

В. В. БАБАНОВ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ДЛЯ АРХИТЕКТОРОВ

УЧЕБНИК

В двух томах

Том 1

Допущено

*Научно-методическим советом по механике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки «Архитектура»*



Москва

Издательский центр «Академия»

2008

УДК 624.04(075.8)

ББК 38.112я73

Б121

Рецензенты:

зав. кафедрой инженерно-строительных дисциплин Санкт-Петербургского
Государственного академического института живописи, скульптуры
и архитектуры им. И. В. Репина, проф., канд. техн. наук *В. Д. Коркин*
и доц., канд. техн. наук *Е. А. Яковлев*;

директор ГП НИИ «Спецпроектреставрация» *В. В. Фомин*;
федеральный архитектор Министерства культуры и массовых коммуникаций
Российской Федерации по памятникам архитектуры Ленинградской области
В. В. Кузьмин;

зав. кафедрой теоретической механики ННГАСУ, доц., канд. физ.-мат. наук,
Г. А. Маковкин

Бабанов В. В.

Б121 Теоретическая механика для архитекторов. В 2 т. Т. 1 : учеб-
ник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Бабанов. — М. :
Издательский центр «Академия», 2008. — 256 с.

ISBN 978-5-7695-2847-7

Кратко изложены основы теоретической механики, сопротивления
материалов и строительной механики. Рассмотрены вопросы образования
и анализа расчетных схем сооружений, основные положения статики и
сопротивления материалов. Теоретический материал сопровождается доста-
точным для практического освоения количеством примеров. Содержит
необходимый для решения задач справочный и нормативный материал.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 624.04(075.8)

ББК 38.112я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Бабанов В. В., 2008

ISBN 978-5-7695-2847-7 (т. 1)

ISBN 978-5-7695-2832-3

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Архитектор в процессе создания проекта здания или сооружения определяет его общий вид исходя из эстетических, технологических или других требований, разрабатывает внутреннюю планировку, назначает перечень используемых строительных материалов.

Знание методов расчета сооружений и их элементов необходимо будущему архитектору не столько для того чтобы уметь рассчитать любую конструкцию, сколько для понимания закономерностей в ее работе и распределении усилий при любых внешних воздействиях. Также ему безусловно придется выбирать конструктивные схемы и устанавливать как общие размеры конструкции, так и размеры ее элементов.

Автор выражает глубокую признательность д-ру техн. наук, проф. В. А. Смирнову (МАРХИ) за ценные критические замечания по плану-проспекту настоящего учебника.

Назначение и состав дисциплины

Одной из основных задач при проектировании сооружений является обеспечение их достаточной, но не излишней, надежности на заданный срок эксплуатации.

Памятники архитектуры, пережившие тысячелетия, создавались древними строителями с большим запасом прочности, при этом формы и размеры сооружений чаще всего определялись экспериментально или на основании строительного опыта предшествующих поколений. Доброкачество сооружений проверялась самой жизнью.

В настоящее время многообразие форм сооружений не позволяет опираться только на предшествующий опыт проектирования. Потребность строить быстро, прочно и экономно определяет необходимость выполнения грамотных и отвечающих действительной работе сооружений расчетов, т. е. существенное значение приобретают расчеты прочности, жесткости и устойчивости сооружений.

Целью расчетов на прочность и устойчивость является обеспечение достаточной, но не излишней, безопасности сооружений, т. е. сочетания долговечности с экономичностью.

Цель расчета на жесткость состоит в предотвращении появления значительных деформаций сооружения или его элементов (прогибов, осадок, вибраций), которые могут быть и не опасны для самого сооружения, но не приемлемы по эксплуатационным или эстетическим требованиям.

Методы расчета сооружений на прочность, жесткость и устойчивость изучаются в курсе строительной механики. По мнению Б. Н. Жемочкина, строительная механика в широком смысле этого слова объединяет:

- теоретическую механику;
- сопротивление материалов;
- собственно строительную механику;
- теорию упругости и теорию пластичности.

Теоретическая механика изучает вопросы равновесия и движения твердых тел. Курс теоретической механики в классической постановке включает в себя три раздела:

- с т а т и к у, изучающую вопросы равновесия;
- к и н е м а т и к у, изучающую виды движения;

динамику, изучающую зависимости между движением твердых тел и действующими на них силами.

При этом в теоретической механике не учитываются физико-механические свойства самих тел, т. е. их считают абсолютно твердыми.

Из трех разделов теоретической механики для архитектора наиболее важным является статика.

Сопrotивление материалов, базируясь на основных положениях теоретической механики, но уже с учетом физико-механических свойств строительных материалов, изучает вопросы прочности и устойчивости элементов сооружений, а также определяет изменение их формы под действием внешних сил.

Строительная механика, базируясь на основных положениях теоретической механики и сопротивления материалов, изучает вопросы прочности, жесткости и устойчивости расчетных схем сооружений как совокупности элементов под действием различных видов внешних воздействий.

Теория упругости рассматривает те же вопросы, что и сопротивление материалов, но более углубленно, применительно к непрерывным расчетным схемам (плиты, оболочки, балки-стенки и т. д.) и с использованием более сложного и точного математического аппарата.

Теория пластичности изучает работу элементов конструкций с учетом пластических свойств материалов.

Расчет (даже приближенный) позволяет архитектору оценить внутреннее состояние конструкции, рассмотреть взаимосвязь ее элементов, сознательно изменить условия их «работы» посредством рационального распределения материала и выбора размеров и форм сечений. Последнее, в свою очередь, дает неограниченные возможности для творчества в формообразовании, так как не существует такой методики, которая позволила бы сразу определить наиболее оптимальный вариант конструкции, соответствующей конкретному заданию при проектировании.

Статический анализ выдающихся памятников архитектуры позволяет утверждать, что архитектурная форма всецело вытекает из правильно примененной и грамотно рассчитанной конструкции.

Краткий очерк развития строительной механики

Механика является одной из самых древних наук, возникшей на заре человеческой истории и развивавшейся вместе с развитием производительных сил общества, ростом его материальной и духовной культуры.

Многие простейшие законы механики были известны в глубокой древности, что подтверждают не только археологические раскопки, но и сохранившиеся до нашего времени древнейшие сооружения и рукописи.

Одним из создателей статики был великий ученый античного мира Архимед (322—287 гг. до н.э.), который точно решил задачу равновесия рычага, создал учение о центре тяжести и вычислял площади, поверхности и объемы различных тел с помощью разработанных им методов.

Великий ученый эпохи Возрождения Леонардо да Винчи (1452—1519) ввел в механику понятие момента силы относительно точки и установил, что сила трения скольжения не зависит от размера поверхности соприкосновения трущихся тел. Первые дошедшие до нас сведения о прочности также связаны с его именем.

Основы кинематики, динамики и науки о прочности заложены Галилео Галилеем (1473—1543). В 1538 г. им были опубликованы «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки», содержащие основы новых наук о прочности и динамике. Также он первым сделал попытку рассчитать нагрузку, которую может выдержать балка.

Первое систематическое изложение статики приведено в сочинении «Новая механика» (1687 г.) Пьера Вариньона (1654—1722).

В 1686 г. вышел в свет трактат Исаака Ньютона (1643—1727) «Математические начала натуральной философии», в котором были изложены аксиомы механики и установлены основные понятия: масса, время, пространство, сила.

Основы науки о прочности (сопротивления материалов) интенсивно разрабатывались в течение XVII—XVIII вв. при изучении растяжения, сжатия, сдвига, изгиба и кручения круглого бруса.

Роберт Гук (1635—1703) установил закон о прямой пропорциональной зависимости между нагрузкой и удлинением бруса при растяжении.

Якоб Бернулли (1654—1705) составил уравнение изогнутой оси бруса.

Леонард Эйлер (1707—1783) создал теорию продольного изгиба центрально сжатого стержня.

Шарль Кулон (1736—1806) разработал теорию кручения круглого бруса.

Позже в этой области плодотворно работали К. Кульман, Б. Сен-Венан, Д. К. Максвелл, Б. П. Клайперон, О. Мор, Е. Бетти, Л. Навье и др.

Значительные достижения науки о сопротивлении материалов связаны с именами русских ученых и инженеров.

М. В. Ломоносов (1711—1765) и И. П. Кулибин (1733—1818) в своих трудах заложили прочные теоретические основы для созда-

ния строительной механики, выделившейся в самостоятельную науку из общей механики в первой половине XIX в.

Д. И. Журавский (1821—1891) впервые разработал теорию расчета мостовых ферм как шарнирно-стержневых систем и создал теорию касательных напряжений при изгибе.

Ф. С. Ясинский (1856—1899) разработал основы расчета стержней на устойчивость.

Существенное развитие теория расчета ферм получила в трудах инженеров-мостовиков Н. А. Белелюбского (1845—1922) и Л. Д. Проскуракова (1858—1926).

Большую роль в развитии отдельных разделов строительной механики (графостатики, основ теории статически неопределимых систем и др.) сыграли работы В. Л. Кирпичева (1845—1913).

В истории отечественной науки и техники видное место занимает инженер-изобретатель В. Г. Шухов (1853—1939), обосновавший методику расчета и разработавший конструкции сетчатых и сводчатых покрытий.

Технический XX век дал новый импульс развитию строительной механики.

Значительное развитие получила теория расчета сложных статически неопределимых систем в трудах П. Л. Пастернака, И. П. Прокофьева, А. А. Гвоздева, С. А. Бернштейна, Б. Н. Жемочкина, Н. И. Безухова, Б. Н. Горбунова, И. М. Рабиновича, А. А. Уманского, П. Ф. Попковича, Н. С. Стрелецкого, В. А. Киселева, Н. К. Снитко и др.

Большой вклад в развитие теории устойчивости сооружений внесли И. Г. Бубнов, С. П. Тимошенко, А. Н. Динник, Н. В. Корноухов, С. Д. Лейтес, А. Ф. Смирнов, А. Р. Ржаницын, Н. К. Снитко, А. С. Вольмир, Ю. Н. Работнов, А. В. Геммерлинг, Р. Р. Матевосян.

Существенное развитие получили теория колебаний деформируемых тел и методы динамического расчета сооружений в трудах И. М. Рабиновича, К. С. Завриева, А. П. Сеницына, Я. Г. Пановко, Б. Г. Коренева, В. В. Болотина, О. В. Лужина и др.

В настоящее время развитие строительной механики идет по пути разработки все более эффективных, имеющих хорошую сходимость и дающих достоверные результаты аналитических и численных методов, ориентированных на широкое применение ЭВМ (А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, А. М. Масленников, А. Ф. Смирнов, Н. Н. Шапошников и др.).

В решение многочисленных проблем сопротивления материалов и строительной механики большой вклад всегда вносили российские ученые.

Ведущее место российские ученые занимают в вопросах разработки и применения вероятностных методов расчета и исследовании надежности конструкций (Н. С. Стрелецкий, А. Р. Ржаницын, В. В. Болотин и др.).

Развитие теории оптимизации в строительной механике также во многом определяется трудами российских ученых (К. М. Хуберян, Ю. А. Радциг, А. И. Виноградов, А. Н. Раевский и др.).

Таким образом, строительная механика была и остается развивающейся наукой, призванной обеспечивать проектировщиков современными методами расчета сооружений, позволяющими совмещать формообразование и оценку прочности, поэлементный расчет и расчет сооружения как единого целого, а также производить оптимизацию и синтез конструкций.

Все это позволяет проектировать и создавать так необходимые современному человеку прочные, надежные, долговечные, экономичные и эстетичные сооружения.

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ СООРУЖЕНИЙ, ИХ ОБРАЗОВАНИЕ И АНАЛИЗ

1.1. Расчетная схема сооружения

Любое сооружение можно рассматривать в виде совокупности твердых тел (элементов), соединенных между собой и работающих как единое целое. Задачей расчета является определение состояния под нагрузкой как всего сооружения, так и отдельных его элементов в целях оценки удовлетворения их условиям прочности, жесткости и устойчивости.

Расчет реального сооружения с учетом всех особенностей его образования, многообразия действующих на него нагрузок и различных физико-механических свойств входящих в него элементов является задачей чрезвычайно сложной. Поэтому при проектировании любого сооружения принимают значительные упрощения, пренебрегая второстепенными факторами, которые заведомо не могут оказать значительного влияния на результаты расчетов. Такой подход приводит к работе не с самим сооружением, а с его моделью, называемой расчетной схемой.

Расчетная схема представляет собой идеализированное, упрощенное изображение реального сооружения, отображающее наиболее важные свойства его действительной работы при различных внешних воздействиях.

Выбор расчетной схемы является одним из самых ответственных этапов расчета сооружения. С одной стороны, расчетная схема должна быть выбрана таким образом, чтобы решение задачи стало возможным и практически приемлемым с позиций сложности, а с другой стороны, она должна правильно отражать действительную работу сооружения под нагрузкой и обеспечивать достаточную точность и достоверность результатов расчета.

Для того чтобы правильно выбрать расчетную схему сооружения, т. е. одновременно достаточно простую и точную, необходимо иметь большой опыт в проектировании сооружений и хорошо представлять сравнительную важность отдельных элементов поставленной задачи.

В строительной механике на основании имеющегося инженерного опыта разработаны общие критерии и подходы к выбору расчетных схем сооружений. Они основаны на опробованных приемах

идеализации элементов сооружений, физических свойств строительных материалов, условий сопряжения отдельных частей сооружения, способов прикрепления сооружения к основанию, возможных внешних воздействий на него и т. д.

Все это подробнее будет рассмотрено далее.

1.2. Твердое тело как элемент расчетной схемы сооружения

При анализе расчетных схем сооружений и выполнении последующих расчетов полагают, что их отдельные части состоят из *абсолютно твердых тел* (не изменяющих свою форму, т. е. таких тел, расстояния между двумя любыми точками которых остаются неизменными при любых внешних воздействиях).

В действительности же все тела в природе под действием различных причин несколько изменяют свою форму, т. е. деформируются. Однако для твердых тел в большинстве случаев эти изменения настолько незначительны, что ими обычно пренебрегают. Абстрагирование от некоторых физических свойств твердого тела является одним из общепринятых упрощений при выборе расчетной схемы сооружения.

Всякое тело имеет три измерения, т. е. является пространственным. Если одно из трех измерений мало по сравнению с двумя другими и им по условию задачи можно пренебречь, твердое тело называют *плоским*, или *диском*.

Удлиненное тело, поперечными размерами которого по сравнению с его длиной можно пренебречь, принято называть *стержнем*, или *брусом*.

Если же все размеры какого-либо тела бесконечно малы или его размерами можно пренебречь по сравнению с размерами других тел, такое тело называют *материальной точкой*, или просто *точкой*. При этом каждое тело можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных материальных точек.

Тело, не имеющее никаких закреплений, препятствующих его движению, и не соприкасающееся с другими телами, называется *свободным*. Положение свободного тела в пространстве или на плоскости определяется степенью свободы.

Степенью свободы твердого тела принято называть число независимых геометрических параметров, определяющих его положение на плоскости или в пространстве. Также положение тела на плоскости или в пространстве можно определить как количество видов движений, которое оно может совершать.

Так, пространственное твердое тело, показанное на рис. 1.1, *a*, может совершать поступательные движения по трем направлени-

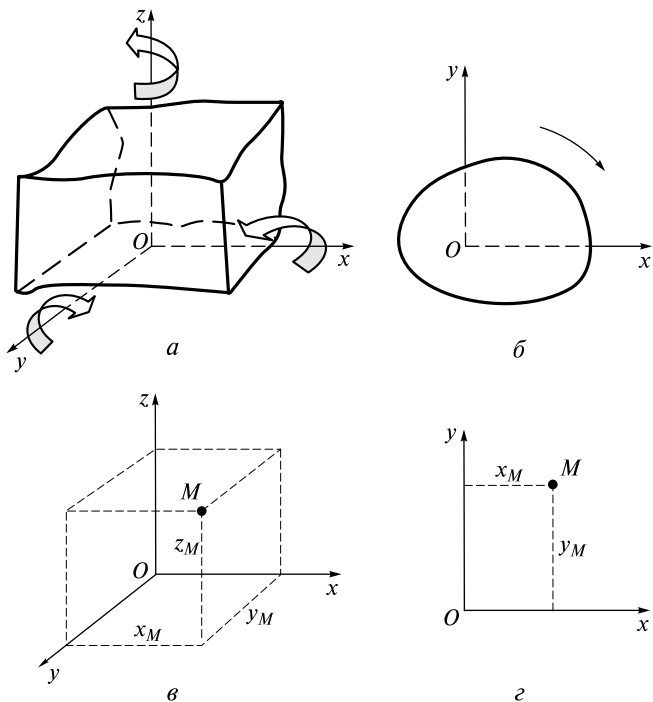


Рис. 1.1

ям (например, в направлениях осей x , y и z) и три вращательных движения вокруг тех же осей. Следовательно, твердое пространственное свободное тело имеет шесть степеней свободы. Плоское твердое тело, показанное на рис. 1.1, б, может совершать на плоскости поступательные движения в двух направлениях (например, в направлениях осей x и y) и одно вращательное движение вокруг какого-либо центра вращения (например, точки O). Следовательно, плоское свободное твердое тело на плоскости имеет три степени свободы. Наконец, положение любой точки (например, M) может быть определено в пространстве (рис. 1.1, в) тремя координатами (три степени свободы), а на плоскости (рис. 1.1, г) — двумя (двумя степенями свободы).

Примеры идеализации твердых тел в расчетных схемах сооружений представлены на рис. 1.2. Прямолинейные стержни сплошного сечения (рис. 1.2, а) представляются в виде осевой линии, соединяющей центры тяжести соседних сечений. В данном случае абстрагируются от описания в расчетной схеме поперечного сечения стержня. В рамках такой же идеализации рассматриваются стержни тонкостенные (рис. 1.2, б) и криволинейные (рис. 1.2, в). Вид плоских тел в расчетных схемах имеют пластины и оболочки

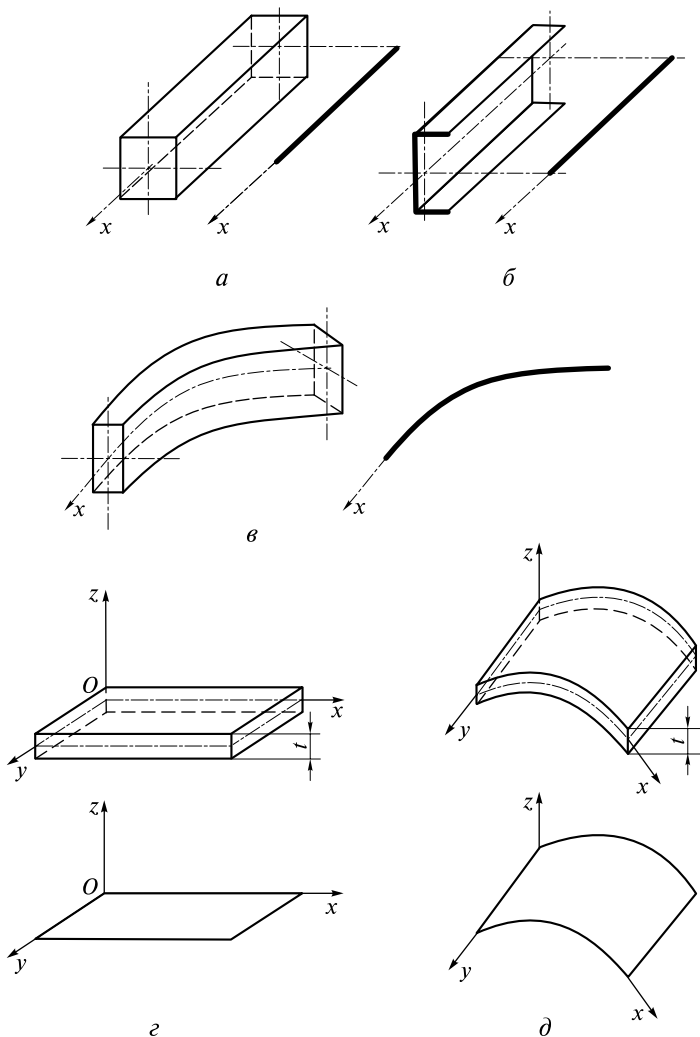


Рис. 1.2

(рис. 1.2, *г* и *д*), которые в расчетных схемах изображаются соответственно в виде срединной плоскости и срединной поверхности.

Совокупности указанных элементов и образуют расчетные схемы сооружений, которые в дальнейшем будем называть *системами*.

В зависимости от того, из каких элементов состоит расчетная схема (пространственных или плоских), различают *пространственные* и *плоские* расчетные схемы.

1.3. Связи и узлы расчетных схем

1.3.1. Связи и узлы плоских расчетных схем

Соединение элементов расчетных схем и прикрепление их к основанию осуществляется с помощью связей.

Связью называется устройство, ограничивающее степень свободы твердого тела. Каждая связь имеет свою *кинематическую характеристику*, которая показывает, каким движениям твердого тела препятствует связь и сколько степеней свободы она уничтожает.

Условно различают связи между телами и связи опорные. Условность заключается в том, что любое основание, на которое опирается расчетная схема, также является твердым телом, но бесконечно большого размера по сравнению с размерами идеализированной схемы сооружения.

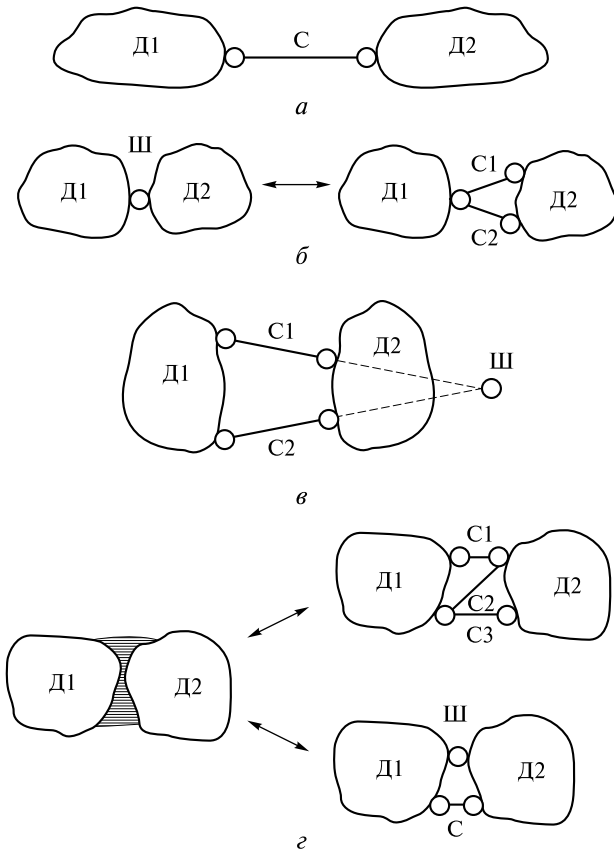
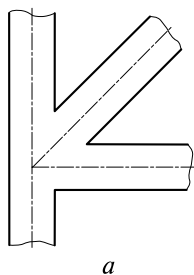
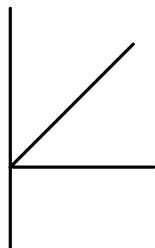


Рис. 1.3

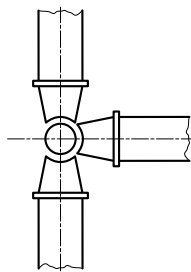


a

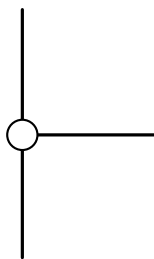


б

Рис. 1.4



a



б

Рис. 1.5

Соединение нескольких элементов системы в одной точке принято называть *узлом* расчетной схемы.

Различают следующие три вида связей (С) между дисками (Д) плоских систем.

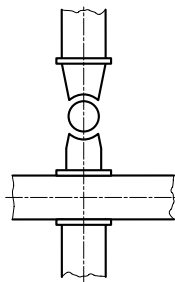
1. *Простая линейная связь* (рис. 1.3, *a*). Ее кинематическая характеристика: связь препятствует поступательному перемещению одного диска относительно другого по направлению оси связи и уничтожает одну степень свободы взаимного перемещения дисков.

2. *Цилиндрический шарнир* (рис. 1.3, *б*). Его кинематическая характеристика: связь препятствует поступательным перемещениям одного диска относительно другого и уничтожает две степени свободы взаимного перемещения дисков.

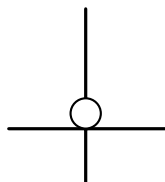
Шарнир (Ш) эквивалентен двум простым линейным связям, сходящимся в точке соединения дисков.

Если два диска соединены двумя линейными связями, оси которых пересекаются за пределами соединения, точку их пересечения принято называть *фиктивным шарниром* (рис. 1.3, *в*).

3. *Жесткое соединение дисков* (рис. 1.3, *г*). Его кинематическая характеристика: жесткое соединение препятствует всем трем взаимным перемещениям соединяемых дисков, т.е. не допускает ни поступательных перемещений, ни вращения одного диска относительно



a



б

Рис. 1.6

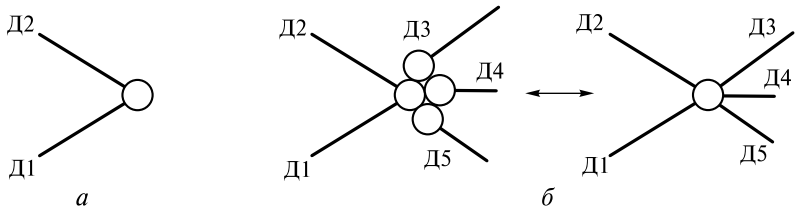


Рис. 1.7

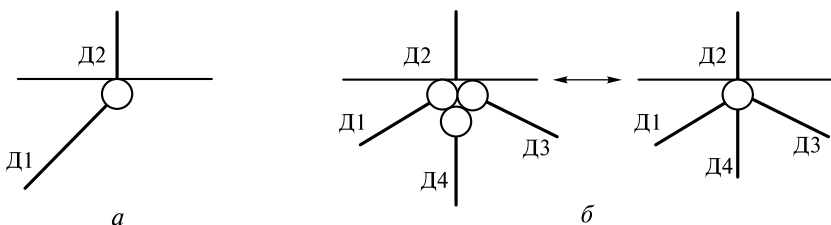


Рис. 1.8

другого, и уничтожает три степени свободы взаимного перемещения дисков, соединяя два диска в единое целое — один диск.

Жесткое соединение дисков эквивалентно трем не параллельным и не сходящимся в одной точке линейным связям или шарниру и одной линейной связи.

В системах, составленных из стержней, различают узлы *жесткие* (рис. 1.4), *шарнирные* (рис. 1.5) и *комбинированные* (рис. 1.6). На рис. 1.4, *а*, 1.5, *а* и 1.6, *а* показаны соответственно конструктивные схемы этих узлов, а на рис. 1.4, *б*, 1.5, *б* и 1.6, *б* — расчетные.

Шарнир, соединяющий два диска, обычно называют *простым*, причем он может быть *сквозным* (рис. 1.7, *а*) или в *комбинированном* узле — *примыкающим* (рис. 1.8, *а*).

Сквозные и примыкающие шарниры могут быть *кратными*. Для присоединения каждого последующего диска необходим один простой шарнир, поэтому в каждом кратном шарнире число простых шарниров будет на единицу меньше числа соединяемых в узле дисков: $\text{Ш} = \text{Д} - 1$.

1.3.2. Опорные связи плоских расчетных схем

Прикрепление системы к основанию (земле) производится связями, которые называются *опорными*.

В расчетных схемах плоских систем используются следующие типы идеализированных схем опорных связей (табл. 1.1).

Типы опорных связей плоских расчетных схем

Наименование опоры	Конструктивная схема	Расчетная схема	Опорные реакции (см. рис. 2.6)
Цилиндрическая шарнирно-подвижная опора		Основная Варианты 	
Цилиндрическая шарнирно-неподвижная опора		Основные Варианты 	
Полное защемление		Основная Вариант 	
Подвижное защемление		Основная Вариант 	
		Основная Вариант 	