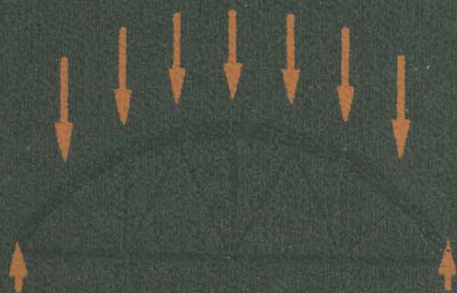


А.Э. ЛОПАТТО
В.Ф. МАЙБОРОДА

ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования УССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Производство строительных изделий и конструкций»

Киев
Головное издательство
издательского объединения
«Вища школа»
1982

ББК 38.5я73

Л177

УДК 624.04(075.8)

Основы строительной механики и строительных конструкций. Лопатко А. Э., Майборода В. Ф.— Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982.— 368 с.

В учебнике изложены методы определения усилий, действующих в строительных, в основном железобетонных, конструкциях, дан расчет сечений элементов. В отдельной главе описаны методы испытания материалов и конструкций. Расчеты, конструирование железобетонных элементов и испытания их даны в соответствии с последними нормативными документами. Железобетонные конструкции зданий и сооружений рассмотрены в последовательности их монтажа. В учебнике также отражены результаты некоторых научных разработок и исследований авторов.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Производство строительных изделий и конструкций».

Табл. 14 Ил. 170 Библиогр.: 50 назв.

Рецензенты: доктор техн. наук Я. Д. Лившиц (Киевский автомобильно-дорожный институт), доктор техн. наук Л. П. Поляков и кандидаты техн. наук С. Я. Гранат и П. П. Шандрук (Киевский инженерно-строительный институт)

Редакция литературы по строительству, архитектуре и коммунальному хозяйству

Зав. редакцией В. В. Гаркуша

Л 3202000000-255
М211(04)-82 БЗ-5-10-82

© Издательское объединение
«Вища школа», 1982

Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года, утвержденные XXVI съездом КПСС, предусматривают повысить уровень индустриализации строительного производства и степень заводской готовности конструкций и деталей, расширить применение новых эффективных конструкций.

За последние 25 лет объем производства сборного железобетона в нашей стране возрос более чем в 20 раз. В одиннадцатой пятилетке в промышленности строительных материалов, строительных конструкций и деталей предполагается еще увеличить объем выпуска продукции на 17—19 процентов.

В предстоящем 50-летию железобетон на основе тяжелого бетона сохранит в нашей стране ведущее положение среди других конструктивных материалов при возрастающем объеме производства легких и ячеистых бетонов.

Широкое внедрение железобетона в строительство сопровождается также применением бетонов повышенной (до М 800) прочности и сталей со средневзвешенным пределом текучести, превышающим предел текучести стали Ст3 в два и более раза. Предпочтение при этом будет отдаваться выпуску арматуры диаметром от 4 до 16 мм, одно- и многопрядным канатам с временным сопротивлением от 25 000 до 40 000 кгс/см² (от 2500 до 4000 МПа).

В перспективе — внедрение новых форм армирования, в частности поверхностного и дисперсного (фибрового), волокнами из стали и других материалов, ориентированными в электростатическом либо в магнитном поле.

Достигнутое и планируемое увеличение производства сборного железобетона немислимо без его обеспечения квалифицированными инженерами-строителями — технологами, которые должны знать не только технологию производства железобетонных элементов, но и как они работают во время изготовления и под нагрузкой, как распределяются внутренние усилия в наиболее нагруженных сечениях, как найти усилия от внешних нагрузок в этих сечениях, как подобрать и законструировать эти сечения.

Чтобы уметь отличить прогрессивные конструктивные решения от устаревших или просто модных, надо знать законы архитектурно-конструктивного формирования железобетонных конструкций и правила их конструирования.

В соответствии с этим настоящий учебник состоит из двух основных разделов: расчеты усилий от внешних нагрузок в конструкциях; расчеты сечений на действие этих усилий и методы определения соответствия расчетов действительному состоянию конструкций.

Все статические расчеты вынесены в первый раздел учебника; особенности проектирования предварительно напряженных элементов сосредоточены в одном параграфе; во избежание повторений правила конструирования элементов перечислены в отдельном параграфе; в конструктивно-логической последовательности описаны основные сборные элементы строительных конструкций от фундаментов до покрытий, а также стыки сборных конструкций; после традиционного рассмотрения расчетов и конструирования сварных и болтовых соединений металлических конструкций рассмотрено проектирование металлических форм для изготовления железобетонных элементов.

В связи с дальнейшим совершенствованием норм строительного проектирования введены новые термины, понятия, буквенные обозначения, единицы (СТ СЭВ 1565-79 «Нормативно-техническая документация в строительстве. Буквенные обозначения», СТ СЭВ 384—76 «Строительные конструкции и основания. Основные положения по расчету», СН 528—80 «Перечень единиц физических величин, подлежащих применению в строительстве» и др.). Перечень наиболее употребительных величин дан в прил. А, Б, В.

Величины, заданные в мегапаскалях, следует подставлять в рабочие формулы, умножая на 100 ($1 \text{ МПа} = 100 \text{ Н/см}^2$); в эмпирические формулы, если сопротивление материала входит прямым множителем, его подставляют в мегапаскалях.

Авторы признательны докторам техн. наук Я. Д. Лившицу, Л. П. Полякову, кандидатам техн. наук С. Я. Гранату, П. П. Шандруку за советы и замечания при рецензировании рукописи, а также кандидату техн. наук С. М. Черному за помощь, оказанную при подготовке рукописи к изданию.

Раздел первый

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. НАГРУЗКИ И УСИЛИЯ

Глава 1

НАГРУЗКИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ

Строительные конструкции предназначены для восприятия усилий от внешних нагрузок и воздействий, для ограждения помещений от природных воздействий и для разделения общего объема зданий на технологические ячейки.

Внешние нагрузки и воздействия вызывают в строительных конструкциях и элементах усилия, которые определяют по правилам строительной механики, изложенным в первом разделе.

1. Виды нагрузок

Нагрузками (воздействиями) называют всякие внешние активные силы и воздействия (температурные, усадочные, от предварительного напряжения), приложенные к сооружению либо конструкции и вызывающие в них напряженное состояние.

Нагрузки можно разделять по способу их приложения на *распределенные* и *сосредоточенные*, по характеру воздействия во времени — на *статические* и *динамические* и по длительности действия на конструкцию — на *постоянные* и *временные*. Распределенные нагрузки равномерно распределены либо по длине, либо по поверхности, либо по объему элемента.

Если длина (площадь или объем), на которой действует нагрузка, пренебрежимо мала по сравнению с длиной (площадью или объемом) элемента, то нагрузку можно заменить равнодействующей, т. е. сосредоточенной силой, приложенной в точке. В нормах [1] нагрузку условно считают сосредоточенной при площади загрузки 100 см^2 и менее.

Статические нагрузки соответствуют такому приложению сил, при котором либо вообще не возникают ускорения масс сооружений и конструкций, либо возникают ускорения столь незначительные по величине, что вызванными ими силами инерции можно пренебречь. Этим условиям отвечают нагрузки, постоянные по направлению и положению; при этом величина нагрузки либо не изменяется, либо изменяется медленно, плавно, без скачков и вибраций.

Динамические нагрузки вызывают значительные по величине силы инерции, так как скачкообразно изменяются либо их величина, либо место приложения, либо направление нагрузки, либо все эти параметры одновременно. К таким относятся ударные нагрузки, сейсмические воздействия и т. п.

Постоянные нагрузки действуют на сооружение постоянно; это — собственный вес конструкций, вес и давление грунтов (насыпей, засыпок), воздействие предварительного напряжения конструкций.

Временные — это нагрузки, которые в отдельные периоды работы конструкции могут отсутствовать. Временные нагрузки могут быть длительными, кратковременными и особыми.

К *длительным* нагрузкам относят: вес временных перегородок; вес стационарного оборудования; давление газов, жидкостей и сыпучих тел в емкостях; полезную * нагрузку на перекрытия в складских помещениях разного типа; полезную нагрузку в помещениях, где преобладает вес оборудования и материалов; воздействия усадки и ползучести бетона и т. д.

К *кратковременным* нагрузкам относят: вес людей, ремонтных материалов в зонах обслуживания и монтажа оборудования; нагрузки, возникающие при изготовлении, перевозке и возведении строительных конструкций; нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования; часть полезных нагрузок в жилых и общественных зданиях; снеговые, ветровые и гололедные; температурные климатические воздействия.

К *особым* нагрузкам принадлежат: сейсмические и взрывные воздействия, воздействия от неравномерных деформаций оснований, сопровождающиеся изменением структуры грунта.

Рассмотренные нагрузки могут быть однократного действия и многократно повторные. Последние характеризуются числом циклов попеременного изменения нагрузок, а также коэффициентом асимметрии цикла, т. е. отношением наименьшего напряжения в конструкции к наибольшему. Например, вибрационная нагрузка является динамической многократно повторной, сейсмическая — также динамической, но повторной с ограниченным числом циклов изменения нагрузок.

Основными характеристиками нагрузок являются их *нормативные величины*, приведенные в главе СНиП «Нагрузки и воздействия». В качестве нормативных нагрузок приняты установленные в результате длительного наблюдения наибольшие значения рабочих воздействий, допускаемые при нормальной эксплуатации здания или сооружения.

Нормативные нагрузки климатического характера (ветровая, снеговая) установлены на основе статистического анализа данных длительного наблюдения за ними.

Нормативные нагрузки от собственного веса конструкций определяют по проектным размерам и объемным массам материалов.

В отдельные периоды эксплуатации нагрузка на конструкцию может быть превышена либо занижена по сравнению с нормативной, что создает опасность для прочности конструкции. Эту воз-

* Полезной называют нагрузку, соответствующую целевому, функциональному назначению здания либо сооружения.

можную изменчивость нагрузки в неблагоприятную сторону учитывают коэффициентом перегрузки (или надежности). Нормативную нагрузку (q^n, p^n), умноженную на коэффициент перегрузки n , называют расчетной (q, p). Так как различные нагрузки изменяются не одинаково, то коэффициенты перегрузки также различны. Так, для нагрузок от собственного веса конструкций и материалов, составляющих покрытия и полы, $n = 1,1 \dots 1,3$; для кратковременных полезных $n = 1,1 \dots 1,4$; для снеговой $n = 1,4 \dots 1,6$.

При расчетах конструкций (кроме подкрановых балок) по деформациям, перемещениям и на выносливость $n = 1$.

Исходя из реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок с учетом возможного отсутствия некоторых из них (целиком или частично), устанавливают наиболее неблагоприятные их сочетания.

Основные сочетания состоят из постоянных, длительных и кратковременных нагрузок. Если основное сочетание включает две или более кратковременные нагрузки, их расчетные значения должны быть умножены на коэффициент сочетаний $n_c = 0,9$.

Особые сочетания состоят из постоянных, длительных, возможных кратковременных и одной из особых нагрузок. При этом расчетные значения кратковременных нагрузок вводят в сочетание с коэффициентом $n_c = 0,8$, кроме случаев, когда особой нагрузкой является сейсмическая.

При расчете с учетом сейсмических воздействий в расчетные нагрузки вводят коэффициенты сочетания: для постоянных нагрузок $n_c = 0,9$, для временных длительных $n_c = 0,8$, для кратковременных нагрузок на перекрытия и снеговых нагрузок $n_c = 0,5$.

2. Основные элементы конструкций, их соединения и опорные устройства

В зависимости от соотношения размеров различают следующие основные элементы конструкций (рис. 1, а):

нить — податливый элемент, диаметр которого ничтожно мал по сравнению с длиной (идеально гибкая нить может воспринимать только растягивающее усилие);

стержень (брус, балка), размеры поперечного сечения которого малы по сравнению с длиной. Стержень может быть пластмассовым, деревянным, армоцементным, металлическим и др. Стержни, имеющие весьма малую толщину стенок (до 30 мм), называют тонкостенными. Их профиль можно получить гнутьем, прокатом, сваркой стальных тонких листов и т. п.;

пластина (диск, плита) — плоский элемент, толщина которого мала по сравнению с размерами сторон в плане;

оболочка — пространственно изогнутая пластина;

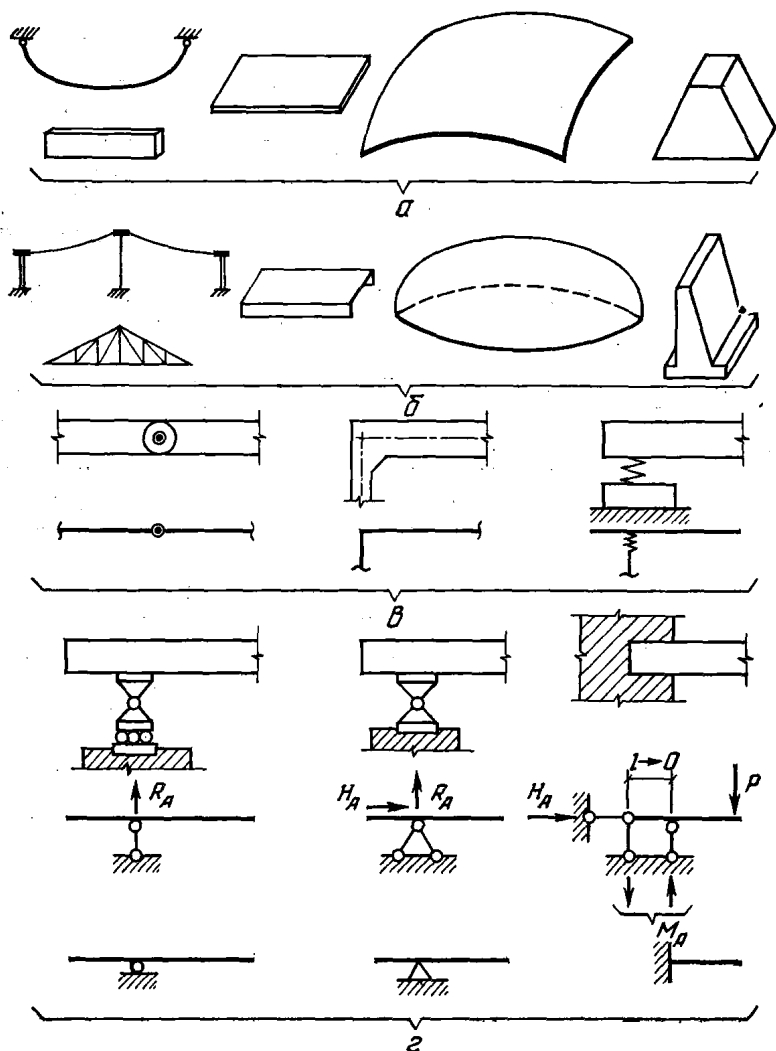


Рис. 1. Конструкции и их соединения.

массив — элемент, все три размера которого — величины одного порядка.

В зависимости от вида конструкции различают четыре типа элементов (рис. 1, б): *висячие*; *стержневые*; *пластинки* и *оболочки*; *массивные*.

Отдельные элементы конструкций могут быть скреплены (рис. 1, в) *шарнирно* (например, коньковые узлы мног шарнирных рам и арок), *жестко* (опорные узлы рам), *упруго* (пружинное опирание виброплощадок).

Для опирания конструкций применяют следующие основные типы опор: *шарнирно подвижную*, *шарнирно непод-*

вижную, защемляющую неподвижную. На рис. 1, 2 изображены простейшие схемы устройства перечисленных опор и их условные изображения.

Шарнирно подвижная опора допускает поворот элемента вокруг оси, проходящей через центр шарнира, и его поступательное перемещение вдоль опорной поверхности. Предполагается, что шарниры идеальны, т. е. трение в них отсутствует и они способны передавать только продольные усилия строго через центр шарнира. В шарнирно подвижной опоре возникает реакция R_A , нормальная к опорной поверхности.

Шарнирно неподвижная опора допускает только поворот элемента вокруг центра шарнира; в ней возникают две составляющие реакции — R_A и H_A .

Защемляющая неподвижная опора, или заделка, не допускает ни поступательного, ни вращательного перемещения. Она эквивалентна трем опорным стержням, в ней возникают три составляющие реакции: R_A , H_A и реактивный изгибающий момент M_A .

Число стержней на схеме любой опоры равно числу параметров, в сумме составляющих полную реакцию этой опоры.

3. Расчетные схемы и классификация конструкций

Основой строительной конструкции является, как правило, пространственная система, обычно достаточно сложная для расчета при точном учете всех ее параметров. Поэтому для практических расчетов используют расчетную схему конструкций.

Расчетная схема конструкции — это упрощенное изображение ее несущей и опорной систем. Стержни на расчетной схеме показывают в виде их центральных линий, пластины — в виде их срединных * поверхностей, реальные опоры также в виде соответствующих схем и т. д. Расчетная схема учитывает только основные параметры конструкции: формы и размеры отдельных ее элементов, характер взаимодействия между ними, значение, расположение и характер нагрузок. Второстепенные свойства конструкции при этом не учитываются.

Конструкции и их расчетные схемы классифицируют по различным признакам: геометрическим, кинематическим, по особенностям работы и т. п.

По геометрическим признакам конструкции подразделяют на плоские и пространственные.

В плоской конструкции осевые линии всех элементов расположены в одной плоскости. В противном случае конструкция (система) является пространственной.

По кинематическим признакам различают системы: геометрически неизменяемые неподвижные без лишних связей; геометрически

* *Срединной* называют поверхность, равноотстоящую от внутренней и наружной поверхностей пластины, оболочки.

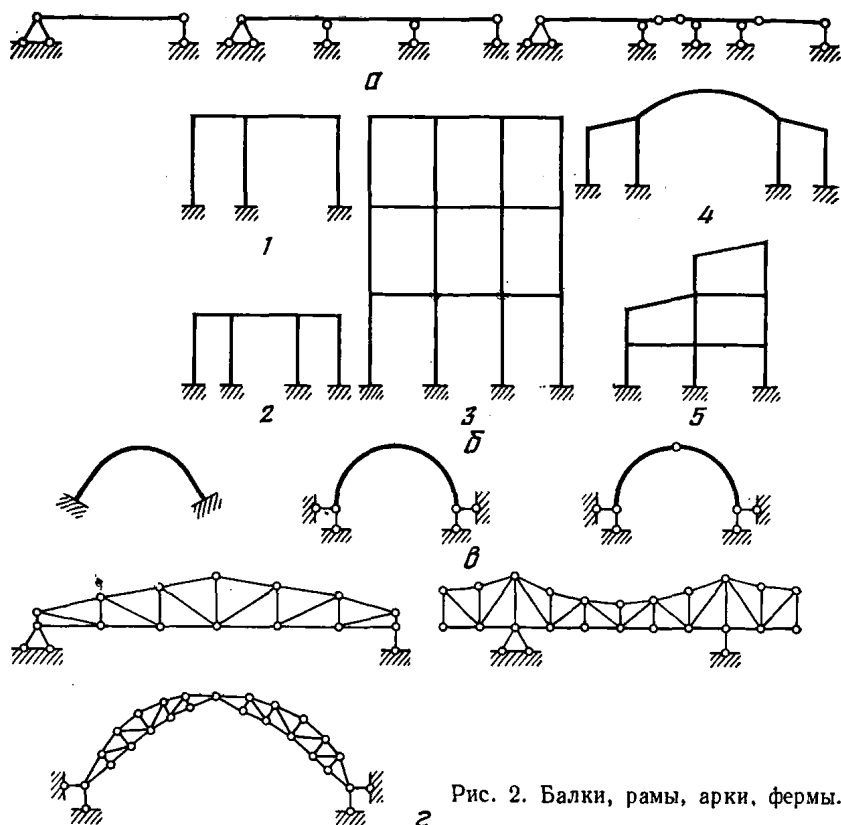


Рис. 2. Балки, рамы, арки, фермы.

неизменяемые неподвижные с определенным числом лишних связей; геометрически изменяемые *.

Конструкции могут быть распорными и безраспорными. Для распорных систем характерно наличие горизонтальных составляющих опорных реакций при вертикальных нагрузках.

По особенностям работы конструкций различают висячие, балочные, рамные и арочные системы.

Висячие системы относятся к распорным. Особенностью работы висячих тросовых (канатных) или сплошных листовых систем является то, что их элементы могут воспринимать только усилия растяжения. Горизонтальные составляющие опорных реакций в висячих системах воспринимаются жесткими элементами, например, колоннами.

Балочные системы относятся к безраспорным. Балки (брусья) работают на изгиб; вертикальная нагрузка не вызывает в них горизонтальной составляющей реакции — распора. Балки бывают одно-

* Геометрически изменяемые системы не могут служить инженерными конструкциями, за исключением гибких нитей.

пролетные и многопролетные (рис. 2, а). К балочным конструкциям относят и опертые по двум противоположным концам плиты (балочные плиты).

Рамные системы могут быть распорными и безраспорными. Рама — это стержневая система из стоек и балок — ригелей с жесткими либо (частично) с шарнирными узлами (рис. 2, б). Стержни рамы работают на изгиб и воспринимают осевые усилия. Рамы бывают однопролетные и многопролетные, одноэтажные и многоэтажные, симметричные и несимметричные, с прямолинейными, ломаными или криволинейными ригелями, с перепадом высот и без.

Арка — распорная система, состоящая из одного криволинейного элемента (или двух, соединенных шарниром). Арки бывают бесшарнирные, двухшарнирные, трехшарнирные (рис. 2, в).

Арочные системы работают преимущественно на одноосное сжатие, что позволяет использовать полнее их материал.

Ферма — стержневая система с шарнирными узлами. По условиям опирания различают фермы балочные, консольно-балочные, арочные (рис. 2, г); применяют также висячие фермы.

Оболочки — это изогнутые тонкие пластинки, толщина которых в сотни раз меньше других размеров; оболочки характерны наилучшим использованием материала, из которого они выполнены. Несущую способность плит или пластинок можно увеличить за счет изменения их формы от плоской к изогнутой.

Оболочки опирают на контур, располагаемый, в свою очередь, на стенах или на колоннах. Такие оболочки работают на сжатие и изгиб, а висячие оболочки — на растяжение; те и другие являются распорными конструкциями. Оболочки выполняют из железобетона, армоцемента, металла, дерева, пластмасс.

Конструкции также подразделяются на *статически определимые* и *статически неопределимые*. Первые характерны тем, что усилия в их элементах можно определить из одних только уравнений статического равновесия; для расчета статически неопределимых систем необходимы дополнительные уравнения связности деформаций элементов.

4. Кинематический анализ конструкций

В качестве инженерных конструкций можно применять лишь такие системы, которые способны воспринимать внешнюю нагрузку, не изменяя геометрической формы, заданной им при возведении. Для этого они должны быть геометрически неизменяемыми и неподвижными относительно основания (земли).

Проверка геометрической неизменяемости и неподвижности системы производится с помощью кинематического анализа, который удобно проводить в два этапа. На первом этапе определяется степень свободы системы, а на втором проводится анализ геометрической структуры сооружения.

Определение степени свободы системы. Под свободой системы понимается ее возможность совершать какие-либо перемещения относительно земли без деформации элементов. Степенью свободы системы называют число независимых геометрических параметров, определяющих ее положение в пространстве относительно неподвижного тела (земли).

Точка имеет на плоскости степень свободы, равную двум, так как ее положение определяется двумя координатами. Стержень (брус или, в более общем понятии, диск *) имеет на плоскости степень свободы, равную трем, так как он, кроме поступательных перемещений, может поворачиваться вокруг какой-либо точки. Чтобы диск был неподвижен, нужны три кинематические связи. Всякое устройство, уничтожающее одну степень свободы, эквивалентно одной кинематической связи. Если устройство уничтожает несколько степеней свободы диска, оно эквивалентно соответствующему числу связей.

Цилиндрический шарнир с неподвижной геометрической осью, вокруг которой диск может вращаться, эквивалентен двум связям. Шарнир, связывающий два диска и уничтожающий две степени свободы одного диска относительно другого, называют *простым*, или *одиночным* (иногда — *двузвенным*). Цилиндрический шарнир, связывающий n дисков, называют *сложным*, или *кратным*. Такой шарнир рассматривают как приведенное $(n - 1)$ число простых шарниров на одной оси. Действительно, простые шарниры, связывающие три диска, как показано на рис. 3, а, устраняют по две степени свободы в каждом из крайних дисков (диски 1 и 3) относительно среднего (диск 2), т. е. уменьшают степень свободы системы в целом на $2 \times 2 = 4$. Точно так же шарнир, показанный на средней схеме рис. 3, а, уменьшает степень свободы системы на $(3 - 1) \times 2 = 4$.

Обозначим число дисков D , число (приведенное) простых шарниров, связывающих диски друг с другом, — Π , число опорных стержней — $C_{оп}$. Опорный стержень эквивалентен одной связи.**

При отсутствии связей один диск имеет три степени свободы, а D дисков имеют соответственно $3D$ степеней свободы. При наличии связей степень свободы системы можно определить по формуле

$$W = 3D - 2\Pi - C_{оп}. \quad (1)$$

Система дисков может быть неизменяемой и неподвижной, если $W = 0$. Если $W > 0$, система изменяема, обладает подвижностью. В системе могут быть связи, лишние с точки зрения обеспечения неизменяемости и неподвижности; тогда $W < 0$. Число лишних связей определяется формулой

$$L = 2\Pi + C_{оп} - 3D. \quad (2)$$

* Имеется в виду простой диск, под которым понимают заведомо геометрически неизменяемую и статически определяемую плоскую фигуру любой формы.

** Подвижная опора устраняет одну, неподвижная — две, а защемляющая — три степени свободы.

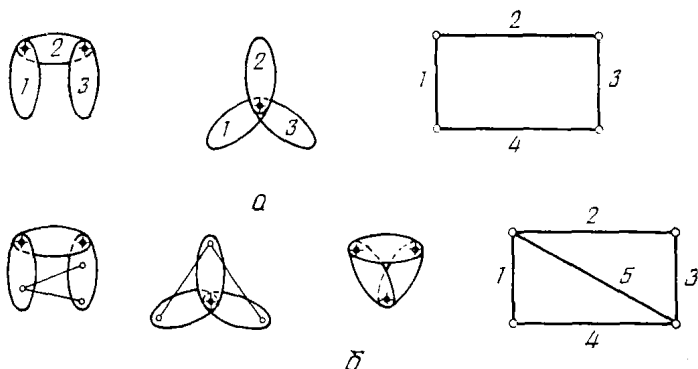


Рис. 3. Изменяемые и неизменяемые системы.

Условие геометрической неизменяемости и неподвижности при минимальном числе связей —

$$W = L = 0, \text{ или } 3Д = 2Ш + C_{\text{оп}}. \quad (3)$$

Если система отделена от опор, ее степень свободы складывается из двух частей: степени изменяемости системы V и числа степеней свободы всей системы как единого целого. Последнее, как следует из вышеизложенного, равно 3.

Степенью изменяемости системы V называют число независимых геометрических параметров, определяющих положение элементов (дисков) системы по отношению к одному из ее элементов, принимаемому за неподвижный. Таким образом, степень изменяемости системы без опор

$$V = W - 3 = 3Д - 2Ш - 3. \quad (4)$$

Чтобы лишить элементы изменяемой ($V > 0$) системы свободы перемещений, нужно поставить дополнительные связи, число которых зависит от степени изменяемости системы. Так, на рис. 3, а показаны изменяемые системы, а на рис. 3, б — те же системы, дополненные необходимыми для неизменяемости кинематическими связями.

Анализ геометрической структуры. Условие неподвижности и неизменяемости системы

$$W \leq 0 \quad (5)$$

является необходимым, но недостаточным.

В самом деле, для обеих систем, показанных на рис. 4, $Д = 2$; $Ш = 1$; $C_{\text{оп}} = 4$; по формуле (1) $W = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 1 - 4 = 0$.

Однако, система на рис. 4, а геометрически неизменяема и неподвижна, в то время как система на рис. 4, б имеет одну степень свободы правого диска и один лишний опорный стержень в левом диске, а в целом является изменяемой. Следовательно, кроме условия $W \leq 0$, которое выражает количественное соотношение между элементами и связями для их соединения, сооружения должны

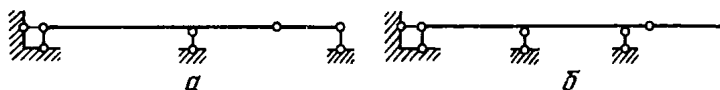


Рис. 4. Неизменяемая и изменяемая балки.

подчиняться правилам образования геометрически неизменяемых систем. Основные из них показаны на рис. 5.

Из рис. 5, а следует, что два диска могут быть соединены: 1) тремя стержнями, которые не пересекаются в одной точке; 2) шарниром и стержнем, который не проходит через этот шарнир. Из рис. 5, б следует, что три диска могут быть соединены тремя шарнирами, не лежащими на одной прямой. Шарнир, связывающий два диска, может быть заменен двумя пересекающимися стержнями. Следовательно, схемы 2, 3, 4 на рис. 5, б эквивалентны схеме 1 при условии, что точки пересечения стержней, соединяющих каждую пару дисков, и шарниры не лежат на одной прямой.

Схему 5, приведенную на рис. 5, б, можно рассматривать как разновидность схемы 1, так как стержни, присоединяющие узел В к диску А, также являются дисками. Три, четыре и более прямых стержней, образующих шарнирные стержневые системы, соединяют по правилу присоединения узла к неизменяемой системе (дisku). Треугольная система ABC (рис. 5, в) неизменяема, так как к ней присоединен узел D двумя стержнями, затем к вновь образовавшейся неизменяемой системе ABCD (дisku) присоединен узел E также с помощью двух стержней. Следовательно, система

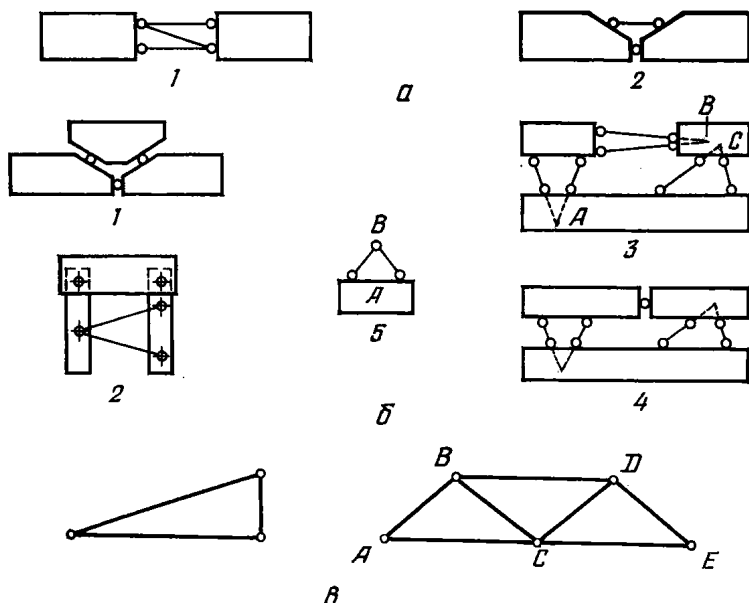


Рис. 5. Способы образования геометрически неизменяемых систем.

$ABCDE$ неизменяема. Из рассмотренного примера следует, что если конструкция состоит из треугольных систем, не накладываемых друг на друга, она заведомо неизменяема.

Таким образом, *геометрически неизменяемыми* называют системы, способные воспринимать любые нагрузки и при этом изменять свою форму исключительно за счет деформаций входящих в них элементов. Если же при нагружении система или отдельные ее части имеют некоторую свободу перемещений без деформаций материала, ее называют *геометрически изменяемой*. Геометрически изменяемые системы способны воспринимать и уравнивать, не меняя заданной формы, только нагрузки определенных видов, свойственные данной форме. Например, при вертикальной нагрузке гибкие нити находятся в состоянии устойчивого равновесия.

Частным случаем неизменяемых систем являются системы *мгновенно изменяемые*, т. е. такие, которые оказываются изменяемыми лишь в первый момент приложения нагрузки. В этот момент отдельные части системы могут значительно перемещаться, и поэтому в качестве строительных конструкций их не применяют.

Мгновенная изменяемость системы может быть обнаружена по такому признаку: если система мгновенно изменяема, то при действии произвольной внешней нагрузки уравнения статики получаются либо неопределенными, либо противоречивыми. Иными словами, характерным признаком мгновенно изменяемой системы является появление усилий, неопределенных или равных бесконечности. Например, диск, опирающийся на три опорных стержня, пересекающихся в одной точке, обладает мгновенной подвижностью. При этом $W = 0$, но опорные реакции могут принимать бесконечное множество значений при отсутствии нагрузки. В самом деле, три силы, пересекающиеся в одной точке, могут находиться в равновесии при бесчисленном множестве значений (два из них показаны на рис. 6).

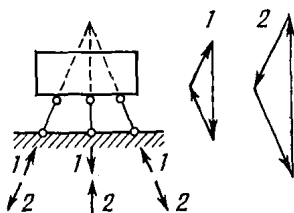


Рис. 6. Мгновенно изменяемая система.

Глава 2

СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫЕ СИСТЕМЫ

При расчете конструкций приходится определять много неизвестных параметров: опорные реакции; нормальные и поперечные силы, изгибающие моменты в сечениях стержней; геометрическую форму и размеры сечений стержней; нормальные и касательные напряжения в любой точке любого стержня; перемещения точек конструкции.

В статически определимых системах неизвестные определяются из одних только условий равновесия конструкции в целом либо отдельных ее частей.

При отсутствии внешней нагрузки под действием температуры, смещения опор либо малого изменения длины какого-либо стержня, обусловленного неточностью разметки, в статически определенных конструкциях напряжения не возникают

5. Многопролетные статически определимые балки

Для перекрытия нескольких смежных пролетов обычно применяют многопролетные шарнирно-консольные балки, так как в них возникают изгибающие моменты меньшие, чем в однопролетных балках при тех же пролетах и нагрузках.

Многопролетные балки являются статически определимыми, если в них нет лишних связей, а реакции всех опор и усилия в сечениях могут быть определены из условий статического равновесия. При числе опорных стержней $n > 3$ число промежуточных шарниров должно быть равно $(n - 3)$.

На рис. 7 показаны типы многопролетных статически определимых балок. Тип *a* характерен чередованием бесшарнирных пролетов с пролетами, имеющими по два шарнира. Во всех пролетах балки типа *б*, кроме одного, один шарнир. Тип *в* представляет собой смешанную систему. В балках всех типов тот пролет, в котором одна из опор шарнирно неподвижна, не должен иметь шарниров. Шарниры в количестве $(n - 3)$ следует располагать так, чтобы была

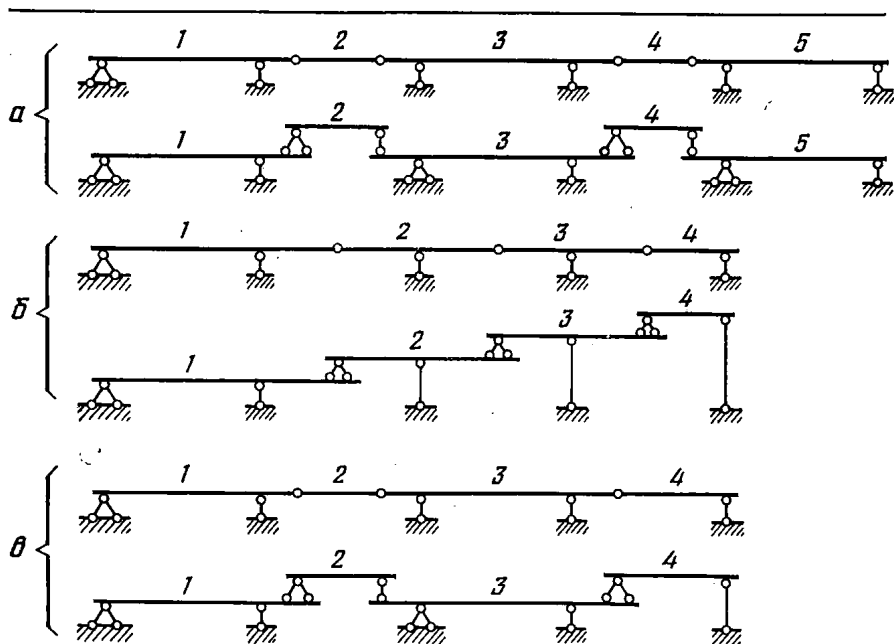


Рис. 7. Типы многопролетных статически определимых балок и их поэтажные схемы.