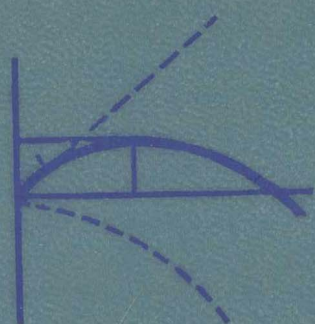
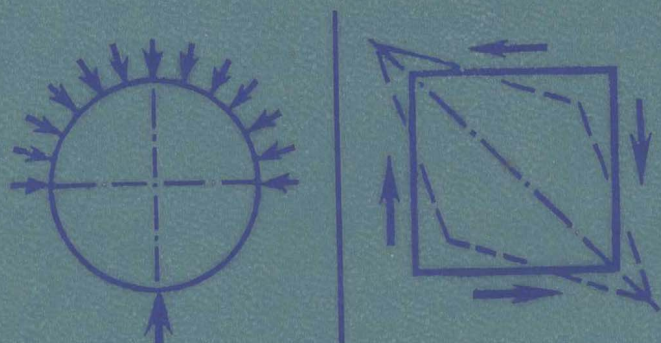


А. М. Михайлов



ОСНОВЫ
РАСЧЕТА
ЭЛЕМЕНТОВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ
В ПРИМЕРАХ



А. М. Михайлов

**ОСНОВЫ
РАСЧЕТА
ЭЛЕМЕНТОВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ
В ПРИМЕРАХ**

**Допущено Главным управлением
кадров и учебных заведений
Министерства монтажных и специальных
строительных работ СССР
в качестве учебного пособия
для техникумов**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1980

ББК 38.5
М 69
УДК 624.04

Рецензенты:
проф. С. А. Иванов (Московский архитектурный институт),
доц. Э. Р. Кольман (ВЗИИТ)

Михайлов А. М.

М 69 Основы расчета элементов строительных конструкций в примерах: Учебное пособие для учащихся техникумов.— М.: Высш. школа, 1980.— 304 с., ил.

В пер.: 80 к.

В книге на примерах из строительной практики рассматриваются современные методы расчета элементов конструкций на прочность, жесткость и устойчивость по предельным состояниям, что выгодно отличает ее от известных пособий по сопротивлению материалов. Примерам каждой темы предшествуют основные теоретические положения, расчетные формулы и методические указания. Разбор примеров проведен по возможности подробно, чтобы можно было проследить за ходом решения самостоятельно. Поэтому книга полезна в равной степени учащимся дневной, вечерней и заочной форм обучения.

Предназначается для учащихся строительных и монтажных специальностей техникумов.

М $\frac{30204-163}{001 (01)-80}$ 208—80

3202000000

6 С4.05
ББК 38.5

Александр Михайлович Михайлов
**ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
В ПРИМЕРАХ**

Редактор Н. Н. Ещенко. Художественный редактор Н. К. Гуторов.
Технический редактор Э. М. Чижевский. Корректор Р. К. Косинова
ИБ № 2114

Изд. № ОТ-311/77. Сдано в набор 18.09.79. Подп. в печать 15.02.80. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 19 усл. печ. л. 18,43. уч.-изд. л. Тираж 50 000 экз. Зак. № 759. Цена 80 коп.

Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Москва, М-54, Валовая, 28

ПРЕДИСЛОВИЕ

Достижения современной науки предоставляют достаточные возможности для возведения экономичных сооружений при одновременном обеспечении долговечности и высокой эксплуатационной способности конструкций, их элементов и соединений. Однако эти возможности не находят еще должного отражения в учебной литературе по сопротивлению материалов для строительных специальностей техникумов, что послужило причиной написания данной книги.

Новизна конструктивных решений (увеличение мощности и габаритов сооружений), повышение параметров рабочих процессов (скоростей, давлений, температурного диапазона условий работы), характерные для многих направлений технического прогресса последних лет, существенно сказались на критериях механической прочности при проектировании, изготовлении и эксплуатации строительных конструкций. Поэтому в пособии, наряду с использованием традиционных для сопротивления материалов методов анализа напряженного и деформированного состояний, отражен подход к определению эксплуатационной способности с позиций предельных упруго-пластических состояний и хрупкого разрушения. Такой подход становится все более характерным для Строительных норм и правил (СНиП).

Цель пособия — оказать помощь учащимся в освоении современных методов расчета *элементов* строительных конструкций на основе сопротивления материалов и существующих норм и подготовить их к последующему, более глубокому изучению строительных конструкций в комплексе. Оно включает 165 примеров с решениями, приложение в виде справочного материала, а также необходимые теоретические сведения и методические указания.

Примеры имеют не только иллюстративное, но и познавательное назначение. Во многих случаях они содержат существенную дополнительную практическую и научно-теоретическую информацию. Решение примеров производится в общем виде, и подстановка числовых значений осуществляется, как правило, на последней стадии расчета. Это позволяет следить за размерностью входящих в формулы величин, создает возможность анализа физического

смысла получаемых результатов и обеспечивает требуемую степень точности конечного результата вычислений.

Большинство примеров связано со строительной практикой, поэтому расчет элементов несущих конструкций согласно Основным положениям проектирования строительных конструкций и оснований (СНиП II-A.10—71) и такелажной оснастки согласно Временной инструкции по проектированию; изготовлению и эксплуатации монтажных приспособлений (ВСН 42—74/ММСС СССР) выполняется *по предельным состояниям*.

В пособии применена Международная система единиц (СИ). При использовании нормативных документов, которые содержат единицы, подлежащие изъятию, можно руководствоваться следующими соотношениями: $1 \text{ кН} = 1000 \text{ Н} \approx 100 \text{ кгс} = 0,1 \text{ тс}$; $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} \approx 10 \text{ кгс/см}^2 = 0,1 \text{ кгс/мм}^2$.

По вопросам, не нашедшим отражения в пособии, но непосредственно примыкающим к рассматриваемым, в тексте имеются ссылки на литературные источники, список которых приведен в конце книги.

Автор выражает благодарность проф. С. А. Иванову и доц. Э. Р. Кольману за полезные замечания, высказанные при рецензировании пособия.

Автор

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

§ I. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Капитальность и долговечность конструкций и сооружений в сочетании с рациональным использованием материала могут быть обеспечены только при тщательном исследовании прочности и жесткости* их элементов. Однако важнейшее требование строительной техники — обеспечение прочности сооружения при наименьшей затрате материала — содержит в себе противоречие, поскольку повышение прочности достигается чаще всего увеличением поперечных размеров конструктивных элементов, в то время как экономия материала заставляет стремиться к уменьшению тех же самых размеров.

Чтобы разрешить это противоречие, в каждом конкретном случае следует установить *оптимальные* размеры, т. е. размеры, при которых прочность обеспечивается без излишних запасов и, таким образом, удовлетворяется экономическая сторона вопроса. Для этого необходимо выяснить, какие нагрузки действуют на рассматриваемый элемент, вычислить вызываемые ими опорные реакции, определить внутренние силы, представляющие собой результат физического взаимодействия частиц, из которых состоит элемент, и, наконец, выбрать такие его размеры, чтобы внутренние силы не превышали предельных значений.

Итак, *определение оптимальных геометрических размеров элемента конструкции, обеспечивающих его прочность при заданном распределении внешних сил*, составляет первую задачу расчета, осуществляемого в рамках сопротивления материалов.

Однако проблема прочности чрезвычайно сложна. Основная трудность заключается в несоответствии между в общем точными методами определения внутренних сил и последующими, часто весьма грубыми, оценками прочности. Такое положение объясняется тем, что разрушение тела зависит от множества факторов, не всегда изученных и не всегда даже известных. Большую роль играет структура материала, которая может быть неоднородной и нестабильной. Существенно влияние условий эксплуатации — характера нагрузок, температурного режима, агрессивности среды и т. д. Реальные мате-

* Под прочностью понимают способность твердого тела воспринимать, не разрушаясь, воздействие внешних сил, под жесткостью — способность противостоять им без существенного изменения формы и размеров.

риалы содержат многочисленные повреждения, начиная от микроскопических дефектов и кончая крупными порами и магистральными трещинами. Лишь в последнее время стали успешно развиваться основы физических теорий разрушения твердого тела, и сейчас не всегда возможно даже качественное объяснение ряда особенностей процесса разрушения. Поэтому использование этих теорий для количественной оценки прочности технических материалов вообще и строительных в частности пока малоперспективно.

Отсюда естественным выглядит подход к проблеме прочности с позиций разработки прикладных решений. Его значение особенно возросло в связи с развитием техники и появлением новых материалов. Такой подход осуществляется в двух направлениях: изучение механических свойств материалов (так называемая «прочность материалов») и исследование прочности элементов конструкций («конструктивная прочность»).

Комплекс научных дисциплин, связанных в той или иной степени с расчетами на прочность, принято относить к разделу теоретической физики, называемому механикой сплошной среды. В отличие от классической механики, имеющей дело с равновесием и движением материальных точек и систем материальных точек, для построения механики реальных сред — твердых, жидких и газообразных — теоремы общего характера приходится дополнять физическими законами или гипотезами о взаимодействии точек, составляющих систему.

Простейшей гипотетической системой является абсолютно твердое тело, т. е. система материальных точек, расстояния между которыми неизменны. В природе такое тело не существует, это некоторая абстракция, позволяющая выделить из всего многообразия свойств реального тела одно — наблюдаемое в определенных условиях постоянство формы и геометрических размеров. «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания *истины*, познания объективной реальности» *. Смысл этого положения состоит в том, что, образуя абстракции, создавая научные понятия о предметах, человек обретает способность разумно действовать.

Материальная точка и абсолютно твердое тело являются объектом теоретической механики **. В тех случаях, когда деформации тела несущественны и ими можно пренебречь, выводы теоретической механики оказываются точными и вполне достаточными. Например, опорные реакции статически определимых балок, усилия в стержнях статически определимых ферм находят из уравнений статики так, как если бы указанные конструкции были абсолютно жест-

* В. И. Ленин. Философские тетради. Конспект книги Гегеля «Наука логики». — Полн. собр. соч., т. 29, с. 152—153.

** Здесь имеется в виду традиционное понимание термина «теоретическая механика», укоренившееся в учебной литературе. Хотя, конечно, механика сплошной среды — это тоже «теоретическая механика».

кими. При рассмотрении грузоподъемных механизмов обычно пренебрегают деформациями звеньев, которые изготовляют весьма жесткими. Поэтому скорости и ускорения, вычисленные по правилам кинематики, точно соответствуют действительным.

Однако постановка вопроса о расчете абсолютно твердого тела на прочность лишена смысла, поскольку в самой терминологии заложена идея неразрушимости и отсутствия каких бы то ни было деформаций. В то же время существует обширный класс систем, которые принципиально не могут быть рассчитаны без допущения возможности их деформирования (так называемые «статически неопределимые системы»). Кроме того, на практике нередко приходится ограничивать значения деформаций, чрезмерное развитие которых способно вызвать недопустимые перемещения и воспрепятствовать нормальной эксплуатации конструкции или сооружения. Таким образом, выявляется вторая задача расчета, которая имеет два аспекта: 1) *определение перемещений с целью раскрытия статической неопределимости*, 2) *обеспечение жесткости элементов конструкций*.

Третья задача связана с расчетом на *устойчивость*, под которой понимают способность тела (элемента) сохранять под нагрузкой свою первоначальную форму равновесия. Если малое приращение нагрузки вызывает сильное нарастание отклонения тела (элемента) от положения равновесия (выпучивание), то говорят, что тело (элемент) потеряло устойчивость. Вопрос обеспечения устойчивости возникает при расчете тонких сжатых элементов и ему уделяется особое внимание, поскольку потеря устойчивости может происходить при нагрузках, безопасных с точки зрения прочности или жесткости.

Итак, *общей задачей расчета, осуществляемого с позиций сопротивления материалов, является обеспечение прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций и сооружений при одновременном удовлетворении требований долговечности и экономичности*.

Необходимость доведения любого расчета до конечного числового результата часто заставляет прибегать к различным упрощениям, справедливость которых подтверждается экспериментально или путем математического анализа. Поэтому решение задач механики можно разбить на три этапа: упрощение сложной физической задачи до такой степени идеализации, что она формулируется математически; решение этой чисто математической задачи; анализ полученных результатов с точки зрения поставленной физической задачи. Нередко учащиеся обращают основное внимание на второй этап и тем самым теряют связь между решением и физическим смыслом задачи. В практической деятельности следует стремиться не столько к применению сложных математических выкладок, сколько к глубокому вниканию в сущность исследуемых физических явлений и их упрощенному расчетному моделированию (схематизации).

§ 2. РЕАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ И ЕГО РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ О СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ И ХАРАКТЕРЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Расчет конструкций с учетом всего многообразия механических свойств твердого тела, точных геометрических размеров, строгого взаимодействия отдельных элементов является или теоретически

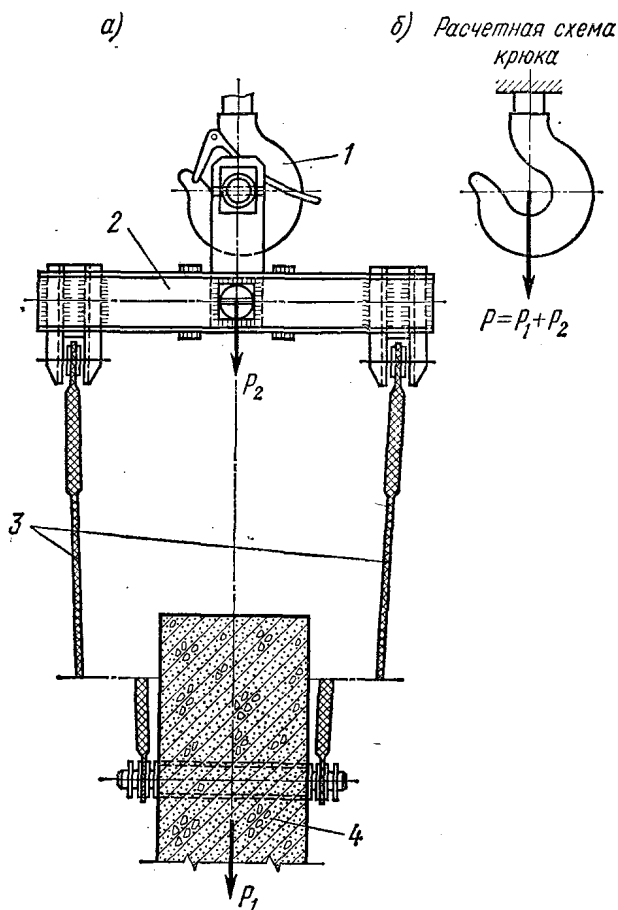


Рис. 1

невозможным, или практически неприемлемым по своей сложности. Следовательно, перед расчетом необходимо провести схематизацию конструкции и отбросить второстепенные факторы, которые не влияют сколько-нибудь заметным образом на достоверность и требуемую степень точности расчета.

Так, при расчете грузоподъемного крюка 1 (рис. 1, а) в первую очередь надо учесть вес P_1 поднимаемого груза (железобетонной

колонны 4) и вес P_2 траверсы * 2, рассматривая их как единое абсолютно твердое тело, воздействие которого сводится к суммарной силе $P = P_1 + P_2$, приложенной к крюку (рис. 1, б). В то же время следует отбросить такие несущественные факторы, как собственный вес канатов 3, сопротивление воздуха поднимаемой траверсе и т. д.

Расчетной схемой называется упрощенная, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности реального объекта (конструкции или отдельного элемента), определяющие его поведение под нагрузкой. Выбор расчетной схемы является сложным и ответственным шагом. От него зависит прежде всего качество расчета. Расчет по неправильно выбранной схеме не может быть достоверным даже при использовании самых точных методов. Если для расчета крюка вес груза и траверсы можно принять за единое воздействие, то при расчете самой траверсы ее уже нельзя рассматривать как абсолютно твердое тело. Здесь требуется иная схематизация (см., например, рис. 151), и жесткость траверсы должна быть подтверждена соответствующим расчетом. Таким образом, в зависимости от поставленной задачи расчетная схема видоизменяется, т. е. для каждой расчетной схемы существует граница, за которой она становится неприемлемой.

В целях упрощения теории расчета элементов конструкций приходится вводить ряд допущений о свойствах материалов и характере деформирования.

1-е допущение. *Материал представляет собой однородную сплошную среду.* Предположение об однородности позволяет отвлечься от структурных особенностей материала и считать, что любой объем, выделенный из тела (конструкции), воспринимает часть общей нагрузки, приходящейся на все тело (конструкцию). Такое предположение, строго говоря, не соответствует действительности, поскольку оно противоречит молекулярно-атомистическому воззрению на строение вещества. К тому же большинству конструкционных материалов присуща неоднородность на уровне гораздо более крупных частиц, чем атомы или молекулы. Так, например, строительная сталь при нормальной температуре состоит из двух компонентов: феррита и цементита. Феррит — почти чистое железо, имеющее в небольшом количестве растворенный углерод и другие химические элементы, — образует в стали хаотично ориентированные зерна (кристаллиты **) площадью 2000...6000 мкм². Цементит — карбид железа (Fe_3C) — образует с ферритом смесь (перлит), заполняющую главным образом участки между зернами феррита. Работа стали зависит от соотношения этих двух компонентов. Чем меньше зерно, тем равномернее перлит распределен по объему стали, тем более упорядочена

* Траверса — жесткое монтажное приспособление для подъема элементов конструкций и оборудования. В рассматриваемом случае она призвана обеспечить вертикальное положение колонны во время монтажа.

** Однородное твердое тело, имеющее форму правильного многогранника, атомы которого расположены в определенном порядке и образуют пространственную решетку, называется кристаллом. Неполный кристалл, т. е. кристалл с неправильными границами, называется к р и с т а л л и т о м.

в среднем взаимная ориентация зерен и тем больше оснований считать сталь однородным материалом, несмотря на неоднородность ее микроструктуры *.

Заведомо неоднороден такой материал, как бетон. Он состоит из бессистемно разбросанных зерен заполнителя (гравия, щебня, керамзита, шлака, песка и пр.) различной крупности и формы, которые скреплены цементной массой или другим вяжущим веществом. Но размеры бетонных элементов (как, впрочем, и стальных) велики по сравнению с размерами зерен, поэтому практически и бетон можно считать в среднем однородным (квазиоднородным **).

Предположение об однородности материала неотделимо от понятия сплошной среды, т. е. среды непрерывно (без пустот) заполняющей отведенный ей объем. Свойство непрерывности позволяет использовать в расчетах методы анализа бесконечно малых величин (дифференциальное и интегральное исчисления). Обычно сплошную среду принимают *изотропной*, полагая, что физико-механические свойства любого выделенного из нее тела одинаковы по всем направлениям. Благодаря мелкозернистой структуре квазиизотропны макрообъемы стали, хотя отдельно взятые кристаллиты феррита (микрообъемы) анизотропны.

В некоторых случаях предположение об изотропии неприемлемо. К анизотропным материалам относится древесина, прочность и деформативность которой зависят от направления усилия по отношению к расположению волокон и годовичных слоев. Анизотропны конструкционные пластические массы (стеклопластики, органическое стекло, винилпласты, пенопласты, сотопласты, древесные пластики и др.), у которых изменчивость механических свойств обусловлена неоднородностью структуры и спецификой изготовления.

2-е допущение. *Материал до определенного предела нагружения работает упруго.* Упругостью называется способность материальных тел восстанавливать первоначальную форму и размеры после снятия нагрузки. Отсюда деформации, полностью исчезающие после снятия нагрузки, соответственно называются *упругими* в отличие от *пластических*, или *остаточных*, которые не исчезают.

Изучение поведения упругих тел произвольной формы, нагруженных произвольными силами, составляет предмет той ветви механики твердого деформируемого тела, которую называют *теорией упругости* или *математической теорией упругости*. Последним термином обычно хотят подчеркнуть, что в пределах упругой работы материала определение усилий и деформаций является строго поставленной математической задачей, решение которой получается в результате интегрирования некоторых систем дифференциальных уравнений.

* Микроструктура — кристаллическое строение материала, обнаруживаемое с помощью микроскопа (в отличие от макроструктуры — строения, видимого невооруженным глазом или при малом увеличении).

** К в а з и — приставка, означающая «якобы», «мнимый».

Методы теории упругости, при всей их общности и точности, еще не дают возможности судить о несущей способности или пригодности к эксплуатации реальных конструкций. К тому же строгая постановка вопроса об определении усилий и деформаций часто приводит к непреодолимым математическим трудностям. Поэтому параллельно с изысканием способов точного решения задач механики деформируемого тела идет развитие *прикладной теории упругости*, в которой кроме предпосылки об идеальной упругости материала вводится ряд дополнительных гипотез и допущений относительно характера деформаций. К прикладному направлению относится *сопротивление материалов*. Эта дисциплина рассматривает одномерные задачи теории упругости, так как изучаемые тела — б р у с ь я — имеют один размер (длину l), значительно превышающий два других (поперечные размеры b и h). Для строительной практики характерен *прямой брус* (рис. 2), к форме которого могут быть сведены многие конструктивные элементы. Примером *кривого бруса* служит грузоподъемный крюк (см. рис. 1, б).

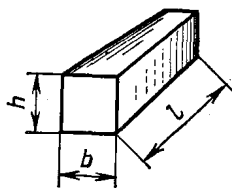


Рис. 2

Но брусья не исчерпывают геометрическую схематизацию элементов строительных конструкций. На рис. 3, а изображена *оболочка* — тело, ограниченное двумя криволинейными поверхно-

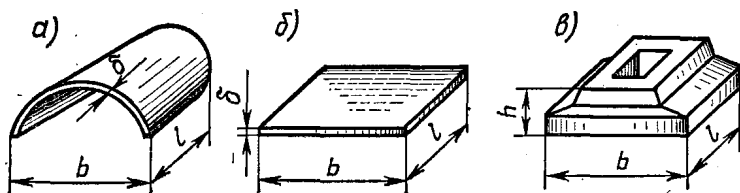


Рис. 3

стями, у которого длина l и ширина b велики по сравнению с толщиной δ . Если тело при тех же соотношениях размеров ограничено параллельными плоскостями (рис. 3, б), то оно называется *пластиной*. К оболочкам относятся стенки сосудов для хранения жидкостей, газов и сыпучих материалов (стенки резервуаров, газгольдеров, бункеров и т. п.), листовые конструкции доменных цехов (кожух доменной печи, воздухонагревателей, пылеуловителя), купола и своды зданий. К пластинам могут быть отнесены плоские днища сосудов, настил рабочих площадок цехов, обшивка каркасных кровельных и стеновых панелей.

Тела, у которых все три размера одного порядка, называются *массивами*. К ним относятся фундаменты (рис. 3, в), подпорные стенки и т. п.

Определение усилий и деформаций оболочек, пластин и массивов в большинстве случаев неосуществимо методами сопротивления материалов. Подобные задачи могут быть решены только с позиций теории упругости, основные предпосылки которой отличаются большей широтой и не ограничиваются такой формой тела, как брус.

За последнее время возросло значение расчетов строительных конструкций с учетом развития пластических деформаций. Общие законы поведения твердых тел за пределом упругости устанавливает другая ветвь механики деформируемого тела — *теория пластичности*. В ней, как и в теории упругости, наряду с решением строго поставленных математических задач осуществляется разработка упрощенных методов расчета путем введения дополнительных гипотез физического или геометрического характера. Круг вопросов второго направления составляет содержание *прикладной теории пластичности*, развитие которой существенно влияет на совершенствование теории сопротивления материалов. В настоящее пособие включены начальные сведения и простейшие задачи теории пластических деформаций.

3-допущение. *Перемещения точек элемента (или системы элементов), обусловленные его деформацией, весьма малы по сравнению с размерами самого элемента.* На основе этого допущения вводится принцип начальных размеров, согласно которому при составлении уравнений равновесия (уравнений статики) элемент или систему элементов рассматривают как недеформируемое тело, имеющее после нагружения те же геометрические размеры, что и до нагружения. Такой подход позволяет пренебрегать изменениями в расположении внешних сил при деформировании реального тела. Он справедлив для жестких элементов и кинематически неизменяемых систем.

4-е допущение. *Перемещения точек элемента (системы элементов) в упругой стадии работы материала пропорциональны силам, вызывающим эти перемещения.* Системы, подчиняющиеся такой закономерности, называются *линейно-деформируемыми*. Для них справедлив принцип независимости действия сил (принцип суперпозиции), который может быть сформулирован следующим образом: *результат воздействия нескольких сил равен сумме результатов воздействия каждой силы, прикладываемой в отдельности.* Этот принцип, широко используемый в теоретической механике, к деформируемым телам, применим только при соблюдении трех предыдущих допущений. Он позволяет расчленять сложные задачи на более простые, решение которых известно или легко осуществимо.

Перечисленные допущения не исчерпывают всевозможных приемов расчетной схематизации, и в дальнейшем, при рассмотрении конкретных задач, будут вводиться другие упрощения. Следует лишь четко уяснить, что успешное выполнение любого расчета зависит в первую очередь от умения отделить в реальной конструкции существенное от несущественного.

§ 3. ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ВНУТРЕННИЕ СИЛЫ.
ПЛАН РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВНУТРЕННИХ
СИЛ В БРУСЕ

В работе элемента конструкции участвуют внешние воздействия и внутренние силы. К первым относятся силовые воздействия от нагрузок (включая опорные реакции), а также воздействия от изменения температуры, смещения опор, усадки и других подобных явлений, вызывающих реактивные силы.

Нагрузки классифицируют по различным признакам. По способу приложения они могут быть объемными или поверхностными. Объемные силы непрерывно распределены по всему объему, занимаемому элементом. К их числу относятся, например, сила тяжести и силы инерции. Нагрузка, приходящаяся на единицу объема, называется *интенсивностью* объемной нагрузки. Она выражается в Н/м³, кН/м³ и т. д.

Если внешние силы являются результатом непосредственного взаимодействия элемента с другими телами (твердыми, жидкими или газообразными), то они прикладываются только по площадкам контакта и называются *поверхностными*. Сюда относятся: давление жидкости или газа на стенки сосуда, снеговая нагрузка на кровлю здания, ветровая нагрузка и др. Интенсивность поверхностной нагрузки p выражается в Н/м², кН/м² и т. д.

Поскольку соприкосновение реальных, т. е. деформируемых, тел всегда происходит не в точке, а по некоторой, пусть даже очень малой, площадке, все поверхностные нагрузки являются *распределенными*. Однако в тех случаях, когда площадка пренебрежимо мала по сравнению с размерами рассматриваемого элемента, вводят понятие *сосредоточенной* силы P^* как равнодействующей давления по указанной площадке (например, сила, обусловленная давлением обода колеса на рельс).

В практических расчетах часто встречается нагрузка, распределенная по длине элемента конструкции. Так, например, на каждую промежуточную балку перекрытия здания (рис. 4, а) приходится полоса поверхностной нагрузки p шириной a (рис. 4, б). Интенсивность нагрузки, распределенной по длине балки (рис. 4, в),

$$q = pa \quad (I.1)$$

выражается в Н/м, кН/м и т. д.

В рассматриваемом случае интенсивность постоянна по длине, поэтому нагрузка называется *равномерно распределенной* и графически изображается в виде прямоугольника. Однако интенсивность может быть переменной и тогда нагрузка распределяется по более сложному закону: треугольному (например, при гидростатическом давлении — давлении покоящейся жидкости), трапецеидальному (нагрузка от собственного веса двускатных и односкатных балок),

* В теоретической механике понятие сосредоточенной силы является строгим, поскольку там рассматриваются абсолютно твердые тела.

синусоидальному (нагрузка от ветрового напора на элементы типа оболочек) и т. п.

В процессе расчетной схематизации реальные нагрузки не всегда могут быть сведены лишь к сосредоточенным и распределенным

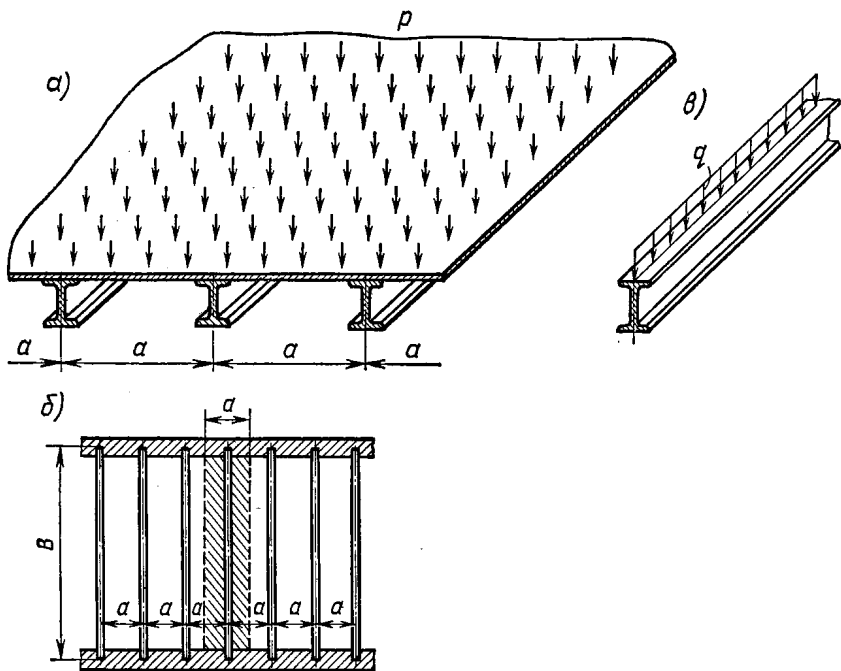


Рис. 4

силовым воздействиям. Возможны и моментные воздействия — в виде сосредоточенных моментов и моментов, распределенных по длине

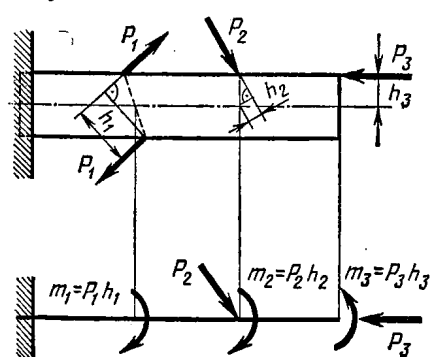


Рис. 5

элемента или его поверхности. На рис. 5 показано, как появляются сосредоточенные моменты m_1 , m_2 и m_3 в результате замены бруса его продольной осью и приведения к ней поверхностных сил P_1 , P_2 и P_3 , приложенных в плоскости чертежа. Сосредоточенные моменты выражаются в Н·м, кН·м и т. д.

По характеру изменения в процессе приложения нагрузки делят на статические, динамические и повторно-переменные. К *статическим* относятся нагрузки, не меняющиеся со временем (например, нагрузка от собственного веса)

или меняющиеся настолько медленно, что вызываемые ими уско-

рения и силы инерции элементов конструкций пренебрежимо малы (например, снеговая нагрузка).

Динамические нагрузки в отличие от статических меняют свое значение, положение или направление в короткие промежутки времени (движущиеся нагрузки, ударные, сейсмические и др.), вызывая большие ускорения и силы инерции, что приводит к колебаниям конструкций и сооружений.

Повторно-переменными называются нагрузки, многократно (до нескольких миллионов раз) изменяющие со временем значение или значение и знак. Разрушение материала под действием таких нагрузок называется *усталостным** (например, разрушение куска проволоки от многократного перегибания, рис. 6). Оно характерно для металлов, сплавов и бетона. Способность материала сопротивляться усталостному разрушению называется *выносливостью*.

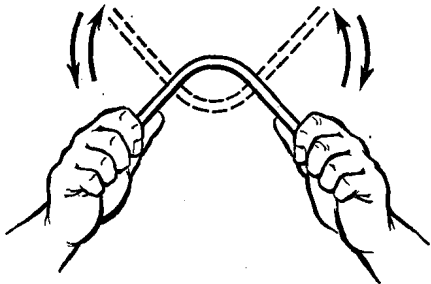


Рис. 6

По продолжительности действия нагрузки делят на постоянные и временные. К *постоянным* относятся нагрузки, действующие в течение всего времени существования конструкции, здания или сооружения (например, вес несущих и ограждающих конструкций, вес и давление грунта).

Временные нагрузки действуют на протяжении отдельных периодов эксплуатации или возведения объекта. К ним относятся нагрузки от веса людей, материалов и оборудования; давление жидкостей, газов и сыпучих материалов в сосудах и трубопроводах; атмосферные нагрузки (снеговая, ветровая, гололедная); температурные, монтажные, сейсмические, взрывные, аварийные и прочие воздействия.

В недеформированном состоянии, т. е. при отсутствии внешних воздействий, связность тела обусловлена силами взаимодействия атомов. Эти силы стремятся сохранить тело как единое целое, препятствуя любой попытке изменить взаимное расположение атомов и таким образом деформировать тело. Внешние воздействия, наоборот, стремятся вызвать деформирование тела путем изменения межатомных расстояний, взаимного расположения атомов и сил их взаимодействия. Однако если бы механика ставила перед собой задачу изучать силы, действующие на каждый атом в отдельности, пользоваться ее аппаратом было бы чрезвычайно трудно. Поэтому меха-

* Термин усталость сохранился еще с первой половины прошлого столетия, когда ошибочно полагали, что пластичный материал после длительного срока работы превращается в хрупкий в результате изменения структуры, т. е. «устает». В настоящее время установлено, что в условиях переменного нагружения изменение структуры не происходит, а возникают поперечные зародышевые микротрещины, постепенно разрастающиеся и объединяющиеся в макротрещину, которая проникает в глубь элемента и в конце концов вызывает его разрушение.

ника, как указывалось в предыдущем параграфе, рассматривает поведение *макрообъемов* материала, т. е. объемов, состоящих из большого числа атомов и имеющих такие размеры, которые позво-

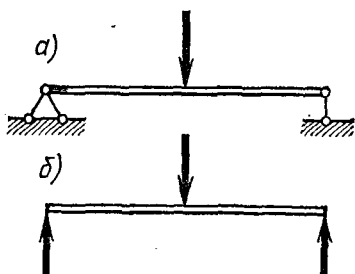


Рис. 7

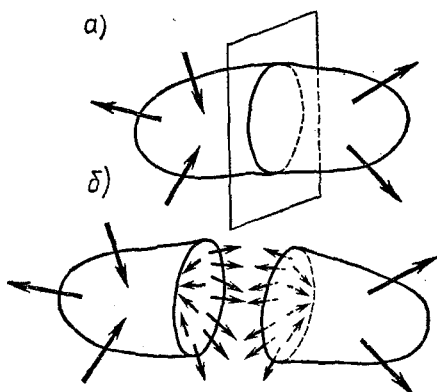


Рис. 8

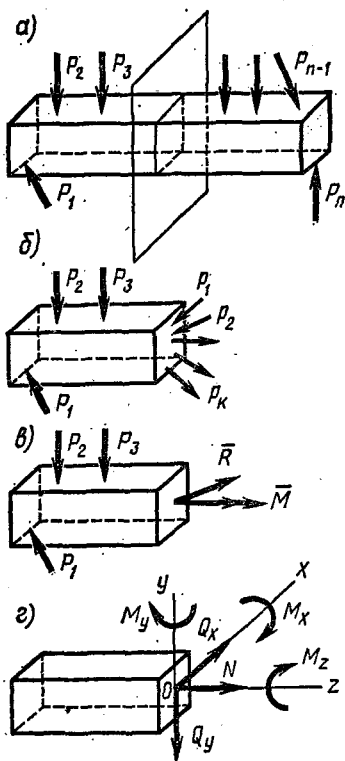


Рис. 9

ляют считать материал сплошным и однородным. Сплошное однородное тело не имеет в своем составе взаимодействующих частиц, и его целостность обеспечивают внутренние связи. Из теоретической механики известна так называемая *аксиома связей*, которая гласит: равновесие тела сохранится, если действие связей, закрепляющих тело в пространстве (рис. 7, а), заменить их реакциями (рис. 7, б).

Применяя эту аксиому к деформируемому телу, можно мысленно расщечь его произвольной плоскостью (рис. 8, а), отделить одну часть от другой и взамен нарушенных связей приложить к каждой части силы, равные усилиям связей (рис. 8, б). Такие силы, называемые *внутренними*, непрерывно распределяются по образовавшемуся сечению (вследствие допущения о сплошности материала). Их находят посредством специального приема — метода сечений, сущность которого заключается в следующем.

Пусть на тело, имеющее форму бруса, действует система взаимно уравновешенных сил $P_1, P_2, \dots, P_n$ (рис. 9, а). Для определения внутренних сил производят последовательно четыре операции: 1) рас-