифференциального и интегрального исчисления, основ матричной алгебры, теоретической механики и сопротивления материалов. Из курса «Сопротивление материалов студенту известны

общие положения оценки прочности, жесткости и устойчивости применительно к простым системам (балкам, брусам, стержням), употребляемым часто как самостоятельные сооружения или входящим в состав сложных конструкций. Строительная механика изучает сооружения, состоящие из большого числа элементов, на основе общих принципов разрабатывает и совершенствует методы точного и приближенного расчета сложных систем (балок, арок, ферм, рам, пластинок, оболочек, пространственных конструкций).

Курс строительной механики состоит из четырех частей. В полном объеме курс изучается только студентами специальностей «Промышленное и гражданское строительство» (ПГС) и «Мосты и тоннели» (МТ). Студенты специальностей «Городское строительство и хозяйство» (ГС), «Сельскохозяйственное строительство» (СХС) и «Автомобильные дороги» (АД) изучают только первые две части. Студенты санитарно-технических специальностей — «Теплоснабжение и вентиляция» (ТВ), «Водоснабжение и канализация» (ВК), а также технологических — «Производство строительных изделий и конструкций» (СД) и инженерно-экономических специальностей изучают сокращенный курс строительной механики, куда входят почти все разделы и темы первой части и только некоторые темы Второй части курса.

Основной формой изучения курса строительной механики для студентов-заочников является самостоятельная работа с учебниками и учебными пособиями. Умение самостоятельно работать с книгой является основой не только подготовки, но и всей деятельности инженера.

В методических указаниях в каждой теме даны ссылки на учебную литературу, необходимую для изучения данной темы, причем учебный материал, отмеченный звездочками (как при ссылке на литературу, например [1]*, введение, § 1), так и в тексте, например «Тема 7*»), изучается только студентами строительных специальностей (ПГС, ГС, СХС, МТ, АД). Остальные темы, если нет специальных оговорок, изучаются студентами всех специальностей.

В качестве основного рекомендуется учебник [1]. При отсутствии этого учебника могут быть использованы учебники [2], [3], [4], [5], [6], [7], приведенные в списке литературы (см. с. 5). При этом следует иметь в виду, что в учебниках [6] и [7] освещены не все вопросы, подлежащие изучению студентами строительных специальностей, и поэтому они рекомендуются в основном для студентов, изучающих сокращенный курс.

В строительной механике большое значение имеет умение решать конкретные задачи. Поэтому в дополнение к учебнику для приобретения навыков в решении задач следует использовать пособия [8], [9] или [10].

Изучение строительной механики следует начинать с проработки теории по учебнику, причем на первом этапе рекомендуется внимательно прочесть изучаемый раздел, обратив особое внимание на общий подход к изучаемому вопросу и принципы решения разбираемого класса задач. При этом сначала не обязательно запоминание всех формул и выводов. Когда будет усвоена общая методика, следует прочесть материал снова, составить краткий конспект и сделать необходимые выводы.

После этого следует перейти к разбору решения задач, используя рекомендуемые пособия, и лишь затем приступить к самостоятельному решению задач и выполнению необходимых контрольных ра-

бот. Без изучения теории приступать к самостоятельному решению задач невозможно, так как только знание теории даст возможность решать любые задачи во всем их многообразии.

По важнейшим разделам курса студент-заочник выполняет индивидуальные контрольные работы. Самостоятельность их выполнения имеет первостепенное значение для усвоения учебного материала (Подробные указания по выполнению и оформлению контрольных работ даны на с. 31).

По основным разделам курса на учебно-консультационных пунктах (УКП) читаются лекции. На этих пунктах студент может получить консультацию по всем вопросам теории и практики решения задач. Если нет возможности получить консультацию устно, студент-заочник может обратиться в институт за получением письменной консультации. В случае когда студент-заочник имеет возможность регулярно посещать лекции на УКП, то это не освобождает его от самостоятельной работы с учебником и пособиями, так как, во-первых, лекции читаются только по основным разделам, а, во-вторых, посещение лекций дает возможность получить лишь общее знакомство с курсом. Глубокое усвоение любого предмета достигается только в процессе самостоятельной работы.

ЛИТЕРАТУРА

К первой и второй частям курса

1. Строительная механика/ Под ред. А. В. Даркова. М., 1976.
2. Рабинович И. М. Основы строительной механики стержневых систем. М., 1960.
3. Д а р к о в А. В., Кузнецов В. И. Строительная механика. М., 1962.
4. Киселев В. А. Строительная механика. М., 1976.
5. Снитко Н. К- Строительная механика. М., 1980.
6. Жемочкин Б. Н., Пашевский Д. П. Статика сооружений. М., 1959.
7. Дыховичный А. И. Строительная механика. М., 1966.

Пособия по решению задач

8. Сборник задач по теории сооружений/ Под ред. И. М. Рабиновича. М., 1962.
9. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики/ Под ред. Г. К. Клейна. М., 1973.
10. Строительная механика в примерах и задачах. Л. В. Киселев, А. М. Афанасьев, В. А. Ермоленко и др. М., 1968.

К третьей части курса

11. Колкунов Н. В. Основы расчета упругих оболочек М. 1972.
 12. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М. 1970.
- Кроме того, учебник [1].

К четвертой части курса

13. Прокофьев И. П., Смирнов А. Ф. Теория сооружений, ч. 3. М., 1948.
14. Киселев В. А. Строительная механика (специальный курс). М., 1969.
15. Раевский А. И. Основы расчета сооружений на устойчивость. М., 1962.
Кроме того, учебники [1], [2], [5].

Пособия по решению задач

16. Безухов Н. И., Лужин О. В., Колкунов Н. В. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах. М., 1968.
17. Клейн Г.К., Рскач В.Г., Розенберг Г.И. Руководство к практическим занятиям по специальному курсу строительной механики. М., 1972. Кроме того, пособие [8].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ТЕМАМ КУРСА

Введение и основные понятия

Литература: [1, § 1.1—3.1, 13.2—15.2]; [2, § 1.1—2.8]; [3, § 1.1—3.1]; [4, § 1—19]; [5, § 1-4]; [6, Введение, § 1—7]; [7, § 1—6]; [8, гл. 1, задачи 1.1—1.24]; [9, гл. 1]; [10, гл. 2, § 2.1].

Методические указания

Для успешного усвоения курса строительной механики необходимо прежде всего повторять основные положения курсов теоретической механики (статики) и сопротивления материалов, касающихся условий равновесия сил на плоскости и в пространстве, понятий прочности, жесткости и устойчивости, использования метода сечений для определения внутренних усилий.

Первым этапом расчёта сооружения является обычно определение опорных реакций. Поэтому необходимо твердо усвоить основные типы опор, применяемых в расчетных схемах, уметь определять возникающие в них реакции и направления возможных перемещений. Необходимо учитывать, что в учебной литературе изображение шарнирно-подвижных и шарнирно-неподвижных опор несколько отличается от изображений, установленных стандартами (ЕСКД). В настоящем пособии изображение опор дается по ЕСКД.

Изучая понятие расчетной схемы, надо усвоить, что выбор расчетной схемы является важным этапом расчета сооружения, так как он влияет как на простоту расчета, так и на его точность. Расчетная схема тесно связана с допущениями и предпосылками, лежащими в основе дальнейшего расчета. Для одного и того же сооружения нередко можно предложить разные расчетные схемы, выбор которых зависит от требуемой точности.

При анализе расчетных схем сооружений важное значение имеют понятия: диск, кинематическая связь, степень свободы, степень статической неопределимости, геометрическая неизменяемость. Здесь также необходимо усвоить, что шарнир, соединяющий не 2.

а n дисков (стержней, элементов), эквивалентен $n - 1$ простым шарнирам.

Особое значение имеет проверка правильности образования геометрически неизменяемых систем. При анализе геометрической структуры расчетной схемы большое практическое значение приобретает эквивалентность двух пересекающихся стержней условному шарниру (последний может быть образован и двумя параллельными стержнями, пересекающимися в бесконечности). Изучив признаки мгновенной изменяемости, необходимо попрактиковаться в их отыскании в сложных системах.

Широкое развитие современной вычислительной техники значительно облегчает решение сложных задач строительной механики.

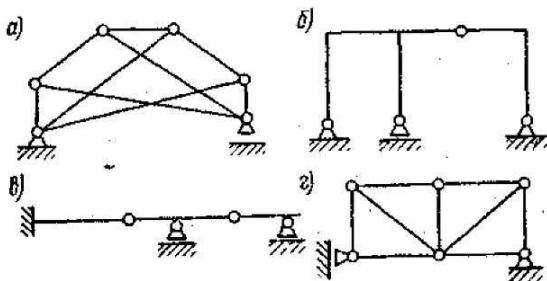


Рис. 1

Открывается возможность расчета сооружений по уточненным расчетным схемам, с более полным учетом физических свойств материала и особенностей работы конструкций. Практически отпадают трудности математического порядка (решение систем уравнений и и пр.), которые часто приводили к поискам упрощенных расчетных схем, приближенных методов решения. Широкое распространение получили численные методы анализа, хорошо приспособленные для реализации на вычислительных машинах. Для лучшего усвоения новых методов решения задач строительной механики необходимо повторить из курса высшей математики основы матричной алгебры и линейные преобразования векторов. Надо повторить основные правила операций над матрицами: сложение матриц, умножение матриц на скаляр, перемножение матриц, обращение матриц, транспонирование и пр. Необходимый материал по этим вопросам излагается в курсах высшей математики. Достаточно подробно основные сведения из теории матриц систематизированы в учебнике [1].

Вопросы для самопроверки

1. Укажите направления возможных реакций и перемещений для различных типов опор плоских систем.
2. Почему недопустимы системы, близкие к мгновенно изменяемым?
3. Произведите кинематический анализ систем, изображенных на рис. 1.

ЧАСТЬ I.

СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Тема 1.

Методы определения усилий от неподвижной нагрузки (на примерах простейших балочных систем)

Литература: [1, § 1.2, 9.2, 10.2]; [2, § 5.1—5.8]; [3, § 1.2, 9.2-10.2]; [4, § 18-22, 42, 47, 50]; [8, § 8.9]; [7, § 22-23]; [8, гл. 2, задачи 2.1—2.11]; [9, гл. 2].

Методические указания

Общие сведения о нагрузках и внутренних усилиях известны студенту из курса сопротивления материалов, однако важность этого вопроса требует повторения основных понятий и в первую очередь метода сечений и правил построения эпюр внутренних сил, зависимостей между эпюрами и нагрузкой. Весьма полезно ознакомиться с кинематическим методом. Метод замены связей целесообразнее рассмотреть при изучении темы 3 «Плоские фермы».

При расчете многопролетных статически определимых балок целесообразно использовать схему взаимодействия элементов — «позатяжную схему». Такая схема позволяет свести расчет сложной балки к расчету простых балок с консолями. Для составления схемы взаимодействия в первую очередь необходимо выделить основные балки и опирающиеся на них второстепенные. При расчете отдельных балок надо учесть равенство по величине и противоположность по направлению сил взаимодействия (давлений и реакций) в шарнирах, связывающих отдельные балки. При помощи «позатяжной схемы» удобно рассчитывать и некоторые типы статически определимых рам (например, рис. 1, б и 2, в).

Вопросы для самопроверки

1. Как проверить статическую определенность и геометрическую неизменяемость многопролетной статически определимой балки?
2. Какие зависимости между изгибающим моментом, поперечной силой и нагрузкой используются при проверке правильности построения эпюр?
3. Для балок и рам (рис. 2) постройте эпюры внутренних усилий.
4. Как построить эпюру изгибающих моментов при узловой передаче нагрузки (рис. 3)?

Тема 2.

Методы определения усилий от подвижной нагрузки

Литература: [1, § 1.2—8.2, 16.2*]; [2, §4.1—4.14]; [8, § 1.2—8.2, 11.2]; [4, § 26-41, 43, 44, 48]; [6, § 10-18]; [6, § 12-16]; [7, § 13-21, 25]; [8, гл. 2, задачи 2.12—2.35]; [9, гл. 3]; [10, гл. 3].

Методические указания

Расчет на подвижную нагрузку производится при помощи линий влияния. Приступая к изучению этого важного раздела, необходимо четко уяснить смысл линии влияния и ее отличия от эпюры. Линии

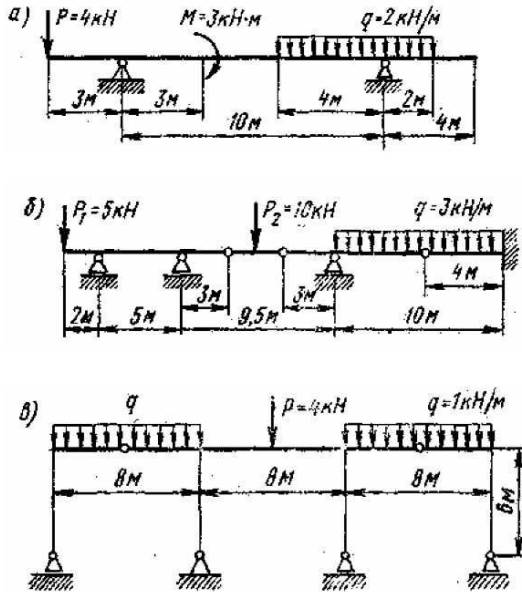


Рис.2

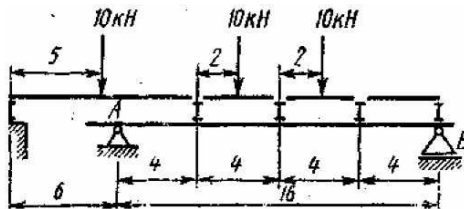


Рис. 3

влияния опорных реакций балки на двух опорах с консолями являются основными; все остальные линии влияния строятся на базе основных. Поэтому вид и исходные ординаты линий влияния опорных реакций необходимо запомнить. При изучении построения линий влияния внутренних усилий важно усвоить общий метод: рассмотрение двух положений единичной силы — слева и справа от рас-

смаатриваемого сечения. Следует обратить внимание на особенности построения линий влияния внутренних усилий на консолях.

Изучая вопрос определения усилий по линиям влияния, надо обратить внимание на загрузка линии влияния, построенной от перемещения сосредоточенной силы, сосредоточенным моментом. При этом важно запомнить правило знаков: положительным считается момент, действующий по ходу часовой стрелки, и угол наклона линии влияния, отсчитываемый от горизонтали против хода часовой стрелки (если положительные ординаты линии влияния отложены вверх).

Определение невыгоднейшего положения нагрузки на сооружении в общем связано с достаточно громоздкими вычислениями. Здесь можно ограничиться лишь подходом к решению задачи, обратив особое внимание на загрузка треугольной линии влияния и на понятие об эквивалентной нагрузке. Для статически определимых многопролетных балок построение линий влияния удобнее производить, рассматривая «поэтажную» схему. Особенностью построения линий влияния при узловом передаче нагрузки является построение передаточной прямой.

Надо иметь в виду, что построение линий влияния усилий занимает большое место во всех последующих темах и поэтому важно добиться полного усвоения этого вопроса.

В более сложных случаях, когда решается задача определения внутренних усилий (или перемещений) в нескольких сечениях от действия различных сочетаний нагрузок, большой эффект дает применение матриц влияния.

Объемлющие эпюры внутренних сил широко применяются при конструировании металлических и железобетонных балок. Следует обратить внимание на отличие отъемлющих эпюр от простых.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое линия влияния? Для чего используются линии влияния?
2. Постройте линию влияния нормального напряжения в крайнем волокне какого-либо сечения балки на двух опорах.
3. Для балки (рис. 4) постройте линии влияния изгибающих моментов и поперечных сил в сечениях 1—4.

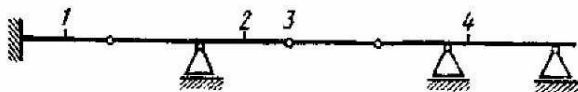


Рис. 4

Тема 3.

Плоские фермы

Литература: [1, § 1.4—8.4, 11.4*]; [2, § 7.1—7.4, 7.8, 7.9, 7.14—7.17, 7.20*, 7.24, 7.25*, 8.1, 8.2]; [3, § 1.4-2.4, 4.4-9.4*]; [4, § 52-62]; [5, § 19-25]; [6, § 26-29, 31-33]; [7, § 32-47]; [8, гл. 4]; [9, гл. 5]; [10, гл. 4].

Методические указания

При аналитическом определении усилий в стержнях фермы используется метод сечений. Анализ геометрической неизменяемости и статической определенности удобно проводить по формуле, устанавливающей соотношение между числом узлов и стержней.

При определении усилий в стержнях надо стремиться к тому, чтобы усилие в каждом стержне определялось независимо от усилий в других стержнях. Достигнуть этого удастся почти во всех случаях путем правильного выбора сечения и использования одного из трех способов: моментной точки, проекций; вырезания узлов. Необходимо усвоить признаки нулевых стержней.

Построение линий влияния усилий в стержнях фермы, как и расчет на постоянную нагрузку, проводится теми же способами по общей методике, изложенной в предыдущей теме. Особенностью

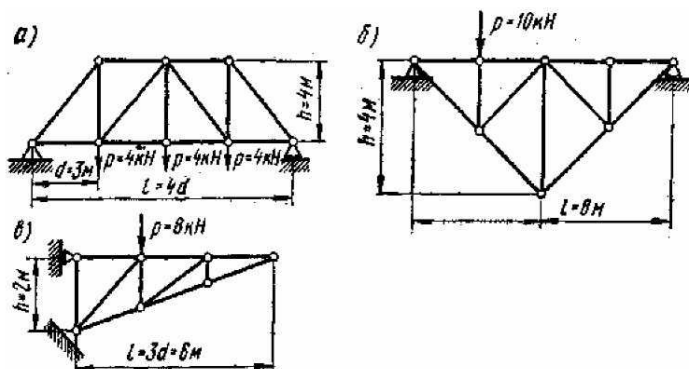


Рис. 5

здесь является наличие передаточных прямых, связанное с узловой передачей нагрузки.

Расчет сложных (шпренгельных) ферм* требует умения выделить основную и дополнительную решетки. Для этого необходимо знать все типы шпренгелей и схемы их взаимодействия с основной решеткой, т. е. схемы передачи нагрузки со шпренгелей в узлы основной решетки. Здесь особенно полезно разобрать примеры из пособий [8], [9], [10].

Матрицы влияния усилий в стержнях фермы могут быть получены как совокупность линий влияния (наиболее простой способ) путем использования зависимостей между усилиями в стержнях фермы и моментами и поперечными силами в сечениях балки или через описание структуры системы. Наличие матрицы влияния усилий позволяет легко рассчитать ферму на различные нагрузки.

Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях используется способ, моментной точки? Когда необходимо рассматривать проекцию сил на ось?

2. Укажите признаки нулевых стержней.

3. Определите усилия в стержнях ферм, приведенных на рис. 5.

Постройте линии влияния усилий в стержнях второй панели (считая слева).

4*. Определите усилия в стержнях, помеченных знаком «х» ферм, приведенных на рис. 6. Для тех же стержней постройте линии влияния.

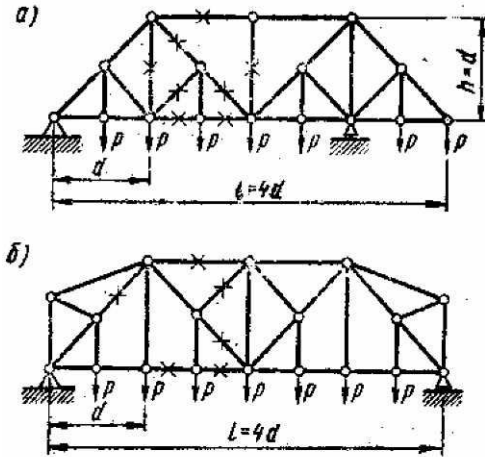


Рис. 6

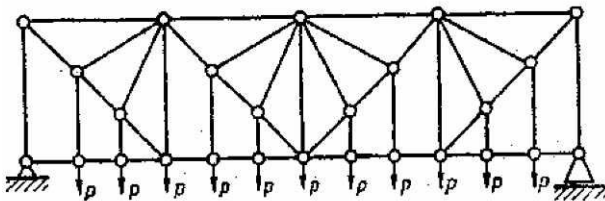


Рис. 7

5*. Укажите порядок определения усилий в стержнях фермы, приведенной на рис. 7.

Тема 4.

Трехшарнирные системы

Литература: [1, § 1.3—8.3, 9.4—10.4*]; [2, § 6.1—6.5, 6.9, 6.10, 6.12, 9.1—9.6*]; [3, § 1.3—7.3, 10.4—11.4*]; [4, § 64—84]; [5, § 26—34]; [6, § 19—25, 34—39]; [7, § 26—31]; [8, гл. 3, задачи 3.3—3.25]; [9, гл. 4, 6]; [10, гл. 5, 6].

Методические указания

Особенностью работы трехшарнирных систем является наличие горизонтальной составляющей опорных реакций даже при вертикальной нагрузке. Для определения этих составляющих (распора) необходимо составить дополнительное уравнение. При определении внутренних усилий в сечениях трехшарнирных арок не следует ограничиваться одним частным случаем действия вертикальной нагрузки. При проектировании арок важное значение имеет отыскание рациональной оси, поэтому необходимо уметь строить рациональную ось не только для равномерной по всему пролету нагрузки.

Линии влияния внутренних усилий строятся на основе линий влияния моментов и поперечных сил в сечениях простых балок. Полезно ознакомиться с построением линий влияния при помощи нулевых точек. Матричные методы расчета* трехшарнирных арок можно изучить по учебнику [1]. Расчет трехшарнирных арочных ферм* по существу складывается из элементов расчета трехшарнирных арок или рам и балочных ферм. Изучение расчета статически определимых комбинированных и Байтовых систем достаточно ограничить общими понятиями.

Вопросы для самопроверки

1. Как определяется распор в трехшарнирной арке?
2. Постройте эпюры M , Q и N для рам, изображенных на рис. 8 ($l=20$ м, $h=10$ м).

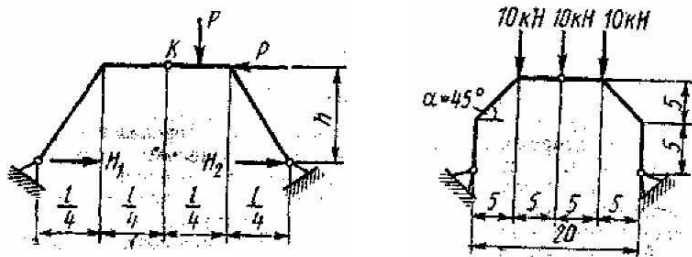


Рис. 8

3. Как определяется положение нулевых точек линий влияния M , Q и N в арке?
4. Какие преимущества и недостатки имеет трехшарнирная арка по сравнению с балкой и фермой?
5. Постройте рациональную ось трехшарнирной системы при загрузке левой половины равномерно распределенной нагрузкой (средний шарнир расположите посередине пролета).
6. Постройте линии влияния усилий N_1 и N_2 в ферме, приведенной на рис. 9, а.
7. Разберите порядок расчета системы, изображенной на рис. 9, б.

Тема 5.

Определение перемещений и некоторые основные теоремы строительной механики

Литература: [1, § 1.7-9.7, 10.7-14.7*, 17.7*]; [2, § 13.1-13.11, 13.13—13.16*, 14.1—14.9, 14.10*]; [3, § 1,8—9.8, 10.8—14.8*] [4, § 95—100, 101*, 102—103, 104—111*]; [5, § 35—42, 43*]; [6, § 40—49]; [7, § 70—81]; [8, гл. 8]; [9, гл. 8, 17*, § 6]; [10, гл. 8].

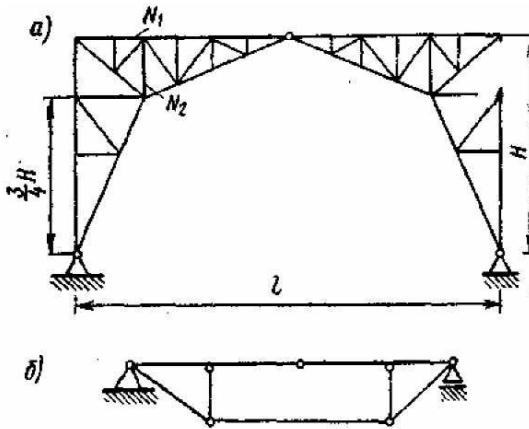


Рис. 9

Методические указания

Расчет сооружений на жесткость связан с определением их деформаций, т. е. вычислением перемещений отдельных точек. Кроме того, умение определять перемещения является основой для расчета статически неопределимых систем, поэтому усвоение этой темы имеет большое значение для всей второй части курса.

Прежде всего необходимо твердо усвоить принятые в строительной механике обозначения перемещений и смысл индексов. Особое внимание надо уделить теоремам о взаимности работ и взаимности перемещений и главной общей формуле Мора для определения перемещений от нагрузки, температуры и смещения опор. Важное практическое значение имеет способ Верещагина для вычисления интеграла Мора. Усвоение этого способа надо обязательно закрепить решением примеров, обратив внимание на приемы деления сложных площадей эпюр на простые. Хотя в подавляющем большинстве случаев вычисление интеграла Мора можно произвести по способу Верещагина, однако надо уметь определять перемещения и непосредственным интегрированием подынтегральных выражений. Для этого рекомендуется решить часть задач из пособий [8], [9], [10] — интегрированием члена формулы, учитывающего изгибающий момент (например, первые две задачи из любого пособия).

Очень важно приобрести навык в построении эпюр изгибающих моментов в статически определимых системах (ломаных балках, трехшарнирных арках и рамах). Обычно в учебниках и учебных пособиях по строительной механике приводятся готовые эпюры, без объяснения порядка их построения, так как имеется в виду, что студенту это хорошо известно из курса сопротивления материалов. Однако там в основном разбирались балки, а не сложные системы. Поэтому настоятельно рекомендуется при разборе задач на определение перемещений все необходимые эпюры построить самостоятельно.

Эффективность матричной формы определения перемещений * очень полезно проиллюстрировать решением примеров. Материал по этому вопросу хорошо изложен в учебнике [1].

Линии влияния перемещений* наиболее эффективно строить также с использованием матричной формы, так как в противном случае решение задачи будет связано с довольно громоздкими вычислениями.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под обобщенной силой?
2. Расшифруйте запись: $\delta_{i,k} = \delta_{k,i}$.
3. Определите горизонтальное перемещение и угол поворота сечения на конце консоли, изображенной на рис. 10 ($EI = \text{const}$), путем интегрирования формулы Мора (учтите только изгибающий момент). Определите горизонтальное смещение того же сечения с учетом поперечной силы, приняв сечение квадратным и $G = 0,4E$. Сравните полученные результаты.

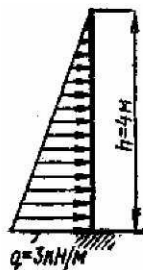


Рис. 10

4. Для рам, изображенных на рис. 11, определите горизонтальное и угловое перемещение сечения А (жесткость ригеля вдвое больше жесткости стоек).

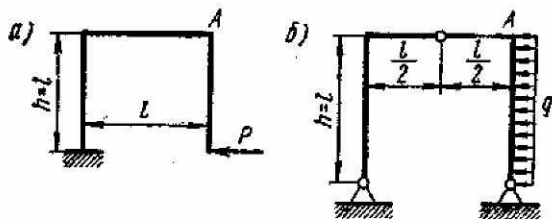


Рис. 11

ЧАСТЬ II

СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Тема 6.

Метод сил

Литература: [1, § 1.8—5.8, 6.8, 7.8, 8.8, 9.8*, 10.8*, 1.9—8.9, 11.9*]; [2, § 12.1—12.4, 15.1—15.6, 17.1—17.4, 19.1—19.9*]; [3, § 1.9—9.9, 1.12—7.12]; [4, § 120—130, 134*, 137]; [5, § 47—53, 65—66]; [6, § 50—67]; [7, § 82—97]; [8, гл. 10]; [9, гл. 9, 17, § 7, 8]; [10, гл. 10].

Методические указания

Изучение темы следует начать с понятия статической неопределимости и методов подсчета числа лишних связей.

Выбор основной системы является важным этапом расчета, так как удачная основная система часто позволяет значительно облегчить весь расчет. Однако для того чтобы научиться оценивать воз-

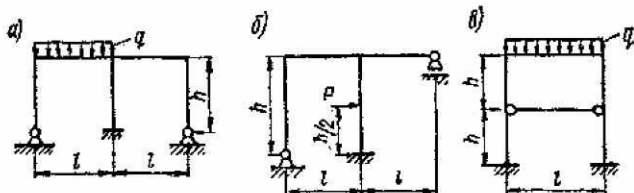


Рис. 12

можные основные системы, сначала надо изучить весь ход расчета и выяснить, какие громоздкие операции можно избежать. Поэтому вначале желательно просто попрактиковаться в выборе различных основных систем для одной и той же рамы (например, рис. 12).

Выбирая ту или иную основную систему, необходимо провести ее анализ, не допуская мгновенно изменяемых систем. На основной системе необходимо показывать лишние неизвестные.

Написание канонических уравнений метода сил обычно не представляет труда, но здесь важно добиться полного понимания их физического смысла и смысла каждого члена уравнения.

Подсчет коэффициентов и свободных членов канонических уравнений обычно производится по способу Верещагина, предусматривающему построение единичных и грузовых эпюр изгибающих моментов в основной системе. Построение этих эпюр требует особого внимания, так как именно здесь чаще всего отмечаются ошибки. После подсчета коэффициентов и свободных членов уравнений необходимо произвести их проверку, что позволяет устранить возможные ошибки и избежать повторных расчетов. Проверять следует и решения системы канонических уравнений.

Построение окончательной эпюры изгибающих моментов производится по формуле

$$M = M_p + \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 + \dots + \overline{M}_n X_n.$$

Удобнее по найденным значениям неизвестных предварительно построить эпюры моментов:

$$M_1 = \overline{M}_1 X_1; \quad M_2 = \overline{M}_2 X_2; \quad \dots, \quad M_n = \overline{M}_n X_n$$

и строить окончательную эпюру по формуле

$$M = M_p + M_1 + M_2 + \dots + M_n.$$

Суммирование эпюр от неизвестных и эпюры от нагрузки производится по точкам. Для криволинейных участков эпюр обычно достаточно найти одну промежуточную ординату и по трем точкам провести плавную кривую. Место и величину экстремального значения момента можно в случае необходимости уточнить после построения эпюры поперечных сил, из которой легко установить то сечение, где момент достигает максимума (минимума).

Прежде чем переходить к построению эпюры поперечных сил, необходимо произвести проверку полученной эпюры моментов. Для метода сил особенно важно произвести кинематическую проверку. Надо уметь производить эту проверку не только путем подсчета интеграла Мора, но и путем общей оценки «на глаз».

Эпюры поперечных сил обычно строятся по эпюрам моментов на основе зависимости Журавского $\left(Q = \frac{dM}{dx}\right)$. Для участков

эпюры моментов, расположенных под равномерно распределенной нагрузкой, удобнее пользоваться зависимостью Журавского в виде

$$Q = Q_0 + \frac{M_{\text{пр}} - M_{\text{лев}}}{l},$$

где Q_0 — поперечная сила в сечении x простой балки от заданной нагрузки; $M_{\text{пр}}$, $M_{\text{лев}}$ — изгибающие моменты на правом и левом концах участка. Важно при этом знать правила знаков поперечных сил и моментов для балки, известные из курса сопротивления материалов. Построение эпюры нормальных сил производится по эпюре поперечных сил. После построения эпюр M , Q и N необходимо проверить равновесие рамы в целом.

Своеобразие расчета статически неопределимых систем на действие температуры и смещение опор заключается в определении свободных членов канонических уравнений.

Построение линий влияния* в статически неопределимых системах связано с довольно большим объемом вычислений. Предварительно приходится строить линии влияния неизвестных, выражая свободные члены канонических уравнений в общей форме. Эффективнее эти расчеты выполнять на ЭВМ.

Большим упрощений в расчете можно добиться удачным использованием симметрии, группировкой неизвестных и введением жестких консолей.

Определение перемещений в статически неопределимых системах* принципиально не отличается от определения перемещений в статически определимых системах, однако построение эпюры моментов

от нагрузки требует решения канонических уравнений. Единичное состояние (приложение единичной силы по направлению искомого перемещения) может быть взято и в основной системе.

Применение новейшей вычислительной техники* значительно снижает трудоемкость основных этапов расчета статически неопределимых систем методом сил. При этом наиболее удобной является матричная формулировка задачи. Здесь на первый план выступает простота записи исходных данных: векторов единичных и грузовых моментов и матрицы податливости.

Вопросы для самопроверки

1. В чем преимущества и недостатки статически неопределимых систем?
2. Определите число лишних неизвестных для систем, изображенных на рис. 12. Выберите несколько основных систем и укажите лишние неизвестные. Постройте единичные и грузовые эпюры моментов.
3. Объясните смысл канонических уравнений метода сил и смысл их членов.
4. Почему в пределах замкнуто го контура рамы не может быть растяжения только внутренних (внешних) волокон?
5. Для рамы после расчета построена окончательная эпюра моментов (рис. 13). По данной эпюре постройте эпюру поперечных сил.
6. В чем заключается преимущество группировки неизвестных при расчете симметричных рам?

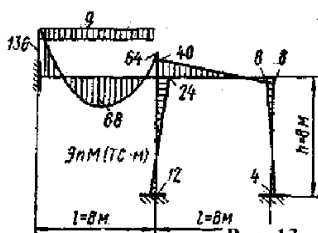


Рис. 13

Тема 7.

Неразрезные балки*

Литература: [2, § 16.1—16.13]; [3, § 1.10—4.10]; [4, § 143—151 154—155]; [5, § 67—70]; [7, §. НО]; [8, гл. 9, задачи 9.1-9.26]; [9 гл. 10]; [10, гл. 11].

Методические указания

Уравнения трех моментов для расчета неразрезных балок получены благодаря удачному выбору основной системы. При использовании этих уравнений очень важно помнить, при каком направлении опорных моментов они выведены. Без этого при решении задач нельзя будет правильно учесть, знаки полученных неизвестных. Необходимо обратить внимание на использование уравнений трех моментов при наличии загруженной консоли и в случае заделки одного или обоих концов.

* Только для специальностей ПГС, ГС, МТ, СХС, АД.

Эпюра моментов для неразрезной балки строится обычно путем сложения грузовой эпюры с эпюрой опорных моментов, являющейся «исправленной» суммарной эпюрой от неизвестных. Построение эпюры поперечных сил производится, как и прежде, по эпюре моментов. Проверка окончательной эпюры моментов выполняется обычным для метода сил путем. Так как единичные эпюры здесь однозначны, то можно сказать, что окончательная эпюра моментов на двух смежных пролетах не может быть однозначна, не может быть однозначной и эпюра моментов в защемлённом одним концом пролете.

Большое практическое значение имеет расчет неразрезных балок при помощи фокусных отношений. Здесь важно научиться определять изгибающие моменты на концах загруженного пролета.

Кроме аналитического метода построения линий влияния опорных реакций и внутренних усилий для неразрезной балки большой эффект дает использование кинематического метода, позволяющего быстро получить характер искомой линии влияния.

Матричный алгоритм расчета неразрезной балки может быть получен по общим для метода сил принципам или матричной записью системы уравнений трех моментов.

В заключение полезно в общих чертах разобрать порядок расчета неразрезных балок на упругоподатливых опорах.

Вопросы для самопроверки

1. Постройте эпюры моментов и поперечных сил для балки с двумя защемленными концами при следующих нагрузках: равномерно распре-

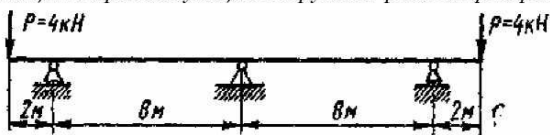


Рис. 14

ленная нагрузка на всем пролете; сосредоточенная сила посередине пролета.

2. Почему на протяжении двух соседних пролетов неразрезной балки эпюра моментов не может быть однозначной?

3. Постройте эпюры M и Q для балки, приведенной на рис. 14.

4. Постройте те же эпюры, используя моментные фокусные отношения.

Тема 8.

Статически неопределимые фермы *

Литература: [1, § 3.8 (пример 5), 8.9, 9.8]; [2, § 18.1—18.5]; [3, § 8.12]; [4, § 158]; [5, § 71—73]; [6, § 87—89]; [7, § 101—103]; [8, гл. 10, задачи 10.46—10.50]; [9, гл. 11]; [10, гл. 12].

Методические указания

Для определения степени статической неопределимости фермы, необходимо использовать зависимость между числом стержней, узлов и опорных связей.

При узловой нагрузке на ферму в ее стержнях возникают лишь продольные усилия, что позволяет упростить определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений метода сил. При выборе основной системы полезно использовать симметрию.

Следует помнить, что в тех случаях, когда за лишнее неизвестное принято усилие в стержне фермы, стержень не выбрасывается, а разрезается и поэтому при определении главных коэффициентов следует включать слагаемое, учитывающее усилие в разрезанном стержне.

Построение линий влияния связано с определением перемещений узлов фермы при действии на нее по направлению лишних неизвестных единичной силы. Эпюру прогибов фермы удобнее строить с помощью упругих грузов. Для сложных случаев эффективен матричный алгоритм расчета.

Вопросы для самопроверки

1. Определите число лишних неизвестных в фермах, приведенных на рис. 15. Выберите основные системы.
2. Почему при узловой нагрузке на ферму перемещения определяются только через нормальную силу?

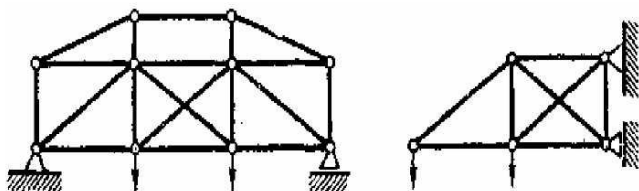


Рис. 15

Тема 9.

Статически неопределимые арки и всякие системы*

Литература: [1, § 3.8, пример 4, § 1.10—7.10]; [2, § 9.2, 17.5—17.13]; [3, § 1.11—7.11]; [4, § 168—177, 179, 183, 188]; [5, § 33, 34, 54—64]; [6, § 81—86]; [7, § 98—100]; [8, гл. 10, задачи 10.51, 10.52]; [9, гл. 11]; [10, гл. 15].

Методические указания

В первую очередь следует обратить внимание на выбор основной системы для различных арок: двухшарнирных, бесшарнирных и арок с затяжкой. Особенностью арок является переменность по длине поперечного сечения и криволинейность всех эпюр, что влечет за собой неприменимость способа Верещагина и сложность (а порой и невозможность) непосредственного интегрирования формулы Мора. Поэтому обычно интегрирование заменяется суммированием по участкам с осредненными характеристиками. Часто в арках необходимо учитывать нормальную силу при определении перемещений, входящих в канонические уравнения. Представляет практический интерес вопрос регулирования напряжений в арочных системах.

С расчетом всяких систем можно ознакомиться лишь в общих чертах.

Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях при расчете статически неопределимых арок следует учитывать нормальную силу? Почему?
2. Могут ли в арках возникать однозначные по всей длине моменты?
3. Какое преимущество дает введение жестких консолей при расчете бесшарнирных арок?

Тема 10.

Метод перемещений *

Литература: [1, § 1.11—11.11]; [2, § 20.1—20.8]; [3, § 1.13—11.13]; [4, § 189—197, 199—200, 202]; [5, § 74-80]; [6, § 68-72]; [7, § 104--107]; [8, гл. 11, задачи 11.3—11.6]; [9, гл. 13]; [10, гл. 14].

Методические указания

Нужно твердо усвоить идею метода перемещений, смысл основной системы и правила определения степени угловой и линейной подвижности рамы (степени кинематической неопределимости). Построение единичных и грузовых эпюр в основной системе производится по специальным таблицам. При определении коэффициентов и свободных членов канонических уравнений следует внимательно следить за знаками побочных коэффициентов. Большое практическое значение при решении задач имеет проверка полученных значений коэффициентов и свободных членов. В методе перемещений проводятся обычно две проверки окончательной эпюры моментов: статическая и кинематическая.

Расчет симметричных рам сильно упрощается, если применить группировку неизвестных. Температурные воздействия также целесообразно привести к симметричным и кососимметричным.

Следует обратить внимание на особенности расчета рам с наклонными стойками, а также на расчет с учетом продольных деформаций.

Изучая вопрос построения линий влияния внутренних усилий*, необходимо ознакомиться со способом, основанным на принципе взаимности.

Матричный алгоритм* расчета методом перемещений схож с алгоритмом метода сил. Здесь нужно обратить внимание на определение единичных реакций путем перемножения эпюр по способу Верещагина.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните смысл величин, входящих в каноническое уравнение метода перемещений, а также смысл самого уравнения.
2. Выберите основные системы для рам, изображенных на рис. 16, укажите неизвестные. Каким методом (сил или перемещений) целесообразно рассчитывать эти рамы?

* Только для специальностей ПГС, ГС, СХС, АД, МТ, СД.

3. Укажите все промежуточные и окончательные проверки, при меняемые в методе перемещений.
4. Как используется теорема о взаимности реакций.

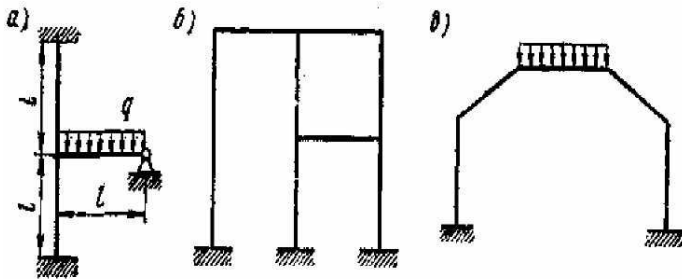


Рис. 16

Тема 11.

Смешанный метод.

Сравнение методов расчета *

Литература: [1, § 12.11—13.11]; [2, § 20.9—20.11, 22.1—22.4]; [3, § 1.14—3.14, 12.13—13.13]; [4, § 206—212]; [5, § 81—82]; [в, § 73, 75, 80]; [7, § 108, 109—115]; [8, гл. 11, задачи 11.17—11.19, гл. 12, задачи 12.16, 12.17]; [9, гл. 14, 15]; [10, гл. 15, 16].

Методические указания

Смешанный метод расчета статически неопределимых рам основан на удачном сочетании преимуществ метода сил для одних и метода перемещений для других типов рам. При изучении порядка расчета

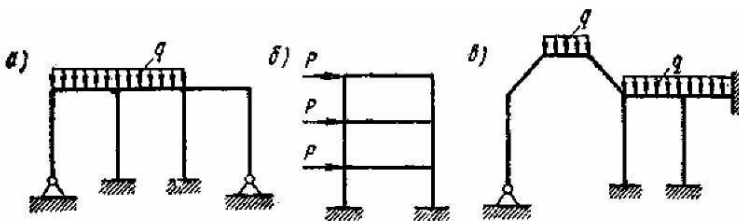


Рис. 17

смешанным методом важно усвоить порядок определения коэффициентов, канонических уравнений и использования теоремы о взаимности реакций и перемещений.

В комбинированном способе используются преимущества метода сил при расчете симметричных рам на кососимметричную нагрузку и метода перемещений — на симметричную нагрузку.

Из приближённых способов следует обратить внимание на расчет многоэтажных рам на горизонтальную (ветровую) нагрузку. Большое применение находит также способ перераспределения моментов, особенно для рам, имеющих линейных смещений.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните теорему о взаимности коэффициентов $\delta_{i,k} = -\varphi_{k,i}$
2. Каким способом целесообразно рассчитывать рамы, приведенные на рис. 17? Почему?

Тема 12.

Пространственные системы *

Литература: [1, § 1.5—5.5, 16.7]; [2, § 11.1—11.10]; [3, § 1.5—5.5]; [4, § 112-118, 225—228]; [5, § 44-46]; [в, § 97, 98]; [7, § 53-55]; [8, гл. 6, 13]; [9, гл. 7]; [10, гл. 9, 18].

Методические указания

Прежде всего необходимо изучить анализ геометрической неизменяемости и типы опор пространственных систем, усвоить правила сложения и разложения сил в пространстве.

Основными способами расчета пространственных статически определимых ферм являются: способ вырезания узлов, разложение систем на плоские фермы и способ замены стержней.

При расчете пространственных статически неопределимых систем методом сил для определения перемещений учитывают обычно изгибающие моменты во всех плоскостях и крутящие моменты. Здесь особое внимание следует обратить на расчет плоских рам на пространственную нагрузку.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите типы опор пространственных систем. Укажите возникающие в них реакции и направления возможных перемещений.
2. Определите усилия в стержнях фермы, приведенной на рис. 18.
3. Разберите порядок расчета рамы, приведенной на рис. 19.

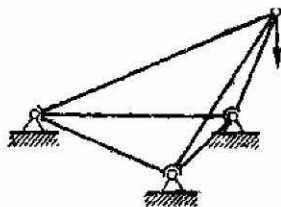
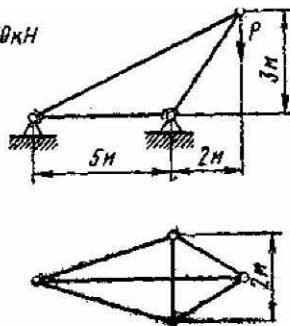


Рис. 18



Тема 13.

Основы расчета стержневых систем по несущей способности *

Литература: [1, § 1.13—7.13]; [2, § 25.1—25.7]; [3, § 1.15—6.15]; [4, § 215-224]; [5, § 83-87]; [7, § 116-120]; [8, гл. 14]; [9, гл. 16]; [10, гл. 17].

Методические указания

Вначале следует изучить условия работы стержней в пластической стадии при растяжении (сжатия) и изгибе. Затем надо разоб-

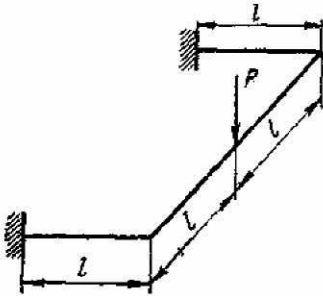


Рис. 19

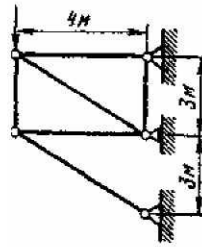


Рис. 20

рять несущую способность статически определимых и статически неопределимых систем: ферм, неразрезных балок, простых рам. Большой практический интерес имеет расчет на повторное нагружение и связанная с ним теорема приспособляемости.

Вопросы для самопроверки

1. Определите пластический момент сопротивления для прямо угловой балки, работающей на изгиб.
2. Определите разрушающую нагрузку для фермы, изображенной на рис. 20.
3. В чем заключается метод расчета по предельным состояниям? Перечислите предельные состояния.

ЧАСТЬ III
**ОСНОВЫ РАСЧЕТА
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СИСТЕМ***

Тема 14.

**Основные вариационные принципы
и методы строительной механики**

Литература: [1, § 5.12]; [11, гл. 5, § 3.4]; [12, гл. 8, § 1—7].

Методические указания

Знакомство с вариационными принципами строительной механики можно ограничить принципами Лагранжа и Кастильяно. Следует рассмотреть приложение принципа Кастильяно к расчету пластинок,

Тема 15.

Основы метода конечного элемента

Литература: [1, § 1.12—10.12].

Методические указания

Идея метода может быть хорошо усвоена на примере плоских систем: ферм и рам. При решении задачи теории упругости (расчет пластин, плит и пр.) применяются конечные элементы треугольной и прямоугольной форм. При использовании метода конечного элемента большое значение имеют уравнения совместности.

Тема 16.

**Расчет призматических оболочек
и плитно-балочных систем**

Литература: [1, § 1.16—6.16]; [И, гл. 1.3]; [12, гл. 10, § 1.4—1.10].

Методические указания

Изучение темы следует начать со знакомства с основными уравнениями теории упругих оболочек, так как на их основе строятся все инженерные способы. Важное значение имеет постановка граничных условий. В ряде практических задач решение значительно облегчается, если применить фундаментальные балочные функции. Большое практическое значение имеет приведение расчета призматических оболочек к расчету плоских рам.

* Только для студентов специальностей ПГС и МТ.

Тема 17.

Расчет систем, состоящих из пологих оболочек двойной кривизны и бортовых балок

Литература: [1, § 5.16]; [11, гл. 5]; [12, гл. 10, § 13].

Методические указания

Прежде всего следует обратить внимание на выбор расчетной схемы при опирании оболочки на бортовые балки или фермы с криволинейным верхним поясом. Решение системы уравнений рационально вести в двойных тригонометрических рядах. Большое значение имеет определение сил взаимодействия оболочек с бортовым элементом.

Вопросы для самопроверки

(к третьей части курса)

1. Укажите основные гипотезы расчета призматических и цилиндрических оболочек.
2. Что такое краевой эффект?
3. Приведите расчетную схему складчатой оболочки.

ЧАСТЬ IV

УСТОЙЧИВОСТЬ И ДИНАМИКА СООРУЖЕНИЙ*

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

УСТОЙЧИВОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

Тема 18.

Методы исследования устойчивости упругих систем

Литература: [1, § 1.14]; [2, § 26.1—26.3]; [5, § 90—92]; [13, раздел 1, § 1.2]; [14, раздел 2, § 1—3]; [15, § 1—5, 19]; [16, ч. I, гл. 1]; [17, § 1-3].

Методические указания

С явлением потери устойчивости студент знаком из курса сопротивления материалов. В строительной механике рассматриваются более сложные случаи потери устойчивости прямых стержней и сложных систем. В первую очередь необходимо ознакомиться с видами равновесия и потерей устойчивости системы «в малом» и «в большом».

Основными методами расчета упругих систем на устойчивость являются: статический, приводящий к решению дифференциальных уравнений изгиба или же к решению эквивалентных им однородных систем канонических уравнений метода сил или метода перемещений; энергетический, при пользовании которым необходимо задаваться

* Только для студентов специальностей ПГС и МТ.

уравнением изогнутой оси системы в момент потери устойчивости, а также динамический (кинематический) метод, связанный с математической задачей об устойчивости движения.

Тема 19.

Устойчивость прямых сжатых стержней

Литература: [1, § 2.14—3.14]; [2, § 26.4—26.6]; [5, § 95]; [13, раздел 1, § 3-7, 10]; [14, раздел 2, § 4-8]; [15, § 6.7, 19-24]; [1в, ч. 1, § 3.6]; [17, § 4-8].

Методические указания

Рассмотрев устойчивость сжатого стержня постоянного сечения, а также составного стержня, следует затем ознакомиться с использованием точного и приближенного выражения для кривизны стержня. Надо обратить внимание на интегрирование дифференциальных уравнений при различных граничных условиях. Полезно ознакомиться, хотя бы кратко, с решением задачи о сжато-изогнутом стержне методом начальных параметров.

Тема 20.

Приближенные методы исследования устойчивости сжатых стержней

Литература: [2, § 26.4]; [14, раздел 2, § 9-13]; [16, ч. 1, § 6].

Методические указания

Приближенные методы исследования устойчивости имеют большое практическое значение. Среди них следует выделить методы Тимошенко, Ритца и Бубнова — Галеркина. При изучении курса строительной механики в объеме 210 ч, как это предусмотрено учебным планом для студентов-заочников, эта тема может рассматриваться в сокращенном виде.

Тема 21.

Более сложные случаи исследования устойчивости сжатых стержней

Литература: [2, § 26.6]; [5, § 93-97]; [13, раздел 1, § 4-10]; [14, раздел 2, § 6—8].

Методические указания

В этой теме разбираются различные более сложные случаи приложения нагрузки и переменное по длине сечения стержня. Используются точные и приближенные способы. Разбираются также вопросы устойчивости при упругом основании и устойчивость с учетом упругопластической стадии работы материала. Как и по предыдущей теме, здесь можно ограничиться лишь общим знакомством с материалом.

Тема 22.

Устойчивость рам и арок

Литература: [1, § 3.14, 4.14]; [2, § 26.7, 26.8]; [5, § 98—100]; [8, гл. 15, задачи 15.10, 15.11, 15.13, 15.14, 15.21—15.23]; [13, раздел 1, § 11—29]; [14, раздел 2, § 14—16, 19, 20]; [15, § 7—11, 25—27]; [16, ч. I, § 4-8]; [17, § 9-16].

Методические указания

Изучение расчета рам на устойчивость можно ограничить случаями узлового приложения сил, направленных по длине стоек. Вычисление перемещений в сжатых стержнях осуществляется с помощью интеграла Мора. Результаты этих вычислений для основных случаев сводятся в таблицы. Как и при расчете на прочность, задача решается методом сил или методом перемещений. Для указанного случая приложения нагрузки всегда удастся выбрать такую основную систему, при которой канонические уравнения не будут содержать свободных членов. Тогда система уравнений получает два возможных решения: а) все неизвестные равны нулю; б) неизвестные отличны от нуля (что соответствует критическому состоянию), а определитель из коэффициентов канонических уравнений равен нулю. Раскрытие определителя дает уравнение устойчивости, включающее специальные функции параметра,

$$\nu = i \sqrt{\frac{P_{кр}}{EI}}$$

Значение функций приводится в таблицах.

Для рам и арок часто приходится решать задачу потери устойчивости второго рода, которая сводится к потере несущей способности вследствие развития больших перемещений при продольно-поперечном изгибе стержня.

Изучение устойчивости арок можно ограничить устойчивостью круговой арки при радиальном давлении и параболической арки при равномерно распределенной по пролету нагрузке. Постановка задач устойчивости в матричной форме, предложенная А. Ф. Смирновым, больше всего подходит к решению на вычислительных машинах. Наглядно этот способ рассмотрен в пособии [16].

Тема 23.

Устойчивость тонкостенных стержней и пластин

Литература: [11, гл. 6, § 1, 2]; [16, гл. 9, § 1—6]; [14, раздел 2, § 27]; [16, ч. I, § 14].

Методические указания

Специальные вопросы устойчивости могут быть изучены в общих чертах. К сожалению, в приведенных выше источниках не все вопросы темы освещены, часть из них, например, устойчивость пластин, рассматривается в курсах теории упругости.

*Вопросы для самопроверки
(к разделу «Устойчивость сооружений»)*

1. В чем состоит энергетический критерий потери устойчивости?
2. Поясните последовательность определения критической силы при расчете статически неопределимой рамы методом сил.
3. Какие требования предъявляются к основной системе при расчете статически неопределимой рамы на устойчивость методом сил?

**РАЗДЕЛ ВТОРОЙ
ДИНАМИКА СООРУЖЕНИЙ**

Тема 24.

Основные понятия

Литература: [1, § 1.15]; [2, § 27.1, 27.2]; [5, § 102]; [13, раздел 2, введение], [14, раздел 1, гл. 1]; [16, ч. II, гл. 1].

Методические указания

В первую очередь необходимо изучить виды и особенности динамических нагрузок. Задачи динамики сооружений делятся в основном на две группы: а) изучение свободных и вынужденных колебаний упругих систем; б) расчет сооружений на действие динамических нагрузок. Эти задачи решаются статическим и энергетическим способами. Очень важным понятием, определяющим трудоемкость той или иной задачи, является степень свободы.

Тема 25.

Колебания систем с одной степенью свободы

Литература: [1, § 2.15—4.15]; [2, § 27.3—27.14]; [5, § 103, 105, 106, 108, 109]; [8, гл. 16, задачи 16.1—16.8]; [13, раздел 2, § 1—5]; [14, раздел 1, §5—16]; [16, ч. IV, § 1-3]; [17, § 23-27].

Методические указания

Изучение свободных и вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы является основным и наиболее важным вопросом всего раздела. Необходимо твердо усвоить определение частот и периодов колебаний.

При расчете на вынужденные колебания определяющее значение имеет динамический коэффициент, позволяющий легко найти усилия и деформации в системе. Необходимо разобрать случаи действия периодической нагрузки, внезапного приложения и исчезновения нагрузки, действие импульса. При оценке прочности сооружения важное значение имеет резонанс и его развитие во времени.

Необходимо также разобрать некоторые задачи с учетом затухания.

Тема 26.

Колебания систем с несколькими степенями свободы

Литература: [1, § 6.15—8.15]; [2, § 28.1—28.4]; [5, § 104, 107]; [8, гл. 16, задачи 16.14, 16.15]; [13, раздел 2, § 7—9, 14, 15, 19—24]; [14, раздел 1, § 20—38]; [16, ч. II, гл. 11]; [17, § 23—33].

Методические указания

Основным в этой теме следует считать изучение свободных колебаний системы и составление уравнения перемещений сосредоточенных масс «вскового уравнения», а также свойства ортогональности форм колебаний. Необходимо хотя бы кратко ознакомиться с порядком расчета сооружений на сейсмические нагрузки.

Тема 27.

Колебания систем с бесконечно большим числом степеней свободы

Литература: [1, § 9.15—14.15]; [2, § 28.5—28.8]; [5, § 110, 111]; [8, гл. 16, задачи 16.16, 16.17]; [13, раздел 1, § 39—46]; [16, ч. II, гл. 3]; [17, § 34-40].

Методические указания

Следует внимательно изучить колебания стержня с распределенной массой и получение уравнений, ознакомиться с общим случаем действия вибрационной нагрузки и порядком расчета статически неопределимых рам.

Тема 28.

Некоторые приближенные методы в динамике сооружений

Литература: [13, раздел 2, § 12—16]; [14, раздел 1, § 55—61]; [16, ч. II, раздел 2].

Методические указания

Приближенные методы решения динамических задач имеют большое распространение, так как они дают возможность избежать громоздких расчетов. Большое применение находят способы замены распределенных масс сосредоточенными. Весьма эффективно динамические задачи решаются графоаналитическим методом, разработанным А. Ф. Смирновым и приспособленным для решения на вычислительных машинах.

Вопросы для самопроверки (к разделу « Динамика сооружений »)

1. Что такое степень свободы упругой системы и как она определяется?
2. Выпишите формулы для определения собственной частоты колебания системы с одной степенью свободы.
3. Как определяется динамический коэффициент при действии импульса?

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Общие указания о порядке выполнения контрольных работ

Количество контрольных работ для студентов различных специальностей, установленное учебным планом, и состав каждой работы выбираются в соответствии со следующей таблицей:

Специальность	Число контрольных работ	Номера задач, входящих в контрольные работы							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ПГС, МТ	8	1,2	4	5,6	7	8	9,10	11	12,13
ГС, СХС, АД	8	1,2	4	5,6	7	8	9	10	11
СД	3	1,2	3	7	—	—	—	—	—
ВК) ТВ и инженерно-экономические специальности	2	1,3	7	—	—	—	—	—	—

Примечание. В случае необходимости или изменения учебных планов кафедры имеют право вносить изменения и дополнения.

Исходные данные для решения задач выбираются студентом из таблиц вариантов (№ 1—13) в соответствии с его личным учебным шифром (номером зачетной книжки). Шифром считаются три последние цифры, например если номер зачетной книжки ПГС-74-1236, то учебным шифром будет 236. Если номер зачетной книжки двузначный, например ГС-73-32, то следует 32 записать дважды (3232) и взять три последние цифры (232). Каждая таблица вариантов разделена на три части. Для получения исходных данных надо выписать из таблицы три строчки: одну, отвечающую первой цифре шифра; вторую, отвечающую второй (средней) цифре, и третью, отвечающую последней — третьей цифре шифра. Например, для номера зачетной книжки ПГС-74-1236 при решении первой задачи «Расчет статически определимой многопролетной балки», согласно табл. 1, получим следующие исходные данные: $l_1 = 14$ м; $q=1$ кН/м; $o=0,8$ м; $l_2=9$ м; $P=6$ кН; номер сечения 3; номер схемы (по рис. 21) б; $a=2,1$ м; $c=2,0$ м; $M=1,1$ кН-м.

Работы, выполненные не по шифру и не в соответствии с табл. 1—13, не зачитываются и возвращаются без рассмотрения.

Прежде чем приступить к выполнению какой-либо контрольной работы, необходимо изучить соответствующий раздел курса и разобрать рекомендованные задачи. В противном случае при выполнении контрольных работ могут возникнуть большие затруднения.

Несамостоятельное выполнение контрольных работ не дает возможности преподавателю-рецензенту вовремя заметить недочеты в подготовке студента, в результате чего студент не приобретает необходимых знаний и оказывается неподготовленным к экзамену.

Рекомендуется представлять на рецензию контрольные работы сразу после их выполнения, по одной, с тем чтобы замечания рецензента могли бы быть учтены при выполнении и оформлении следующей работы.

Каждая контрольная работа должна выполняться на одном листе стандартного размера, с размещением на нем всех чертежей и необходимых расчетов. В соответствии с ГОСТ 2.301—68 рекомендуются следующие форматы листов: 24 (594X841) или 22 (594X420). Можно выполнять контрольные работы и на миллиметровке.

Размещение чертежей и расчетов на одном листе значительно облегчает выполнение работы, так как позволяет избежать многих ошибок, связанных с тем, что при решении задач все числовые величины берутся из чертежей. Для более удачного размещения чертежей и расчетов рекомендуется использовать масштаб от 1:200 до 1:100 (в зависимости от общих размеров схемы).

Перед решением каждой задачи необходимо вычертить заданную схему и указать на ней все размеры и нагрузки. Решение задачи должно сопровождаться краткими, последовательными пояснениями, четкими схемами со всеми размерами. Надо помнить, что язык техники— формулы и чертежи. На эпюрах и линиях влияния должны быть проставлены значения всех характерных ординат и размерности.

В угловом штампе, который располагается в нижней правой части листа, указывается: фамилия и инициалы студента, факультет, специальность, номер зачетной книжки (учебный шифр), домашний адрес, а также год издания используемых методических указаний.

Получив после рецензирования (очного или заочного) контрольную работу, студент обязан выполнить все указанные преподавателем исправления и дополнения, даже если работа зачтена. В случае незачета работы необходимо внести требуемые исправления на том же листе (если позволяет место) или на отдельном и представить всю работу целиком на повторную рецензию. Нельзя стирать или заклеивать отмеченные преподавателем ошибки.

ЗАДАЧИ

1. Расчет статически определенной многопролетной балки

Задание. Для балки, выбранной согласно варианту (рис. 21), требуется:

- а) построить эпюры M и Q (аналитически);
- б) построить линии влияния M и Q для заданного сечения, а также линию влияния одной опорной реакции (по выбору студента);
- в) определить по линиям влияния M , Q и R от заданной нагрузки.

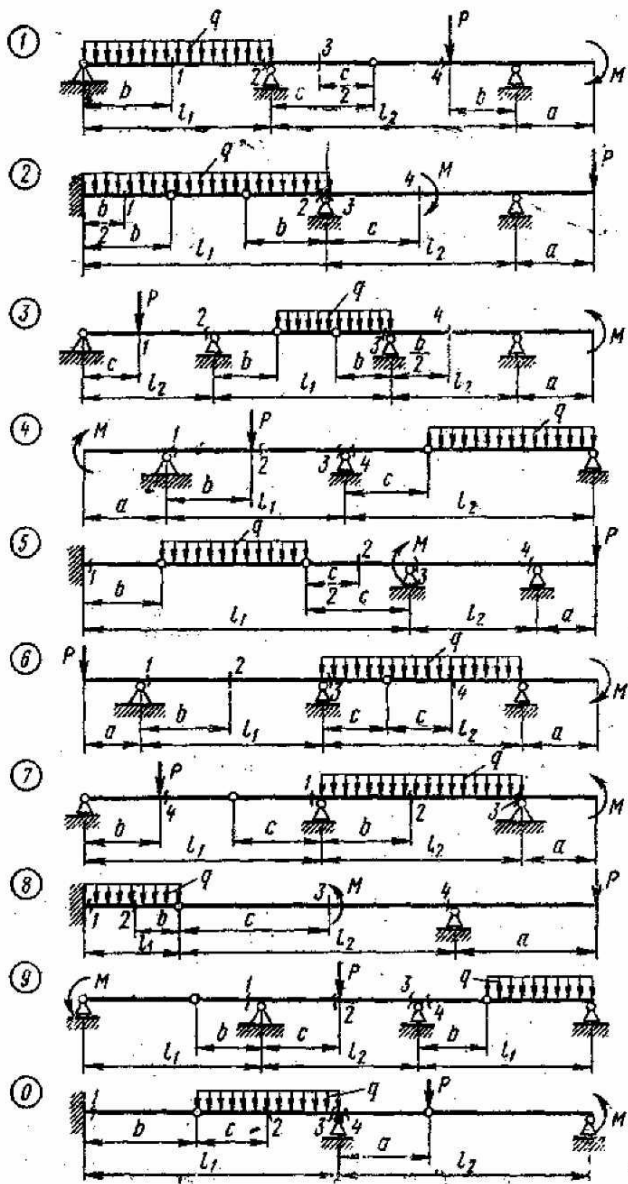


Рис. 21

Исходные данные выбираются в соответствии с шифром из табл. 1.

Таблица 1.

Первая цифра шифра	I, м		Q кН/м		Вторая цифра шифра	I, м		P кН	N человек	Последняя цифра шифра (M скелет)	Q, м		M кН·м
	l ₁	l ₂	q	q ₀		l ₁	l ₂				q	q ₀	
1	10	1,2	1,0		1	8	3	1	1	1	1	2,0	
2	14	2,0	0,8		2	7	2,5	2	2	2	2,2	2,2	
3	8	1,8	1,9		3	9	6	3	3	3	2,0	2,7	
4	12	3,0	1,4		4	6	2,8	4	4	4	2,2	2,4	
5	9	1,5	1,6		5	11	7	1	1	5	1,3	2,5	
6	11	2,5	2,1		6	10	3,3	2	2	6	2,1	1,1	
7	7	1,4	1,2		7	12	5	3	3	7	1,4	2,6	
8	6	0,8	1,8		8	15	8	4	4	8	1,9	1,3	
9	5	1,0	1,5		9	14	4	1	1	9	1,5	2,8	
0	13	2,2	2,0		0	14	3,2	3	3	0	0,8	1,7	

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение «Введения», первой и второй тем программы, а также повторение правил построения и проверки эпюр M и Q из курса сопротивления материалов.

Для построения эпюр M и Q удобнее пользоваться схемой взаимодействия («позтажной» схемой), которую следует расположить непосредственно под схемой заданной балки. При построении «позтажной» схемы нужно вначале выделить основные балки, что легко делается мысленным удалением шарниров, соединяющих балки между собой. Те балки, которые окажутся способными самостоятельно нести нагрузку (защемленные или имеющие две наземные опоры), будут основными. Вспомогательные балки имеют только одну наземную опору или не имеют их вовсе. Недостающими опорами для них служат соединительные шарниры.

После построения «позтажной» схемы заданную балку можно рассматривать как ряд простых балок. Особенность задачи заключается в том, что для расчета нижележащих балок необходимо знать силы взаимодействия в шарнирах, являющихся опорными реакциями для вышележащих балок и нагрузкой для нижележащих. Для расчета схемы каждой отдельной балки должны быть вычерчены отдельно, а эпюры M и Q можно строить на общей базе под «позтажной» схемой.

Ординаты эпюры моментов откладываются со стороны растянутых волокон (положительные вниз от оси). Знаков на эпюре моментов обычно не ставят, но обязательно надо проставлять значения характерных ординат с указанием размерности. При построении эпюры поперечных сил положительные ординаты откладываются вверх и на эпюрах обязательно проставляются знаки.

Для построения линий влияния следует вычертить еще раз «позтажную» схему, но уже без нагрузки. Обычно линии влияния стро-

ятся и два этапа. На первом этапе Строится линия влияния искомого усилия в пределах той отдельной балки, к которой относится исследуемое сечение (или опора). На втором этапе добавляется продолжение линии влияния, обусловленное взаимодействием отдельных балок.

Все расчеты должны сопровождаться необходимыми расчетными формулами в общем и численном виде.

2. Расчет трехшарнирной арки или трехшарнирной рамы

Задание. Для сплошной трехшарнирной арки или рамы (рис. 22) требуется:

а) определить аналитически моменты, поперечные и нормальные силы в сечениях K_1 и K_2 от действия постоянной нагрузки;

б) построить линии влияния M , Q и N для сечения K_2 и по ним найти значения M , Q и N от той же постоянной нагрузки.

Исходные данные, согласно шифру, выбираются по табл. 2.

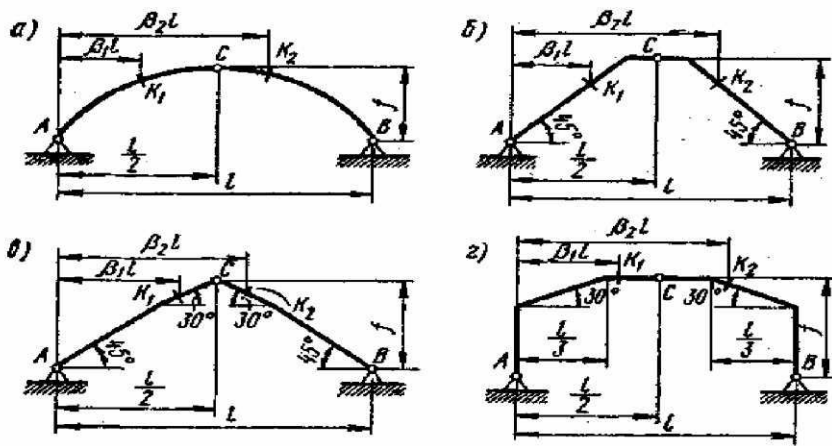


Схема нагрузки

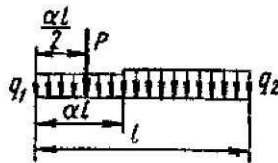


Рис.22

Таблица 2

Первая шифра шифра				Вторая шифра шифра				Последняя шифра шифра	Схема по рис. 22	Очертание оси	$\frac{f}{l}$	Р кН
	l , м	a	ρ_1		ρ_2	φ_1 , кН/м	φ_2 , кН/м					
1	26	0,20	0,20	1	0,65	0	4	1	a	Парабола	0,34	4
2	36	0,50	0,30	2	0,68	4	0	2	a	Окружность	0,35	3
3	18	0,30	0,22	3	0,70	0	5	3	b	Рама	0,39	5
4	28	0,60	0,25	4	0,72	5	0	4	e	<	0,40	6
5	20	0,40	0,15	5	0,80	0	6	5	z	<	0,32	7
6	32	0,70	0,40	6	0,84	6	0	6	a	Парабола	0,36	8
7	22	0,80	0,35	7	0,86	7	0	7	a	Окружность	0,38	2
8	34	0,25	0,12	8	0,75	0	7	8	b	Рама	0,33	5
9	24	0,35	0,33	9	0,85	8	0	9	e	<	0,30	8
0	30	0,45	0,45	0	0,90	0	8	0	z	<	0,31	4

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 4.

Схему арки надо вычертить, определив по уравнению ее оси достаточное число точек (не менее пяти, включая замковый шарнир С) и проведя через них плавную кривую. На схему надо нанести все заданные размеры и нагрузку. Для точек K_1 и K_2 надо вычислить координаты и, кроме того, значения синусов и косинусов углов наклона касательных.

Ординаты точек оси арки и углы наклона касательных определяются по следующим уравнениям:

а) при очертании оси по параболе

$$y = \frac{4f}{l^2} x(l-x);$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy}{dx};$$

б) при очертании оси по окружности

$$y = \sqrt{R^2 - \left(\frac{l}{2} - x\right)^2} - R + f,$$

где

$$R = \frac{f}{2} + \frac{l^2}{8f};$$

$$\sin \varphi = \frac{l-2x}{2R}; \quad \cos \varphi = \frac{y+R-f}{R}$$

Для ординаты и необходимые углы наклона определяются непосредственно из чертежа. Следует помнить, что трехшарнирных рам

для правой половины арки (в рамы) угол наклона касательной отрицателен.

Вычисление значений опорных реакций, моментов, поперечных и продольных сил в заданных точках надо иллюстрировать необходимыми формулами.

Для построения линий влияния M , Q и N надо сначала построить линию влияния распора и подсчитать значение ее характерной ординаты. На окончательных линиях влияния должны быть проставлены числовые значения всех характерных ординат, определение которых должно быть приведено в расчете. Линии влияния надо строить под схемой арки (рамы) в том же линейном масштабе.

3. Расчет простой плоской статически определимой фермы

Задание. Для фермы (рис. 23) с выбранными по шифру из табл. 3 размерами и нагрузкой требуется:

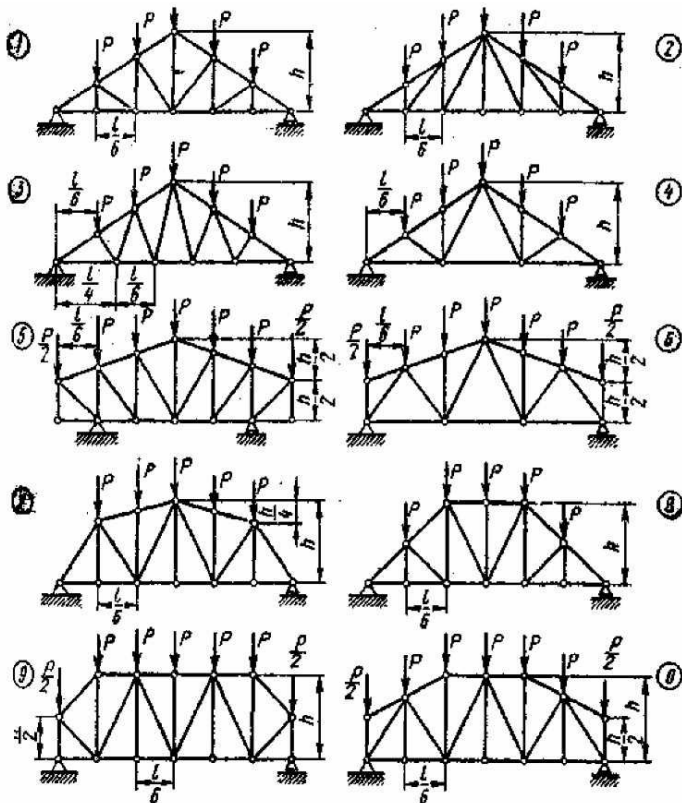


Рис. 23

Таблица 3

Первая цифра шифра	$l, м$	$P, кГ$	Вторая цифра шифра	$\#$ узелов (считая слева)	Последняя цифра шифра ($\#$ схемы)	$\lambda, м$
1	30	1,8	1	2	1	3
2	28	1,5	2	3	2	5,5
3	27	1,2	3	4	3	3,5
4	24	1,0	4	5	4	4
5	21	1,9	5	2	5	6
6	18	2,0	6	3	6	4,2
7	32	1,1	7	4	7	4,6
8	33	1,3	8	5	8	4,5
9	22	1,4	9	2	9	5
0	23	1,6	0	3	0	4,4

- определить (аналитически) усилия в стержнях заданной панели, включая правую стойку (4 стержня);
- построить линии влияния усилий в тех же стержнях;
- по линиям влияния подсчитать значения усилий от заданной нагрузки и сравнить их со значениями, полученными аналитически.

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 3.

Усилие в каждом стержне следует определять непосредственно через нагрузку и опорные реакции, а не одно через другое, т. е. для каждого усилия надо найти свой способ из трех известных (моментной точки; проекций; вырезания узлов).

При определении усилий необходимо показывать используемые сечения, приводить соответствующие уравнения, а все величины, входящие в них, должны быть указаны на чертеже. Необходимые геометрические характеристики и размеры надо определять аналитически, а не брать по масштабу.

Построение линий влияния должно сопровождаться необходимыми расчетными формулами. Линии влияния строятся под схемой фермы; на них должны быть проставлены числовые значения ординат под всеми узлами. Найденные значения усилий по линиям влияния надо сравнить с результатами аналитического определения.

4. Расчет сложной статически определимой плоской фермы

Задание. Для шпренгельной фермы (рис. 24) с выбранными по шифру из табл. 4 размерами и нагрузкой требуется:

- определить (аналитически) усилия во всех стержнях заданной панели от действия постоянной нагрузки;
- построить линии влияния усилий в тех же стержнях;
- установить наиболее опасное положение временной нагрузки

для каждого стержня отдельно и найти величины максимальных и минимальных усилий;

г) определить максимальные и минимальные значения расчетных усилий во всех стержнях заданной панели (с учетом постоянной нагрузки).

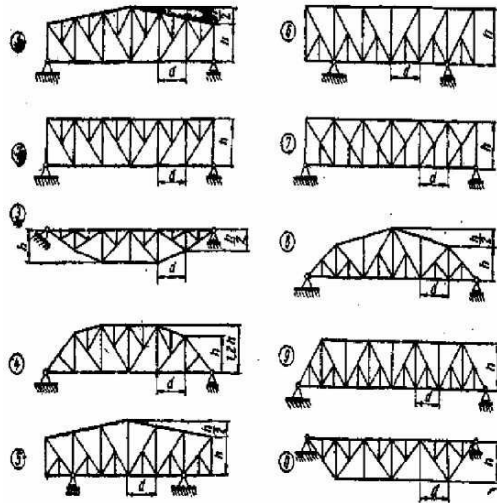


Рис. 24

Таблица 4

Первая цифра шифра	$d, \text{ м}$	Постоянная нагрузка P кН	Вторая цифра шифра	№ панели (считая слева)	$h, \text{ м}$	Последняя цифра шифра и № схемы	Временная нагрузка $P_{вр}$ кН
1	3,0	12	1	2	3,2	1	16
2	3,5	12,5	2	3	4,0	2	17
3	4,0	13,0	3	4	3,8	3	18
4	4,5	13,5	4	5	3,3	4	18,5
5	3,6	11,5	5	2	3,6	5	17,5
6	4,2	11,0	6	3	3,0	6	19
7	2,7	20	7	4	4,2	7	20
8	3,2	19	8	5	4,1	8	22,5
9	3,3	18	9	2	3,7	9	24
0	3,4	17,5	0	3	3,5	0	23

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 3.

Постоянная и временная нагрузки для схем 5—9 приложены в узлах нижнего пояса, а для остальных схем — в узлах верхнего пояса.

Панелью фермы считается расстояние между узлами основной решетки, следовательно, должно быть определено восемь усилий.

Усилия в каждом стержне следует определять непосредственно через нагрузку и опорные реакции, а не через какое-либо другое, уже найденное усилие. Этого не удастся сделать лишь в некоторых случаях, например для средних стоек в схемах 1,5.

Особенность расчета шпренгельных ферм является то, что для некоторых стержней нельзя провести удачного сечения (пересекающего не более трех стержней). В связи с этим появляется необходимость переходить к схеме взаимодействия шпренгеля с основной решеткой. Для успешного расчленения заданной фермы на основную и шпренгель необходимо твердо усвоить типы шпренгелей.

Следует иметь в виду, что в большинстве случаев (для всех заданных ферм) усилия в элементах, входящих и в шпренгель и в основную решетку, удастся определить, рассматривая непосредственно заданную ферму. В связи с этим рекомендуется сначала рассмотреть заданную схему и найти все усилия, для которых возможно провести удачное сечение. Остальные усилия определяются из рассмотрения только шпренгеля или только основной решетки. При этом в работе обязательно нужно приводить схемы шпренгеля и основной решетки отдельно с указанием узловой нагрузки, полученной в результате передачи местной нагрузки со шпренгеля в узлы основной решетки.

Производя определение усилий, надо приводить все схемы, разрезы и указывать все величины, входящие в расчетные формулы. Геометрические характеристики (плечи, углы и пр.) должны быть определены аналитически, а не по масштабу.

При построении линий влияния схемы фермы (заданная, основная и шпренгель) должны быть вычерчены заново, без нагрузки. Должны быть приведены все сечения и расчеты, а на полученных линиях влияния должны быть проставлены числовые значения ординат под каждым узлом фермы.

Для определения максимального усилия от временной нагрузки надо загрузить все узлы, которым соответствуют положительные значения ординат линии влияния. Для определения минимальных усилий — узлы, соответствующие отрицательным ординатам линии влияния.

Максимальное расчетное усилие определяется суммой усилий от постоянной нагрузки и максимального усилия от временной нагрузки. Минимальное расчетное усилие равно сумме усилия от постоянной нагрузки и минимального усилия от временной нагрузки. Максимальные и минимальные расчетные усилия должны быть определены для всех восьми стержней и сведены в таблицу.

Таблица подсчета расчетных усилий (показан пример записи)

Наименование стержня	Усилия от постоянной нагрузки, кН	Усилия от временной нагрузки, кН		Расчетные усилия, кН	
		максимальное	минимальное	максимальное	минимальное
Первый	5,5	8,3	-0,2	13,8	5,3
Второй	-6,4	0,4	-9,2	-6,0	-15,6
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·

5. Определение перемещений в статически определимой балке

Задание. Для балки (рис. 25) с выбранными из табл. 5 по шифру данными определить прогиб или угол поворота одного из сечений.

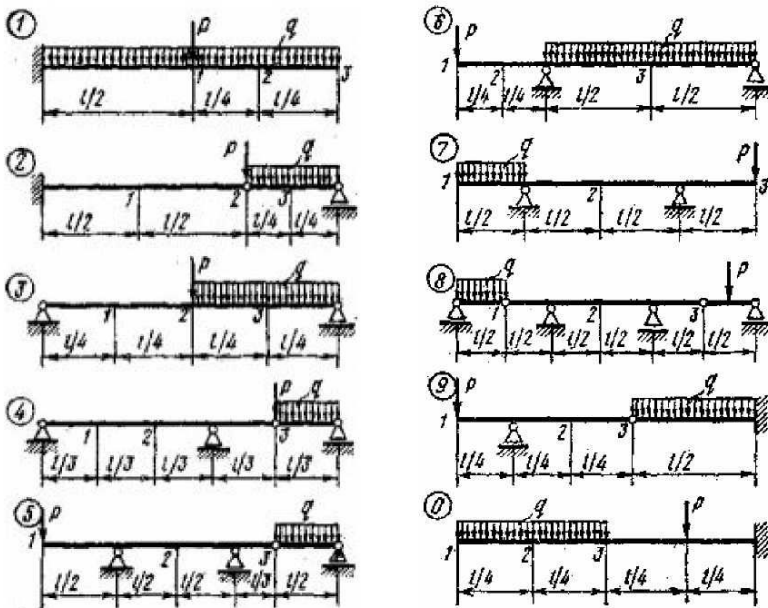


Рис. 25

Таблица 5

Первая шифра шифра	l м	q кН/м	Вторая шифра шифра	P кН	№ сечения	Последняя шифра шифра (№ схемы)	Вид перемещения
1	10	1,0	1	4,0	1	1	Прогиб
2	8,0	1,2	2	4,5	2	2	«
3	9,6	1,6	3	5,0	3	3	«
4	12,0	2,0	4	3,6	1	4	«
5	12,4	2,4	5	2,0	2	5	«
6	13,0	2,8	6	3,2	3	6	Угол поворота
7	14,0	3,0	7	8,0	1	7	«
8	15,0	3,6	8	6,0	2	8	«
9	16,0	5,0	9	3,0	3	9	«
0	18,0	4,0	0	2,0	1	0	«

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 5.

Все перемещения следует определять по формуле Мора с использованием метода Верещагина. Построение эпюр моментов (грузовых и единичных) следует сопроводить расчетами. Сама эпюры надо строить со стороны растянутых волокон.

Сложные эпюры для «умножения» их на единичные рекомендуется делить на части с тем, чтобы обеспечить определение их площадей и положений центров тяжести. Можно определять перемещения отдельно от силы P и, нагрузки q с последующим сложением результатов.

Все эпюры должны быть четкими, иначе трудно подсчитывать их площади и положения центров тяжести отдельных площадей.

6. Определение перемещений в статически определимой раме

Задание. Для рамы (рис. 26) с выбранными по шифру из табл. 6 размерами и нагрузкой требуется определить горизонтальное перемещение или угол поворота одного из сечений.

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 5.

При выполнении данной задачи надо следовать указаниям к задаче 5. Кроме того, поскольку в данной задаче жесткости отдельных стержней различны и заданы только их соотношения, искомые перемещения должны быть выражены через EI_1 или EI_2 .

Особое внимание здесь следует обратить на построение эпюр изгибающих моментов, поскольку в курсе сопротивления материалов обычно ограничиваются построениями эпюр в сравнительно простых

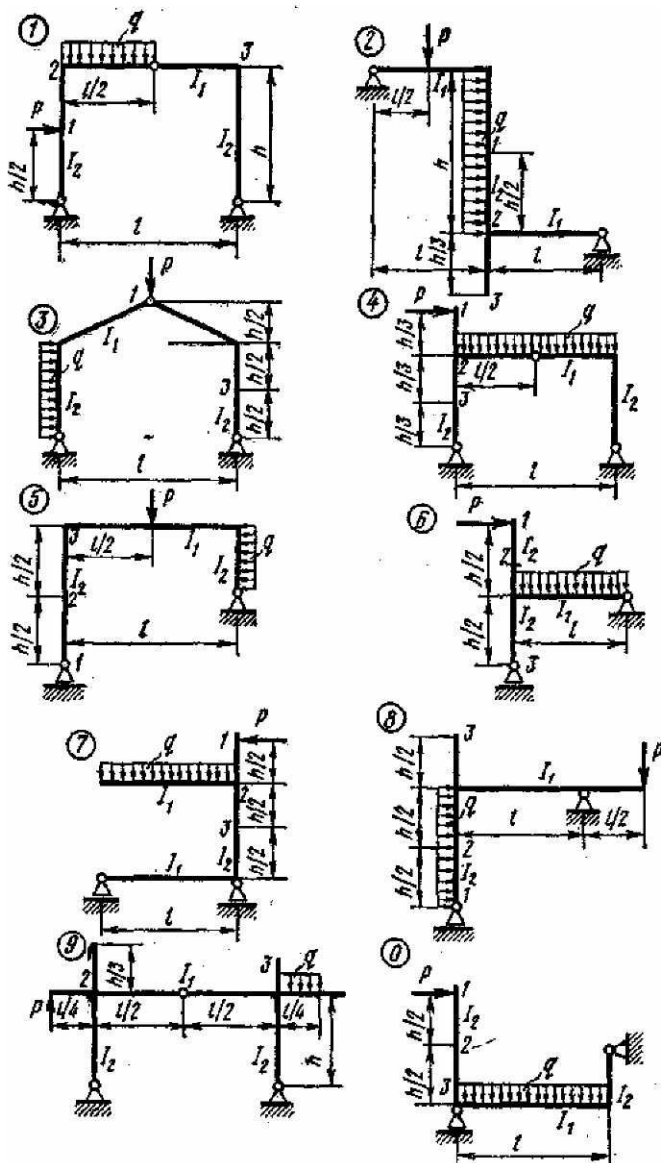


Рис. 26
 На схеме 7 правая опора неподвижна

Таблица 6

Первая цифра шифра			Вторая цифра шифра	R кН	L м	N сечений	Последняя цифра шифра (№ схемы)	Вид перемещения	I ₁ : I ₂
	l м	q кН/м							
1	9,0	1,0	1	9	6,0	1	1	Угол поворота	1:2
2	9,5	1,2	2	2	5,5	2	2	«	2:1
3	8,0	1,5	3	5	5,0	3	3	«	1:3
4	8,5	1,8	4	4	9,5	1	4	«	3:1
5	5,0	2,0	5	3	9,0	2	5	«	2:3
6	5,5	2,4	6	10	8,5	3	6	Горизонтальное перемещение	3:2
7	6,0	3,0	7	7	8,0	1	7	То же	3:5
8	7,5	2,5	8	8	6,5	2	8	«	5:3
9	6,2	3,2	9	1	10,0	3	9	«	3:4
0	6,5	3,5	0	6	7,0	1	0	«	4:3

балках. Прежде чем строить любую эпюру (от нагрузки или единичную), как известно, необходимо определить опорные реакции. При этом надо не забывать о возможности возникновения горизонтальных составляющих опорных реакций в соответствующей опоре или в обеих (когда задана трехшарнирная рама).

Если требуется определить угол поворота в сечении / для схемы 3, то речь идет о взаимном повороте примыкающих к шарниру сечений.

При решении данной задачи полезно и весьма эффективно применить матричную форму расчета.

7. Расчет плоской статически неопределимой рамы методом сил

Задание. Для рамы (рис. 27) с выбранными по шифру из табл. 7 размерами и нагрузкой требуется:

а) построить эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил;

б) проверить правильность построенных эпюр.

Методические указания

Решению задач должно предшествовать изучение темы 6.

Для упрощения расчета рекомендуется принять симметричную основную систему. Можно применить и разложение нагрузки и неизвестных на симметричные и косимметричные.

При построении единичных и грузовых эпюр необходимо приводить определение опорных реакций. Эпюры должны быть построены со стороны растянутых волокон. При «перемножении» эпюр следует пользоваться способом Верещагина. После определения коэффи-

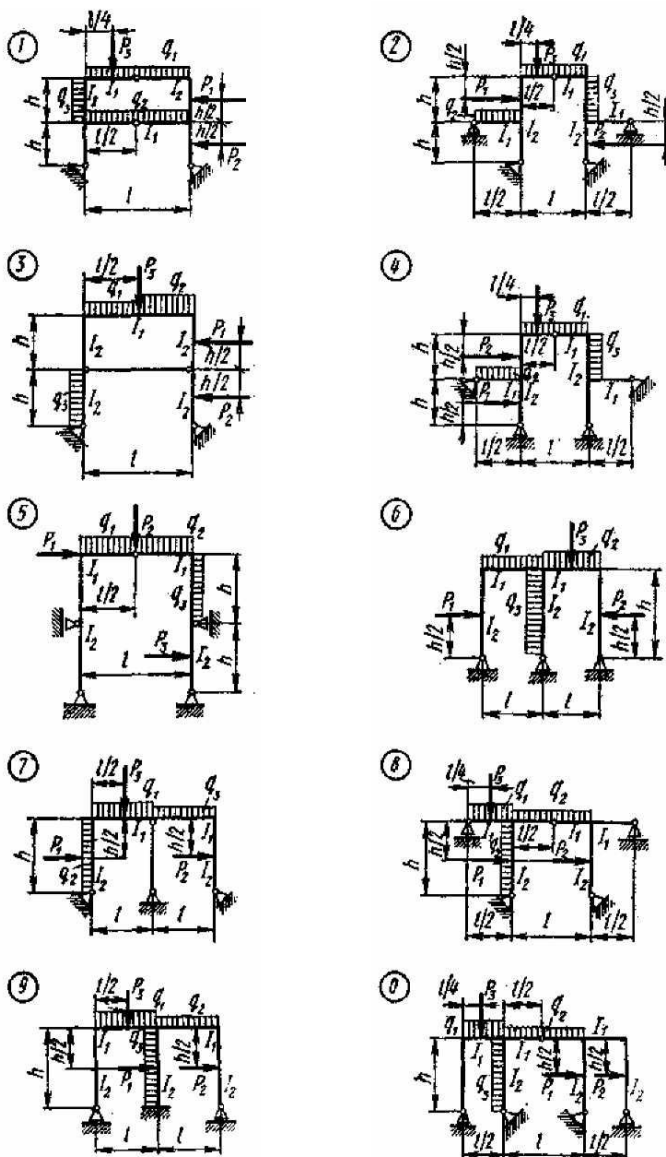


Рис.27

Таблица 7

Первая цифра шифра	P_1	P_2	P_3	I_1	Вторая цифра шифра	Q_1	Q_2	Q_3	K_1	Последняя цифра шифра (№ стемы)	$I_1 : I_2$
	кН					кН/м					
1	4	0	0	8	1	0	2	0	10	1	1:2
2	0	5	0	12	2	0	0	2	8	2	2:3
3	0	0	6	9	3	0	0	4	6	3	1:3
4	5	0	0	10	4	4	0	0	9	4	1:3
5	0	6	0	7	5	0	2	0	4	5	2:3
6	0	0	4	6	6	0	0	1	5	6	1:3
7	6	0	0	5	7	2	0	0	7	7	2:1
8	0	4	0	11	8	0	1	0	11	8	3:2
9	0	0	5	4	9	0	4	0	12	9	3:4
0	4	0	0	13	0	1	0	0	13	0	1:2

циентов канонических уравнений рекомендуется произвести их проверку путем подсчета интеграла (по Верещагину)

$$\sum \int \bar{M}_S^2 \frac{dS}{EI}$$

где $\bar{M}_S = \bar{M}_1 + \bar{M}_2 + \dots + \bar{M}_n$. Результат должен совпадать с суммой

$$\delta_{1,1} + \delta_{2,2} + \delta_{3,3} + \dots + \delta_{n,n} + 2(\delta_{1,2} + \delta_{1,3} + \dots + \delta_{(n-1),n})$$

Проверка правильности определения свободных членов (грузовых перемещений) проводится по формуле

$$\sum \int \bar{M}_S M_P \frac{dS}{EI} = \Delta_{1,P} + \Delta_{2,P} + \dots + \Delta_{n,P}$$

Обычно после определения неизвестных строят эпюры моментов от найденных значений X_i , умножая ординаты каждой единичной эпюры на соответствующее значение неизвестного. Тогда момент в любой точке будет определяться формулой

$$M = M_p + M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

Окончательную эпюру моментов необходимо проверить путем «умножения» ее на одну из единичных эпюр или на суммарную эпюру M_s . Результат умножения должен быть равен нулю (или быть близким к нулю).

Построение эпюры поперечных сил (по эпюре моментов) необходимо сопровождать расчетами. При этом особое внимание надо обратить на правило знаков. При возрастании момента поперечная сила положительна. При построении эпюры M со стороны растянутых волокон возрастание момента характеризуется наклоном вниз (слева направо). На участках, где эпюра M криволинейна (под равномерно распределенной нагрузкой), определение ординат эпюры Q

удобнее производить по формуле:

$$Q_x = Q_x^0 + \frac{M_{\text{пр}} - M_{\text{лев}}}{l}$$

где Q_x^0 — «балочная» поперечная сила (найденная для данного участка как для простой балки на двух опорах); $M_{\text{пр}}$ — момент на правом конце участка (положительный, если он растягивает нижние волокна); $M_{\text{лев}}$ — момент на левом конце участка (положительный при растяжении нижних волокон); l — длина участка.

Эпюра N строится по эпюре поперечных сил путем вырезания узлов (как принято при расчете ферм), начиная с узла, в котором количество неизвестных продольных сил не превышает двух. При вырезании каждого узла необходимо учитывать, что положительная поперечная сила вращает узел по ходу часовой стрелки, а отрицательная — против.

После построения всех эпюр необходимо провести полную проверку, рассмотрев равновесие рамы целиком.

8. Расчет неразрезной балки

Задание. Для неразрезной балки (рис. 28) с выбранными по s шифру из табл. 8 размерами и нагрузкой требуется:

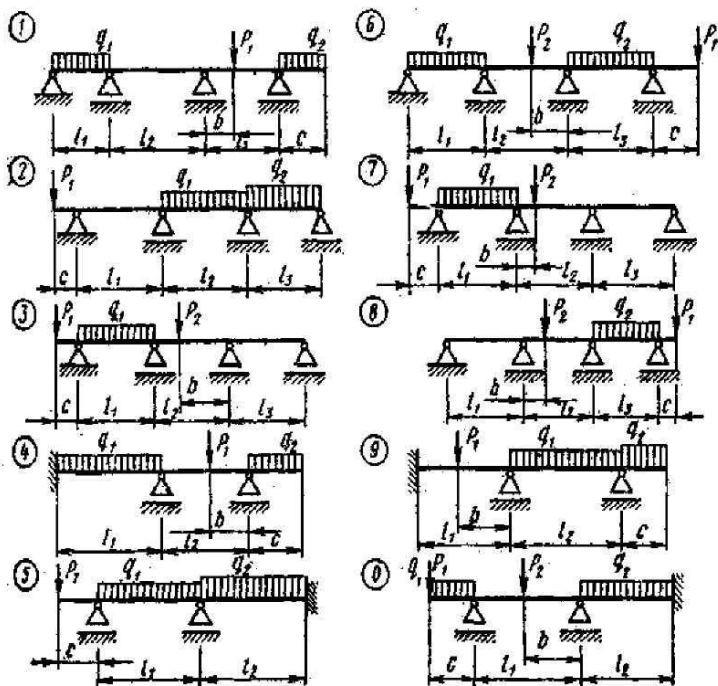


Рис. 28

Таблица 8

Первая цифра шифра	l_1 , м	q , кН/м	Временная нагрузка $q_{вр}$, кН/м	Вторая цифра шифра	l_2 , м	R_1 , кН	e , м	q_0 , кН/м	Последняя цифра шифра (№ схемы)	l_3 , м	R_2 , кН
1	6	2	1,0	1	5	4	1	1,1	1	7	0
2	7	3	1,2	2	6	8	2	1,3	2	9	0
3	8	4	1,4	3	9	5	2	0,8	3	10	12
4	9	3	1,6	4	10	9	2	1,7	4	0	0
5	10	2	1,8	5	8	7	1	1,8	5	0	0
6	11	3	1,7	6	7	6	1	1,2	6	8	14
7	5	4	1,1	7	11	10	2	0,9	7	11	11
8	12	3	1,3	8	12	3	3	1,4	8	12	9
9	7,5	2	1,5	9	13	9	1	1,0	9	0	0
0	13	3	1,9	0	7,5	12	2	1,5	0	0	8

а) найти с помощью уравнений трех моментов опорные моменты и построить эпюры M и Q от постоянной нагрузки (указанной на чертеже);

б) найти моментные фокусные отношения и построить эпюры от последовательного нагружения каждого пролета (и консолей) временной нагрузкой;

в) построить объемлющую (огibaющую) эпюру моментов для второго пролета (считая слева).

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 7.

При решении задачи под заданной балкой необходимо изобразить основную систему и эпюры моментов от нагрузки. Подставляя известные величины в уравнения трех моментов, надо обратить внимание на знак моментов на крайних опорах при наличии нагруженных консолей.

После решения уравнений трех моментов полученные значения неизвестных надо обязательно подставить во все уравнения и убедиться в правильности решения.

При построении эпюры моментов ординаты следует откладывать со стороны растянутых волокон, т. е. положительные - вниз. Сначала надо отложить значения опорных моментов и соединить концы полученных ординат пунктирной линией. От полученной линии опорных моментов откладываются эпюры моментов, построенные для каждого пролета в основной системе.

Для второго пролета, для которого требуется строить объемлющую эпюру моментов, нужно определить ординаты окончательной эпюры в точках с интервалом $0,25l$. Эпюра поперечных сил строится по эпюре моментов так же, как и в задаче 7.

Для построения эпюр моментов от попролетного нагружения балки временной нагрузкой сначала необходимо вычислить моментные фокусные отношения (правые и левые) для каждого пролета. Определение моментов на нагруженном временной нагрузкой пролете мож-

но произвести по формулам:

$$M_{n-1} = -6 \frac{A_n^\phi K_n' - B_n^\phi}{l_n (K_n K_n' - 1)}; \quad M_n = -6 \frac{B_n^\phi K_n - A_n^\phi}{l_n (K_n K_n' - 1)}$$

где A_n^ϕ, B_n^ϕ — фиктивные опорные реакции, равные (при равномерно распределенной нагрузке)

$$A_n^\phi = B_n^\phi = \frac{q l_n^3}{24}$$

или же путем решения уравнений трех моментов.

Эпюры изгибающих моментов от временной нагрузки следует строить одну под другой в следующем порядке: а) эпюра от загрузки левой консоли (если она есть); б) эпюра от загрузки первого пролета и т. д.

Все эпюры моментов строятся в том же масштабе, что и эпюра моментов от постоянной нагрузки и должны иметь величины моментов на каждой опоре, а для второго пролета — еще и в точках с интервалом 0,2%.

Ординаты объемлющей эпюры рекомендуется определять в табличной форме.

Таблица подсчета ординат объемлющей эпюры моментом
(показан пример записи)

Сечения	Момент от постоянной нагрузки	Моменты от загрузки временной нагрузкой, кН·м					M_{\max} кН·м	M_{\min} кН·м
		левой консоли	первого пролета	второго пролета	третьего пролета	правой консоли		
...
l	12	5	-6	8	-10	3	28	-4
k	-18	-6	4	-10	-12	5	-9	-46
...

При подсчете максимального изгибающего момента для какого-либо сечения берется момент от постоянной нагрузки и все положительные моменты от загрузки отдельных пролетов временной нагрузки; для минимального момента берется момент от постоянной нагрузки и все отрицательные значения моментов от временной нагрузки. Для примера в указанной таблице приведены подсчеты ординат максимальных и минимальных значений моментов для точек l и k . Соединя последовательно ординаты M_{\max} , получим объемлющую эпюру M_{\max} . Аналогично получим и эпюру M_{\min} .

Обе объемлющие эпюры строятся на одной базе.

9. Расчет статически неопределимой арки

Задание. Для двухшарнирной арки или арки с затяжкой (рис. 29) с выбранными по шифру из табл. 9 размерами и нагрузкой, требуется построить эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.

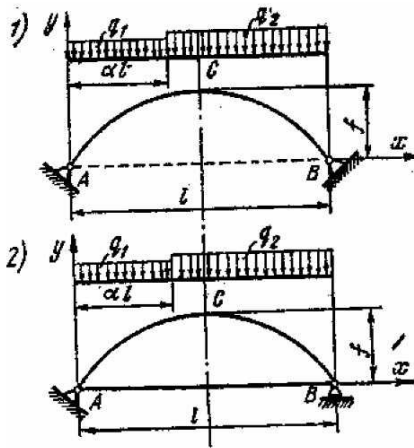


Рис. 29

Таблица 9

Первая цифра шифра	l , м	α	Вторая цифра шифра	$\frac{l}{l}$	q_1 , кН/м	q_2 , кН/м	Последняя цифра шифра	Очертание оси	№ схемы
1	16	0,25	1	0,20	2	0	1	Окружность	1
2	18	0,30	2	0,30	0	3	2	Парабола	1
3	20	0,35	3	0,16	4	0	3	Окружность	2
4	22	0,40	4	0,25	0	5	4	Парабола	2
5	24	0,45	5	0,45	6	0	5	Окружность	1
6	26	0,50	6	0,32	0	6	6	Парабола	1
7	28	0,55	7	0,15	3	0	7	Окружность	2
8	30	0,60	8	0,18	0	4	8	Парабола	2
9	32	0,65	9	0,22	5	0	9	Окружность	1
0	34	0,70	0	0,14	0	2	0	Парабола	1

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 9.

При вычерчивании оси арки необходимо руководствоваться указаниями к задаче 2 (см. с. 36). В целях сокращения объема вычислительной работы можно ограничиться рассмотрением лишь шести точек оси арки, включая сюда я два опорных шарнира.

Особенностью расчета арок методом сил является невозможность применения способа Верещагина для определения единичных и грузовых перемещений, входящих в канонические уравнения. Прямое интегрирование формулы Мора, как правило, оказывается невозможным из-за сложности закона изменения сечения арки по длине. Таким образом интегрирование приходится заменять суммированием по участкам со средними значениями величин, входящих в формулу Мора:

$$\delta_{iB} = \sum \frac{\bar{M}_i \bar{M}_K \Delta S}{EI}; \Delta_{i, p} = \sum \frac{\bar{M}_i M_p \Delta S}{EI}$$

Наиболее удачной основной системой для двухшарнирной арки следует считать кривой брус, приняв за неизвестное горизонтальную реакцию в одной из опор (распор); для арки с затяжкой за неизвестное обычно принимают усилие в затяжке.

Подсчет коэффициентов и свободных членов удобнее проводить в табличной форме, построив предварительно эпюры M_p и Q_0 в основной системе. При указанных основных системах такими эпюрами будут эпюры M и Q для балки на двух опорах.

Форму сечения арки следует принять прямоугольной с высотой, меняющейся по закону

$$d = d_0 \cos \varphi,$$

где d_0 — высота сечения посередине.

В первую очередь вычисляются ординаты исследуемых точек оси арки и угловые характеристики касательных в данных точках. В зависимости от заданного очертания (парабола или окружность) рекомендуется следующая форма таблиц:

а) при очертании оси по параболе

№ точки	x	$l-x$	$x(l-x)$	$y = \frac{4f}{l^2} x(l-x)$	$l-2x$	$\tan \varphi = \frac{4f}{l^2} (l-2x)$	φ	$\sin \varphi$	$\cos \varphi$
1									

б) при очертании оси по окружности

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		x	$\frac{l-x}{2}$	$\left(\frac{l-x}{2}\right)^2$	$\sqrt{R^2 - \left(\frac{l-x}{2}\right)^2}$	$y = \sqrt{R^2 - \left(\frac{l-x}{2}\right)^2} - R + f$	$l-2x$	$\sin \varphi = \frac{l-2x}{2R}$	$y+R-f$	$\cos \varphi = \frac{y+R-f}{R}$

Продолжение табл.

№ точки	11	12	13	14	15
	$\frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi}$	y^3	$y^3 \frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi}$	M_p	$y M_p \frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi}$
	Сумма		$EI_0 \delta_{1,1}$	Сумма	$EI_0 \Delta_{1p}$

Продолжение табл.

№ точки	$y X_1$	$M = M_p - y X_1$, кН·м	Проверка		Поперечная сила			Продольная сила		
			$M y \frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi}$	Q_0 кН	$Q_0 \cos \varphi$	$X_1 \sin \varphi$	$Q = Q_0 \cos \varphi - X_1 \sin \varphi$	$Q_0 \sin \varphi$	$X_1 \cos \varphi$	$N = -(Q_0 \sin \varphi + X_1 \cos \varphi)$
1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
			$\sum R = 0$							

Если делить ось арки на n -участки с равными величинами их проекций Δx , то $\Delta S = \frac{\Delta X}{\cos \varphi}$ и вынося за знак суммы величину EI_0 , получим в каждом слагаемом множитель $\frac{I_0 \Delta x}{I \cos \varphi}$

Отношение $\frac{I_0}{I} = \frac{1}{\cos^3 \varphi}$

Таким образом, в продолжение расчетной таблицы войдут величины $\frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi}$

для каждого из выбранных сечений.

Если неизвестная горизонтальная реакция в одной из опор направлена внутрь пролета, то сумма величин, входящих в графу 15, даст свободный член канонического уравнения со знаком минус. Сумма величин графы 13 даст величину $\delta_{1,1}$.

При проверке сумма величин, подсчитанных в графе 18, для двухшарнирной арки должна быть равна нулю, а для арки с

затяжкой величине $\frac{EI_0 l}{E_3 F_3} X_1$.

Для арки с затяжкой, где неизвестным является усилие в затяжке, необходимо еще учесть деформацию затяжки, работающей на растяжение, т. е.

к сумме величин графы 13 надо добавить величину $\frac{EI_0 l}{E_3 F_3}$

где E_3 и F_3 модуль упругости и площадь сечения затяжки.

В расчете следует принять, что $\frac{EI_0 l}{E_3 F_3} = 0,4 \text{ м}^2$.

Итак, для арки с затяжкой коэффициент при X_1 будет:

$$EI_0 \delta_{11} = \sum y^2 \frac{\Delta x}{\cos^4 \varphi} + 0,4l.$$

Определив неизвестное по формуле $X_1 = -\frac{\Delta l, p}{\delta_{1,1}}$

можно подсчитать ординаты окончательной эпюры M, а также эпюр Q и N, что тоже удобнее проводить в табличной форме.

10. Расчет статически неопределимой фермы

Задание. Для статически неопределимой фермы (рис. 30) с выбранными по шифру из табл. 10 размерами и нагрузкой требуется определить усилия во всех стержнях.

Таблица 10

Первая цифра шифра	d м	Площади сечений		Вторая цифра шифра	P кН	Площади сечений		Последняя цифра шифра (№ схемы)	h м
		нижнего пояса	верхнего пояса			решетки	элементов шпренгеля		
1	3,0	F	$1,5F$	1	2	$1,2F$	F	1	3,2
2	3,2	$1,2F$	$1,7F$	2	3	F	$1,5F$	2	3,0
3	3,5	$1,4F$	$2F$	3	4	$2F$	$0,8F$	3	3,1
4	2,9	$1,6F$	$1,6F$	4	5	$0,8F$	$1,1F$	4	2,9
5	3,3	$1,8F$	$1,4F$	5	6	$0,9F$	$0,9F$	5	3,3
6	3,4	$1,3F$	$1,3F$	6	7	$1,3F$	$1,2F$	6	3,4
7	3,6	$1,5F$	F	7	8	$1,1F$	$1,3F$	7	3,5
8	3,1	$1,7F$	$1,1F$	8	9	$1,5F$	$1,4F$	8	3,6
9	3,7	$1,1F$	$1,2F$	9	10	$0,7F$	$1,6F$	9	3,7
0	3,8	$2F$	$1,8F$	0	12	$1,4F$	$0,7F$	0	3,8

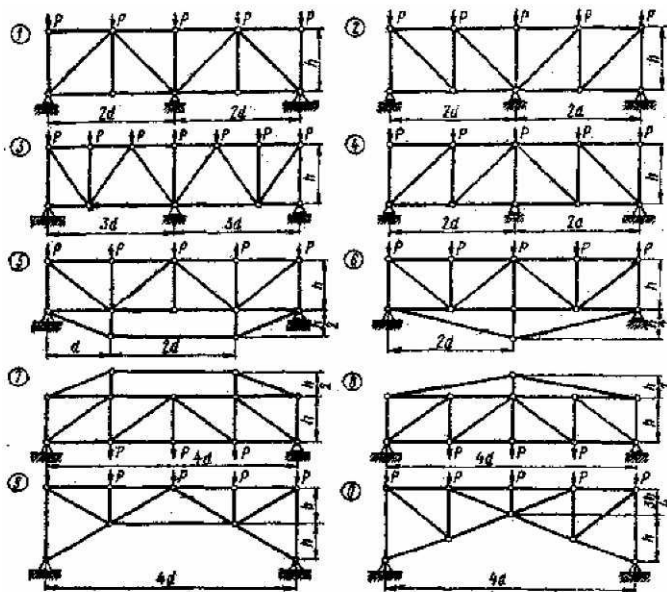


Рис. 30

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 8. При расчете фермы методом сил следует иметь в виду, что при узловом приложении нагрузки в стержнях фермы возникают лишь нормальные усилия, в связи с чем из общей формулы Мора учитывается только член, включающий силы N . Так как усилия, площади поперечных сечений и модули упругости по длине стержня не меняются, то интегрирование сводится к суммированию:

$$EF_0\delta_{1,1} = \sum \bar{N}_1^2 l \frac{F_0}{F}; \quad EF_0\Delta_{1,p} = \sum \bar{N}_1 N_p l \frac{F_0}{F}$$

Основную систему удобнее выбрать симметричной — это значительно сократит объем вычислительной работы. Если за неизвестное принято усилие в стержне, то этот стержень не выбрасывается и поэтому усилие в нем должно учитываться в расчете.

При использовании симметрии можно, в расчет включать только половину фермы, однако здесь следует помнить о тех стержнях, которые не имеют парного во второй половине; очевидно, длину таких стержней надо будет уменьшать вдвое.

В соответствии с общим порядком расчета статически неопределимых систем методом сил в первую очередь надо определить усилия во всех стержнях основной системы от действия единичной силы (неизвестного) и нагрузки. Дальнейший расчет удобно свести в таблицу:

№ стержня	l м	$\frac{F_0}{F}$	\bar{N}_1 кН	N_0 кН	$\frac{F_0}{F}$	$\frac{F_0}{F}$	$\frac{F_0}{F}$	$N_1 N_p$	$N_1 X_1$	$N = N_p + \bar{N}_1 X_1$	Проверка
											$\frac{F_0}{F}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Сумма							$EF_0 \delta_{1,1}$	$EF_0 \Delta_{1,p}$			≈ 0

Здесь за величину F_0 удобно принять F . Растягивающие усилия в стержнях должны иметь знак плюс, а сжимающие — минус.

Сумма величин, подсчитанных в графе 7, дает значение коэффициента канонического уравнения $EF_0 \delta_{1,1}$, а в графе 8 — значение свободного члена $EF_0 \Delta_{1,p}$.

После подсчета этих величин следует определить значение неизвестного

$$X_1 = - \frac{EF_0 \Delta_{1,p}}{EF_0 \delta_{1,1}}$$

и затем заполнить последующие графы (9—11). При проверке можно допустить ошибку не более 1—2%.

11. Расчет статически неопределимой рамы методом перемещений

Задание. Для заданной статически неопределимой рамы (рис. 31) с выбранными по шифру из табл. 11 размерами и нагрузим требуется построить эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.

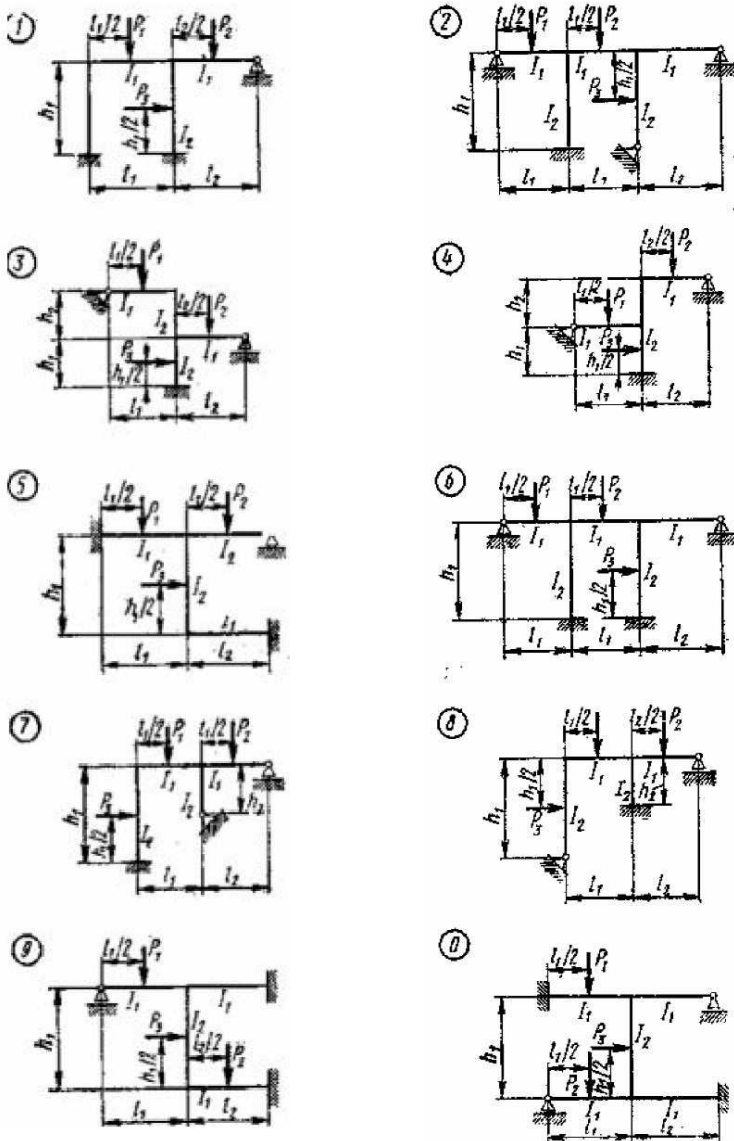


Рис. 31

Таблица 11

Порядок шифра шифра	I_1 м	I_2 м	Второй шифр шифра	R_1 м	P_1	P_2	P_3	Последний шифр шифра (№ стержня)	A_1 м	$I_1 : I_2$
					кН					
1	4	6	1	3	4	0	0	1	0	1:2
2	5	5	2	4	0	4	0	2	0	2:1
3	6	4	3	5	0	0	4	3	5	2:3
4	3	3	4	4	9	0	0	4	6	3:2
5	7	8	5	6	0	5	0	5	0	1:3
6	8	7	6	7	0	0	5	6	0	3:1
7	9	10	7	8	6	0	0	7	9	3:4
8	10	9	8	2	0	6	0	8	10	4:3
9	12	2	9	12	0	0	6	9	0	4:1
0	2	12	0	10	7	0	0	0	0	1:4

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение темы 10.

При выборе основной системы метода перемещений необходимо учитывать, что линейные связи должны быть поставлены не только по направлению возможных линейных перемещений, но и для устранения мгновенной изменяемости системы, образованной после постановки шарниров во все узлы (включая опорные).

При построении единичных грузовых эпюр моментов используются таблицы реакции, имеющиеся в учебниках.

Прежде чем приступать к подсчету коэффициентов канонических уравнений, необходимо значения ординат на всех единичных эпюрах выразить через какую-либо одну жесткость (EI_1 или EI_2). Удобно также перейти к погонным жесткостям стержней ($i = EI_1/l$). При определении коэффициентов следует внимательно следить за их знаками, а также использовать теорему о взаимности реакций. Решением системы канонических уравнений необходимо проверить.

После определения значений неизвестных рекомендуется построить эпюры моментов ($M_i Z_i$). Суммирование этих эпюр между собой и с грузовой эпюрой дает окончательную эпюру моментов. Суммирование рекомендуется производить по характерным точкам и в пояснениях обязательно приводить все расчеты.

Эпюры поперечных и продольных сил строятся по эпюре моментов так же, как и в задаче 7.

Проверку полученных эпюр надо проводить как статическую (равновесие узлов и рамы в целом), так и кинематическую. Для последней проверки необходимо выбрать основную систему метода сил и построить хотя бы одну единичную эпюру, которую следует <умножить> на окончательную эпюру моментов по правилу Верещагина.

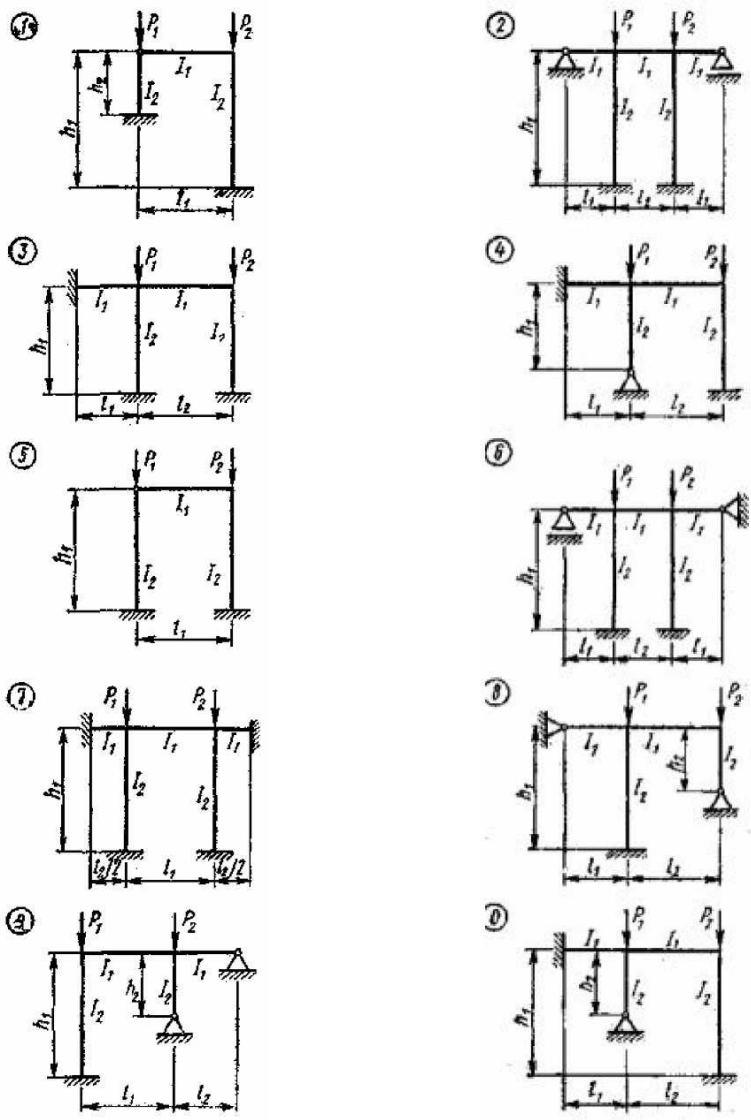


Рис. 32

12. Расчет плоской рамы на устойчивость

Задание. Для статически неопределимой рамы (рис. 32) с выбранными по шифру из табл. 12 размерами и нагрузкой требуется определить значения критических сил, используя метод перемещений.

Таблица 12

Первая цифра шифра	$l_1, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	Вторая цифра шифра	$\frac{P_1}{P_2}$	$l_2, \text{ м}$	Последняя цифра шифра (№ схемы)	$h_2, \text{ м}$	$l_1 : l_2$
1	4	4	1	1,2	4	1	2	0,9
2	5	10	2	1,3	5	2	0	0,8
3	6	9	3	1,4	6	3	0	0,7
4	7	8	4	1,5	7	4	0	0,6
5	8	7	5	1,6	8	5	0	0,5
6	9	6	6	1,7	9	6	0	1,2
7	10	5	7	1,8	10	7	0	1,4
8	11	3	8	1,9	11	8	4	1,5
9	12	11	9	2,0	12	9	5	1,6
0	13	12	0	2,5	13	0	6	1,8

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение тем 18—23.

Все предлагаемые рамы целесообразно решать методом перемещений. Так как внешние нагрузки действуют вдоль стоек, то грузовых эпюр в основной системе не будет и свободные члены канонических уравнений обратятся в нуль.

Построение единичных эпюр для сжатых силами стоек следует проводить по специальным таблицам, а для ригелей — по обычным таблицам метода перемещений. Специальные таблицы, необходимые функции и их значения для метода перемещений можно найти в пособии А. Ф. Смирнова «Таблицы функций для расчета стержневых систем на устойчивость и колебания», табл. 2 (изд. МИИТ, 1965). Такие же таблицы можно найти и в источниках [13], [15], [16], [17].

Коэффициенты канонических уравнений будут включать в себя некоторые функции $\varphi_n(v_i)$ и $\varphi_m(v_k)$ от параметров

$$v_i = \sqrt{\frac{P_i h_i^2}{EI_i}}; \quad v_k = \sqrt{\frac{P_k h_k^2}{EI_k}}$$

где P_i и P_k — силы, действующие вдоль стоек h_i и h_k ; EI_i и EI_k — жесткости стоек.

По заданию силы P_i и P_k связаны между собой соотношением, а поэтому и параметры v_i и v_k окажутся связанными соотношением:

$$\frac{v_i}{v_k} = h_i \sqrt{\frac{P_i}{EI_i}} : h_k \sqrt{\frac{P_k}{EI_k}} = \frac{h_i}{h_k} \sqrt{\alpha \frac{EI_k}{EI_i}}$$

Для нахождения P_k составляется уравнение устойчивости

$$D = \begin{vmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{vmatrix} = r_{1,1} \cdot r_{2,2} - r_{1,2}^2 = 0.$$

Это уравнение решается относительно v подбором в такой последовательности: а) задаются значением v_k ; б) по вычисленному соотношению определяется v_i ; в) по таблицам находят значения необходимых коэффициентов (функций $\varphi_n(v_i)$ и $\varphi_m(v_k)$...); г) найденные значения функций подставляются в уравнение устойчивости.

Если данные значения функций не удовлетворяют уравнению устойчивости, то задаются другим значением v_k и все вычисления повторяются. Эта операция продолжается до тех пор, пока принятые значения не будут удовлетворять уравнению устойчивости. Тогда по формулам

$$P_{i,кр} = \frac{v_i^2 EI_i}{h_i^2} \text{ и } P_{k,кр} = \frac{v_k^2 EI_k}{h_k^2}$$

определяются значения критических сил.

13. Динамический расчет плоской системы

Задание. Для плоской рамы (рис. 33) с размерами и нагрузкой, выбранными по шифру из табл. 13, требуется: I

Таблица 13

Первая цифра шифра	2 М	Q кН	Вторая цифра шифра	P кН	Последняя цифра шифра (М)	ЕГ кН-м'
1	2	10	1	1	1	20000
2	2.5	20	2	2	2	25000
3	3.0	22	3	2.5	3	22500
4	2.2	18	4	1.5	4	22000
5	2.4	25	5	1.2	5	23000
6	2.8	24	6	3	6	21000
7	2.1	21	7	1.8	7	24000
8	2.3	23	8	1.6	8	23500
9	1.8	17	9	2.2	9	24500
0	2.6	16	0	2.6	0	21500

1) определить круговую частоту свободных вертикальных и горизонтальных колебаний, приняв раму как систему с двумя степенями свободы (собственный вес системы не учитывается);

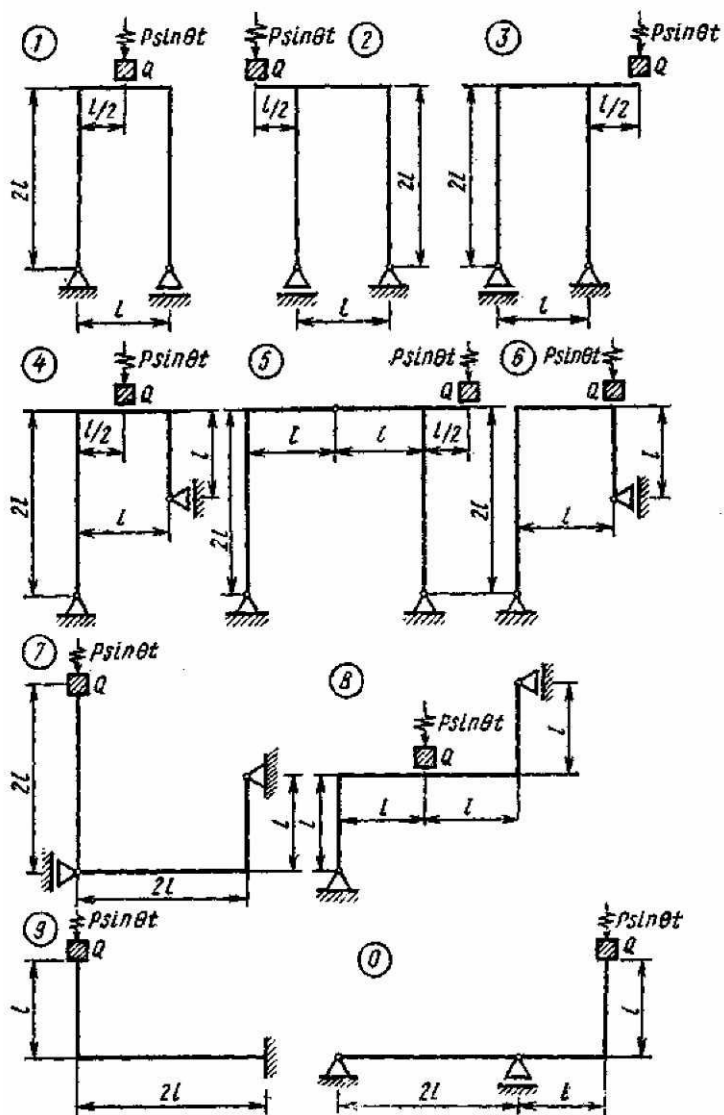


Рис. 33

2) определить динамическое воздействие вертикальной вибрационной силы $P \sin \theta t$: а) принять частоту вертикальной возмущающей силы ($\theta \text{ с}^{-1}$) равной половине минимальной частоты собственных колебаний, б) определить динамический коэффициент μ , в) построить эпюру изгибающих моментов с учетом динамического действия силы P .

Методические указания

Решению задачи должно предшествовать изучение тем 24—26.

Для решения задачи необходимо записать «вековое» уравнение для системы с двумя степенями свободы. Оно имеет вид биквадратного уравнения, решение которого даст две собственные частоты (отрицательные значения ω не учитываются). Чтобы найти коэффициенты векового уравнения, надо определить перемещения от единичных сил, приложенных по направлению возможных колебаний массы ($m=Q/g$) (вертикальному и горизонтальному) $\delta_{1,1}$; $\delta_{2,2}$; $\delta_{1,2}=\delta_{2,1}$ (вращение груза относительно центра его массы не учитывается).

Возможные перемещения массы (вертикальное и горизонтальное) качественно определяют две формы колебаний с частотами ω_1 и ω_2 . При этом нижней (основной) частоте соответствует та форма колебаний, для которой $\delta_{1,1}$ больше, т. е. рама менее жестка.

Например, при решении векового уравнения получены частоты: $\omega_1 = 55 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 700 \text{ с}^{-1}$, а перемещения от единичной вертикальной силы $\delta_{1,1} = 0,56/EI$ и от горизонтальной силы $\delta_{2,2} = 80/EI$. Это означает, что наименьшая частота $\omega_1 = 55 \text{ с}^{-1}$ соответствует горизонтальной форме колебаний.

При определении динамического воздействия вертикальной вибрационной силы заданную раму рассматривают как одномассовую систему с одной (вертикальной) степенью свободы.

Динамический коэффициент определяется по формуле

$$\mu = \frac{1}{1 - \left(\frac{\theta}{\omega}\right)^2}$$

где ω — частота свободных вертикальных колебаний груза Q ; $Y = 0,5\omega_1$; ω_1 — низшая частота свободных колебаний.

Эпюра изгибающих моментов с учетом динамического воздействия вибрационной силы $P \sin Yt$, т. е. от вертикальной сосредоточенной нагрузки $Q + \mu P$, легко строится с использованием имеющейся эпюры от единичной вертикальной силы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Общие методические указания	3
Литература	5
Методические указания к темам курса.....	6
Введение и основные понятия	6
Часть I. Статически определимые стержневые системы	8
Часть II. Статически неопределимые стержневые системы.....	16
Часть III. Основы расчета пространственных тонкостенных систем	25
Часть IV. Устойчивость и динамика сооружений	26
Контрольные задания	31
Задачи	32