

Н. М. Мальков

А. А. Стоценко

Построение расчетных схем
сооружений



УДК 624.014

Мальков Н.М., Стоценко А.А. Построение расчетных схем сооружений. Учебное пособие. - Владивосток: ДВПИ, 1986, с. 80.

Целью пособия является формирование знаний и первоначальных умений в построении расчетных схем сооружений. Уделяется внимание общим принципам построения идеализированных моделей на базе диалектического материализма.

Разбираются элементы расчетных схем сооружений. Дается классификация расчетных схем. Описывается методика построения расчетных схем плоских стержневых систем. Приводятся примеры построения расчетных схем.

Данное пособие предназначено для студентов инженерно-строительных специальностей.

Ил. 39, библиогр. - 31 назв.

Рецензенты: д.т.н., проф. В.И. Федоров, к.т.н., доц. В.А. Смедов, с.н.с. А.А. Ковалевский.

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Роль расчетных схем сооружений в инженерной деятельности	4
2. Об изучении вопросов построения расчетных схем сооружений	5
3. Цель и содержание учебного пособия	7
Гл. 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АБСТРАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ	8
1.1. Абстрагирование - метод научного познания	18
1.2. Практика - основа абстрагирования	10
1.3. Принципы построения абстракций	13
1.4. Выводы	14
Гл. 2. ЗАДАЧИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И РАСЧЕТНАЯ СХЕМА	15
2.1. Задачи строительной механики	15
2.2. Расчетная модель сооружения	17
2.3. Исторический очерк развития расчетных схем	20
2.4. Выводы	28
Гл. 3. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	29
3.1. Место стержневых систем в общем классе сооружений, рассматриваемых строительной механикой	29
3.2. Элементы расчетных схем	30
3.2.1. Стержни	31
3.2.2. Соединения, опоры	37
3.2.3. Нагрузка	39
3.3. Классификация расчетных схем плоских стержневых систем	41
3.3.1. Фермы	42
3.3.2. Балки	46
3.3.3. Рамы и арки	46
3.3.4. Комбинированные системы	46
Гл. 4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ СТЕРЖНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ	49
4.1. Классификация стержней	49
4.2. Классификация узлов и опор	51
4.3. Методика построения расчетных схем	65
4.4. Примеры построения расчетных схем сооружений	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
1. Пути дальнейшего развития и совершенствования расчетных схем	76
ЛИТЕРАТУРА	78

ВВЕДЕНИЕ

1. Роль расчетных схем сооружений в инженерной деятельности. Проблемы прочности, жесткости, устойчивости, долговечности, надежности зданий, сооружений, деталей машин, конструкций судов, самолетов, остова растений и животных занимают значительное место в деятельности инженеров и исследователей соответствующего профиля. Строительная механика, занимавшаяся изучением этих проблем для разработки методов определения внутренних усилий, оценки прочности, долговечности, надежности сооружений, как любая естественная наука должна пользоваться идеализированной моделью. В строительной механике такая модель получила название расчетной схемы.

Процесс перехода от реального сооружения к расчетной схеме должен быть построен на марксистско-ленинской теории познания и представляет собой одну из основных задач проектирования, непосредственного возведения зданий и исследования их прочности.

Специалист-расчетчик должен обладать умением видеть в реальном сооружении его расчетную схему. Это умение вырабатывается в процессе работы, приходит с опытом проектирования и расчета. Построение расчетной схемы, правильно отражающей работу сооружений, может не только устранить ошибки конструирования, но и получить параметры оптимальных, экономичных несущих конструкций, а порой и сформулировать специфические требования к материалам и изделиям.

Основная масса инженеров, занимавшихся проектированием в проектных институтах на местах, имеет дело с привязкой типовых зданий к конкретным природно-климатическим условиям района. При этом, как правило, проводится пересчет некоторых элементов конструкции на новую нагрузку по готовой (типовой) расчетной схеме. Работа с типовыми проектами привела к тому, что в настоящее время, когда объем нетипового проектирования стал возрастать, ощущается дефицит специалистов по расчету. Тенденция увеличения удельного веса нетипового проектирования приводит к необходимости, чтобы каждый инженер, занимавшийся проектированием, обладал умениями строить и анализировать расчетные схемы.

Умение строить расчетные схемы необходимо не только

проектировщикам, не менее важно оно и для инженеров — непосредственных создателей сооружений. Представление о работе сооружений, т.е. о его расчетной схеме, дает возможность инженерам, работающим на строительной площадке, грамотно монтировать конструктивные элементы, проводить укрупненную сборку, планировать, осуществлять перевозку и складирование деталей. Особое внимание должно быть уделено правильному выполнению узлов и деталей, чтобы обеспечить ту схему работы, которая заложена в проектном решении. Грамотная замена одних конструкций другими, необходимость которой возникает уже в процессе строительства, невозможна без представления об их расчетных схемах. Кроме того, на площадке приходится иметь дело со вспомогательными и временными устройствами (лесами, кружалами, опалубкой, кондукторами и др.), прочность которых должна быть обеспечена для безопасной работы людей.

Исследование новых конструктивных схем сооружений немислимо без их предварительного расчетного анализа, который включает как органическую часть построение расчетных схем. Постановка научных экспериментов, разработка вопросов прочностного моделирования, конструирования испытательных стендов и оборудования требует особой деятельности инженеров-исследователей, связанной с расчетом сооружений, не встречающейся ни при проектировании, ни на строительной площадке.

Ошибки в построении расчетных схем и основанных на них методах во всех областях деятельности инженера ведут к значительным и невозполнимым материальным потерям, наносят моральный ущерб, а порой связаны с человеческими жертвами.

Несколько примеров разрушений, произошедших уже в последнее время, причина которых в необъективных представлениях о работе сооружений и построенных на них методах расчета, приведены в книге Клячко В.С. и Савицкого Е.М. (Металлы космической эры. — М.: Советская Россия, 1972). Приведем выдержку из этой книги: "В морозный день 31 января 1951 года обрушился автодорожный мост в Квебеке (Канада). По нему в это время проезжала всего одна машина. Во время аварии упали в реку три пролета моста, каждый длиной в 54 метра. Вы думаете, мост был какой-нибудь старинный? Ничего подобного — его сдали в эксплуатацию в 1947 году.

В Бельгии из 52 сварных мостов, построенных в 1934-38 годах, почти пятая часть к 1940 году вышла из строя. 14 марта 1938 года обвалился мост пролетом 73,5 метра через канал Альберта возле

Ласселта, введенный в эксплуатацию за год с небольшим до этого. С 1947 по 1955 год произошло четырнадцать подобных случаев...

В США зарегистрировано много случаев разрушения судов. В январе 1943 года на тихой воде судостроительного завода переломился при подготовке к ходовым испытаниям танкер "Скэнекетти" водоизмещением 7320 тонн...

В начале зимы 1960 года на Карагандинском металлургическом заводе обрушился пролет недавно выстроенной транспортной галереи.

В августе 1964 года рухнуло одно из самых высоких сооружений в мире - 400-метровая антенная мачта станции "Лоран" на юго-западном побережье Гренландии..."

Таким образом, знание и умение строить и исследовать расчетные схемы необходимо во всей многогранной деятельности инженера-строителя. Обучение будущих инженеров, следовательно, должно быть направлено на развитие навыков в построении и анализе расчетных схем. Инженер должен уметь строить и видеть расчетную схему в реальном объекте, а также конструировать детали, узлы и сооружение в целом по заданной расчетной схеме.

2. **Об изучении вопросов построения расчетных схем сооружений.** Существует мнение, что изучение принципов построения расчетных схем (моделей) сооружений является задачей, которую должны решать в курсах инженерных конструкций. Видимо, поэтому в курсах строительной механики [15, 19, 24] большое внимание уделяется принципам и методам расчета (определению усилий и перемещений от различных воздействий) для заданных моделей, а о расчетных схемах дается только понятие [15, 19] или упоминается вскользь [24, 27].

Если рассмотреть многие научные работы, посвященные расчету сооружений на различные воздействия, то здесь можно проследить ту же тенденцию - авторы обращают основное внимание созданию методов, способов и приемов расчета, а не анализу и обоснованию расчетных моделей.

В курсах инженерных конструкций принципы построения расчетных схем также не рассматриваются, в них предлагаются схемы частных сооружений, разбираемых в качестве примеров конструирования.

Следовательно, принципы построения расчетных схем в процессе обучения будущего инженера не разбираются, а поэтому

выпадает связь между расчетом и конструированием реальных сооружений, между объектом и его моделью, то есть нарушается взаимосвязь между этапами познания объективной реальности, определенных В.И. Лениным в известной формуле: "от живого созерцания к абстрактному мышлению, и от него к практике".

Анализ истории создания расчетных моделей показывает, что в большинстве случаев (если не всегда) они являлись результатом творчества инженеров и ученых различных специализаций и решающую роль играли специалисты по механике. Более того, можно утверждать, что история строительной механики является историей создания, развития и совершенствования расчетных моделей. Это является следствием того, что абстрактная модель характеризуется задачами и спецификой изучаемого курса или, как говорят, определяется типом ситуации.

3. **Цель и содержание учебного пособия.** В результате многолетних экспериментов, проводимых кафедрой строительной механики и механики грунтов Дальневосточного политехнического института со студентами старших курсов, молодыми инженерами и инженерами старших поколений, выяснилось, что построить расчетную схему сооружения, объяснить принятые схемы стержней, узлов, опор они в большинстве случаев не могут. То есть современное обучение не дает инженеру знаний о том, как перейти от реального сооружения к расчетной схеме и наоборот.

В связи со сложившимся положением в курсе строительной механики, читаемый на инженерно-строительном факультете, было решено ввести раздел "Построение расчетных схем сооружений". Как уже отмечалось, в современных учебниках не уделяется должного внимания этому вопросу. Введение такого раздела в строительную механику позволит в значительной степени привязать преподавание дисциплины к специфике специальности - рассматривать те сооружения, с которыми будет сталкиваться будущий инженер. Анализ расчетных схем, характерных для определенной специализации, позволяет наметить те вопросы, которые требуют более глубокой проработки. На примере построения абстрактных моделей по изучению прочности сооружений можно еще раз показать применение общего диалектико-материалистического подхода к процессу познания, то есть конкретного закрепления общих мировоззренческих понятий.

В учебном пособии рассматриваются:

- в первой главе - общие принципы построения абстрактных моделей,
- во второй - задачи строительной механики (тип ситуации) и соответствующая модель,
- в третьей - элементы расчетных схем стержневых систем, проводится классификация расчетных схем,
- принципы построения расчетных схем, методика их построения и примеры - в четвертой главе.

По-видимому, первое издание настоящего пособия не лишено недостатков. Поэтому авторы будут благодарны критическим замечаниям в их адрес.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АБСТРАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ

1.1. Абстрагирование - метод научного исследования. Человеческое познание, жизнь человека как общественного существа немислимы без абстракции. Человек не может ни познавать, ни осуществлять общение, ни успешно осуществлять практическую деятельность без абстрагирующей деятельности мышления. Стождествление вещей между собой и их различие уже представляется как такая деятельность.

В материальном мире все предметы находятся во взаимосвязи и обусловленности. Однако для того, чтобы познавать окружающий мир, открывать действующие в нем законы, необходимо выделить определенные связи, цепи, звенья, свойства и абстрагировать их от иных частей и сторон.

Первоначально человек осуществляет этот акт не с определенной целью, а потому, что его к этому вынуждала производственная деятельность и общение с другими людьми. Человек абстрагировал, не осознавая значение этих операций и не предвидя заранее результат. Освоение и обобщение опыта общественной, практической и познавательной деятельности привело к тому, что абстрагирование становится целенаправленным актом. Абстракция начинает функционировать как метод, прием исследования, как путь к получению результатов с заранее определенной целью. Именно в таком виде абстракция выступает в науке. Научная абстракция суть "сокращения, в которых мы охватываем, подобно их общим свойствам, множество чувственно воспринимаемых вещей". Также определение дал научной абстракции Ф.Энгельс [2].

Следует, однако, отличать исторический процесс формирования тех продуктов познавательной деятельности, которые в настоящее время характеризуются как абстракция, от самого процесса абстрагирования в современной форме. В первом случае абстрактность самих по себе продуктов познания не является целенаправленной процедурой абстрагирования, она есть суммарный итог познавательной деятельности человека. В развитии науки модели типа материальной точки выступали как окончательный этап построения теоретической концепции, связанной с ее обоснованием и границей применимости. В отличие от этого абстрагирование как специальная процедура строится в сознании на основе теоретических предпосылок. Современный исследователь с самого начала ставит задачу упрощения изучаемого явления и создания его абстрактной модели, которая выступает как исходный пункт построения теории.

Расчетные схемы сооружений относятся как раз к такого рода абстракции. В качестве примера построения идеализированной модели ниже приводится рассуждение С.Э.Хайкина [3].

"Наблюдая то или иное физическое явление, мы обнаруживаем, что одни свойства реальных объектов существенно сказываются на ходе изучаемого явления и на конечном результате, другие играют второстепенную роль и практически на ход явления не влияют. Так, если мы изучаем распределение сил, с которыми тяжелая балка действует на две опоры, на которых она лежит, то мы обнаруживаем на опыте, что распределение это существенно зависит от расположения опор и не зависит от прогиба балки, если она достаточно жестка и прогиб мал. Это значит, что ее упругость не влияет на распределение сил давления на опоры. Поэтому при расчете этих сил мы можем реальную балку, обладающую конечной упругостью и способностью деформироваться, заменить воображаемой абсолютно жесткой, недеформированной балкой. Так мы приходим к представлению об абсолютно твердых недеформируемых телах. Это существенно упрощает теоретическое рассмотрение задачи".

Таким образом, С.Э.Хайкин ставит задачу: изучение распределения сил, с которыми тяжелая балка действует на две опоры, принимает предпосылку о несущественном влиянии прогибов балки и приходит к расчетной схеме - недеформируемому телу. Здесь

можно отметить, что идеализированная модель - абсолютно твердое тело - послужила основой целой науки, изучающей равновесие и движение таких тел, - теоретической механики.

1.2. Практика - основа абстрагирования. Окружающий нас мир диалектичен по своей сути: предметы и явления природы и общества находятся в состоянии непрерывного изменения, постоянного взаимодействия друг с другом. Поэтому уже выделение индивидуальных предметов в некотором смысле их общности всегда представляет процесс абстракции и идеализации.

Все трудности, связанные с процессом абстрагирования, могут быть решены лишь с позиции диалектического материализма, на его основе и с учетом роли практики в человеческом познании, а не только лишь путем сопоставления отдельных "готовых" абстракций и их систем с фактами непосредственного опыта, как это делали и в настоящее время делают некоторые представители различных философских течений, например, неопозитивисты. Подход последних приводит к тому, что открытие неизвестных ранее закономерностей окружающего нас мира идет в разрез с установившимися представлениями и воспринимается как "кризис природы".

Науки непрерывно развиваются, поэтому в ходе их развития постоянно обнаруживаются противоречия, которые разрешаются в процессе познания. Противоречия в науках возникают не только вследствие несоответствия теории фактам, но и вследствие того, что исходные допущения (положения, абстракции, исходные понятия) оказываются неправомерными, требующими уточнения и углубления.

В отличие от научной идеализации, отличающей ее от бесплодной фантазии, является то, что порожденные в ней идеализированные модели (объекты) в определенных условиях находят свое истолкование в проявлениях и терминах реальных (неидеализированных) объектов. Именно практика, включая практику систематических наблюдений и экспериментов, подтверждает правильность тех отвлечений, которые порождает идеализированная модель и служит критерием плодотворности познания.

Исторически человек начинал не с мышления, а с практики, с производства. В ходе практического взаимодействия со средой выработались первые элементарные понятия и зарождался язык. Теперь человек начинает определять свое отношение к объекту, опираясь на выработанные понятия, и последние выступают как

исходный пункт для познания объекта. Это, разумеется, не умаляет роли практики в материалистическом понимании мира на всех этапах развития сознания, но это одновременно означает переход к качественно новому этапу в отражении реальной действительности.

Особую роль в практике играет эксперимент. Анализ условий возникновения эксперимента показывает, что он с самого начала является принципиально отличным от чистого более или менее точного наблюдения.

Эксперимент можно определить как управляемый процесс, которому предшествует осознанная цель, процесс, в котором используются технические устройства для выделения одного или нескольких естественных процессов из природной совокупности, что способствует познанию естественных закономерностей и использованию их для целей познания. Под "управляемым процессом, которому предшествует осознанная цель", нельзя понимать произвольное вторжение в природу. Это вообще невозможно, ибо вторгаться в естественный процесс, направлять его в определенное русло можно только с использованием природных закономерностей.

Первые шаги в научном познании природы были сделаны посредством систематического наблюдения. Результатом таких пассивных наблюдений явились, например, законы движения небесных тел; с помощью наблюдений и отбора были созданы материалы, которые не встречаются в природе в чистом виде (бронза, сталь, ткань, керамика и др.).

Наблюдения требовали специальных инструментов и устройств, которые по мере развития усложнялись и совершенствовались. В результате качественного скачка исследователи получили в свое распоряжение такие приборы и установки, которые могли создавать определенные условия, не существующие в природе в чистом виде, а имеющиеся в совокупности с другими.

Эксперимент позволил исследовать причинность явлений. "Изолирующий" эксперимент, появившийся в эпоху Возрождения, занимался исследованием связей в области изолированных условий, отражающих закономерности действия одного основного закона. Значительно позднее, когда область отдельных закономерностей была исследована в достаточной мере, начались исследования связи между качественно различными видами закономерностей.

Органы чувств человека не в состоянии ощутить причины различных проявлений окружающей природы. И.П.Павлов предупреждал:

"Исследуя, экспериментируя, изучая, не оставайтесь на поверхности фактов. Не будьте архивариусами фактов. Ищите причины, ими управляющие." Даже самый искусный эксперимент не может выявить причины явления без абстрагирующей деятельности мышления.

Например, в 1650 году братьями Бернулли была построена расчетная схема и сформулирована задача о цепной линии, а в 1691 году одновременно Лейбницем, И. Бернулли и Гюйгенсом был предложен метод расчета и решена эта задача. Миллионы людей видели веревку, повисшую под тяжестью собственного веса, но нужно было углубиться в сущность вещей, чтобы увидеть в будничном явлении замечательную задачу математики и механики [21].

На первый взгляд кажется, что такие открытия возникают у исследователей самопроизвольно и ничем не подготовлены, а их зарождение только случайность. В действительности же они подготовлены всем ходом исторического процесса, вызваны требованиями практики и опираются на предшествующие знания [10, 24].

В каждом познавательном акте можно выделить знание нового и предшествующего. Первое - это то, что получено в качестве результата данного акта. Второе - необходимая предпосылка нового акта. Человек никогда не начинает познание с самого начала - на пустом месте. Он всегда в своем познании опирается на опыт предшествующих поколений.

Можно выделить два типа предшествующих знаний. Во-первых, это знание об изучаемом предмете или объекте, которое определяет постановку новых задач, функционирует как программа исследований. Во-вторых, знание об условиях протекания познавательной деятельности, которое определяет затем средства и пути решения задач.

Условно познавательную задачу можно записать в форме:

$$Z_0 \rightarrow \Pi \rightarrow V_1 \rightarrow Z_1 \rightarrow \Pi \rightarrow V_2 \rightarrow Z_2 \rightarrow \Pi \rightarrow V_3 \rightarrow Z_3 \rightarrow \dots$$

где Π - определенный способ практической деятельности (в первом случае практическая деятельность, не связанная с получением знания. Во втором и последующем - это может быть целенаправленный акт экспериментального воздействия, непосредственно связанный с задачами исследований);

$Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, \dots$ - отличающиеся знания об объекте;

V_i - вопросы, полученные в результате знания Z_i ,
($i = 1, 2, 3, \dots$).

1.3. Принципы построения абстрактной модели. Как уже указывалось выше, при построении абстрактных моделей используются отношения зависимости и независимости отдельных сторон, связей, свойств, звеньев. Независимость явлений может быть обусловлена пространственно-временными рамками их существования или компенсацией отдельных явлений в результате их взаимодействия. Отношение независимости связано с переходом количества в качество. Например, малые перемещения за счет упругих деформаций не влияют на реактивные усилия в опорах [31]. Если же упругие деформации велики и соизмеримы с размерами балки, то наблюдается качественно новая картина, для представления которой необходима другая модель. Или еще пример. Как известно, тело представляет собой систему дискретных частиц (молекул), находящихся в хаотическом движении. Если величина пробега молекул мала по сравнению с размерами всего тела, то тело можно рассматривать как сплошную среду. Если же размеры тела малы и соизмеримы с пробегом молекул, то необходимо рассматривать дискретную структуру тела.

В механике существует закон независимости действия сил: "Если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то ускорение этой точки равно геометрической сумме тех ускорений, которые получает эта точка при действии каждой из сил в отдельности." [5]. Не принимая во внимание взаимное влияние различных сил на ускорение точки, мы тем самым пренебрегаем безразличными и затеняющими факторами, от которых изучаемое явление не зависит.

Вот еще один пример хода рассуждений при построении абстрактной модели [30]. "Исследование вопроса о прочности реального объекта начинается с выбора расчетной схемы. Приступая к расчету конструкций, необходимо установить, что в данном случае существенно и что несущественно. Необходимо, как говорят, проанализировать схематизацию объекта и отбросить все те факторы, которые не могут повлиять на работу системы в целом. Если, например, требуется произвести расчет на прочность каната подъемника, то в первую очередь надо учесть вес поднимаемого груза, ускорение, с которым он движется, а при большой высоте, возможно, и вес самого каната. В то же время заведомо надо отбросить влияние таких несущественных факторов, как аэродинамическое сопротивление, возникающее при подъеме клетки, силы барометрического давления на разных высотах, изменение температур с высотой и

другие им подобные факторы, которых может быть неограниченное количество."

В процессе исторического развития познания всегда наблюдается переход к абстракциям, в которых предполагается независимость явлений только в определенных пределах.

Из приведенных примеров видно, что "абстракция - это операция замещения: "объект - модель", обоснованная познанием объективных отношений независимых явлений" [27]. Или иначе: некоторая задача K , сформулированная первоначально относительно объекта A_1 , решается относительно другого объекта A_2 , а результат затем переносится на объект A_1 .

Таким образом, абстрагирование включает два типа операций: выяснение возможности и целесообразности замещения, перестройки предмета и сам акт замещения, с точки зрения конкретной ситуации, с которой сталкивается исследователь. Ситуация характеризуется задачей (целевая характеристика метода) и спецификой изучаемого предмета (онтологическая характеристика).

Зависимость абстрактной модели от задач исследований на ярком примере была показана В.И. Лениным в речи [1]: "Стакан есть, бесспорно, и стеклянный сосуд, и инструмент для питья. Но стакан имеет не только эти два свойства или качества, или стороны, а бесконечное количество других свойств, качеств, сторон, взаимоотношений и "опосредствований" со всем остальным миром. Стакан есть тяжелый предмет, который может быть инструментом для бросания. Стакан может служить как пресс-папье, как помещение для пойманной бабочки, стакан может быть ценностью как предмет с художественной резьбой или рисунком, совершенно независимо от того, годен он для питья, сделан ли он из стекла, является ли форма его цилиндрической или не совсем, и так далее, и тому подобное. Далее. Если мне нужен стакан сейчас как инструмент для питья, то мне совершенно не важно знать, вполне ли цилиндрической его форма и действительно ли он сделан из стекла, но зато важно, в дне не было трещины, чтобы нельзя было поранить себе губы, употребляя этот стакан, и тому подобное. Если мне нужен стакан не для питья, а для такого употребления, для которого годен всякий стеклянный цилиндр, тогда для меня годится и стакан с трещиной в дне или даже совсем без дна и так далее."

1.4. В м о д е л ь. Изучение любого явления природы невозможно без абстрагирования и выработки идеализированных моделей.

При этом реальный объект заменяется моделью, которая изучается, и выявленные закономерности переносятся в натуру.

Для построения абстрактных моделей должна быть четко сформулирована ситуация, то есть поставлены необходимые для решения задачи условия, связанные со спецификой предмета.

Критерием правильности построенной абстрактной модели является практика, включая практику систематического наблюдения и изолирующего эксперимента. Процесс абстрагирования дает возможность выявить внутренние причины и закономерности явлений природы.

Одним из важнейших звеньев обоснованного абстрагирования является использование предшествующих знаний, полученных в результате познавательной деятельности человека.

Абстрактная модель формируется последовательно. Первоначальная модель при получении новых данных уточняется - получается новая, которая, в свою очередь, тоже изменяется и так далее.

2. ЗАДАЧИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

2.1. Задачи строительной механики и. Так как абстрактная модель зависит от задач, решением которых занимается та или другая наука, то с самого начала необходимо сформулировать эти задачи строительной механики как науки.

"Строительная механика - наука о расчете сооружений на прочность, жесткость и устойчивость". Такое определение дается в терминологии по строительной механике [26] и во всех современных учебниках [15, 24, 27]. Это определение очень широкое и позволяет к строительной механике отнести такие науки, конечной целью которых является прочное, жесткое и устойчивое сооружение, например, различные курсы инженерных конструкций. Оно не дает, кроме того, возможность говорить о том, какая дисциплина должна заниматься построением расчетных схем. Поэтому, видимо, задача строительной механики формулируется как "состоящая в разработке рациональных методов определения усилий в сооружениях и их перемещений; методов расчета сооружений на прочность, жесткость и устойчивость, а также в установлении наиболее выгодных форм сооружений, удовлетворяющих условиям экономичности." [24]. Это, как видно, перекликается с задачами

других наук, что дало, например, возможность заключить [27]: "ряд задач расчета сооружений относится к нескольким дисциплинам. Некоторые задачи в одной из них решаются с использованием положений, принимаемых в другой. В связи с этим дать четкое определение задач и методов каждой из них не представляется возможным, а границы между ними не являются строго определенными и постоянными".

Выполненные в строительной механике расчеты являются основой проектирования несущих конструкций зданий и сооружений, судов и самолетов, деталей машин и механизмов. Следовательно, строительная механика решает наиболее общие задачи, не связанные с конкретным назначением, материалом и условиями эксплуатации конструкций.

Такое положение делает необходимым определить строительную механику как науку, занимающуюся общими принципами построения расчета сооружений. Такое определение требует от строительной механики выделения общих свойств, сторон, звеньев сооружений, выполненных из различных материалов, эксплуатируемых в различных условиях и имеющих различное назначение. Таким образом, первой проблемой, которую должна решать строительная механика, является построение расчетных схем, абстрагирующих свойства сооружения, второй - построение методов расчета.

Известно, что расчетчиков, проектирующих определенный вид конструкции, интересуют усилия и перемещения заданной системы исходных материалов для назначения их форм и размеров. Поэтому задачей строительной механики является определение усилий и перемещения от заданных воздействий. Эту задачу называют основной. В курсах строительной механики показано, что перемещения могут быть определены через усилия, поэтому основную задачу часто формулируют как определение усилий от заданной нагрузки. Второй задачей, построенной на основной, может быть получение наименее выгодного нагружения сооружения. Третья задача - определение оптимальных форм и размеров сооружения. Однако эти задачи исходят из детерминированной постановки. В последнее время развиваются стохастические подходы к решению задач строительной механики, то есть ставятся задачи расчета сооружений, обладающего прочностью и надежностью работы в течение

определенного срока в зависимости от условий эксплуатации. В процессе развития строительной механики появляются и другие задачи. Четкая постановка задач строительной механики дает возможность, например, говорить о том, что геометрическая схема стержня должна быть линейной. Действительно, основная задача говорит о том, что должны быть определены в первую очередь усилия и перемещения в стержне. Так как для определения изгибающих и крутящих моментов необходимо знание геометрического места центра тяжести сечений стержня, а для поперечных и продольных сил - соответственно нормаль и касательная к его оси, то достаточно знание только оси стержня. Перемещение оси стержня при допущении о плоских сечениях определяют также перемещения всех его точек.

2.2. Расчетная модель сооружения. Существует мнение, что установившееся в строительной механике название идеализированной модели - "расчетная схема" не совсем удачное и следовало бы заменить его на "расчетную модель" [6]. Однако слова "схема" и "модель" в некотором смысле являются синонимами (так, В. Даль [11] определяет схему как "образ, отвлеченный от предмета"; а в Большой советской энциклопедии: "модель - образ, описание, чертёж объекта или системы, используемый в качестве их заместителя или представителя"). Поэтому употребление и того и другого названия равноправно. Однако термин "расчетная схема" в работах по строительной механике встречается повсеместно, что говорит об исторически сложившемся названии. В понимании же этого термина существуют разногласия и даже противоречия [6, 17]. Употребляется, например, термин "реальная физическая модель" [7], хотя модель - образ, абстракция не может существовать в окружающем нас мире и, значит, не является реальной. Употребляется также термин "полная схема" [15], которая подвергается дальнейшему упрощению, выступая как расчетная схема.

На наш взгляд, более полно отражает понятие расчетной схемы определение, данное А.М. Подольским [17] на основе теории моделей [29]: "Под расчетной моделью строительной конструкции будем понимать несущее множество параметров M с заданными на нем множеством отношений. Несущее множество M разделено на классы (геометрические, механические, деформации и

напряжений). Каждой строительной конструкции соответствует множество различных расчетных моделей, отличающихся мощностью множества M . И так же: "Методом расчета называется некоторая система символов, обозначающих классы параметров, и множество операций над ними".

Разбирая схему формирования расчетной схемы сооружения, можно отметить, что она является как бы вторичным этапом абстрагирования, так как выявляет общие стороны уже построенных инженерных моделей (рис. 1). При этом выделяются геометрическая и физическая стороны. Физическая сторона расчетной схемы включает механические свойства материала, воздействия и гипотезы деформирования. В геометрическую сторону модели входит: форма сооружения, его отдельные элементы, опоры, геометрические характеристики нагрузки, а также геометрические гипотезы деформирования. Геометрическая сторона более гибкая, наглядная и поэтому на нее чаще обращают внимание исследователи. Известно, что с точки зрения геометрии элементы сооружения можно разделить на тела или массивы, оболочки (плиты) и стержни. Хотя разойти границы между этими видами элементов провести трудно, учет геометрических размеров дает возможность пользоваться упрощенными гипотезами: плоских сечений для стержней, недеформированной нормали для плит и оболочек. Математическое описание полностью определяется физическими и геометрическими гипотезами, введенными в расчетную схему.

Общие принципы построения расчетных схем полностью совпадают с принципами построения абстрактной модели в процессе познания. Они достаточно полно сформулированы Н.М. Герсевановым [9]:

- "Расчетные схемы должны исходить из опыта разрушения и деформации, подтверждающихся опытом строительной практики". Это положение одно из основных принципов оценки правильности расчетной схемы на практике, являющейся критерием истинности.

- "В расчет вводятся гипотезы о свойствах конструкций и действующих на них сил, позволяющие создать эффективный метод расчета. При этом гипотеза должна ставить конструкцию в менее благоприятные условия, чем те, в которых она действует. Необходимо также стремиться к тому, чтобы расчет не привел к экономически неоправданным решениям". Здесь подтверждается тот принцип, что абстрактная модель строится путем выделения основных сторон явления с определенной целью, связанной со специфической исследования и его задач.

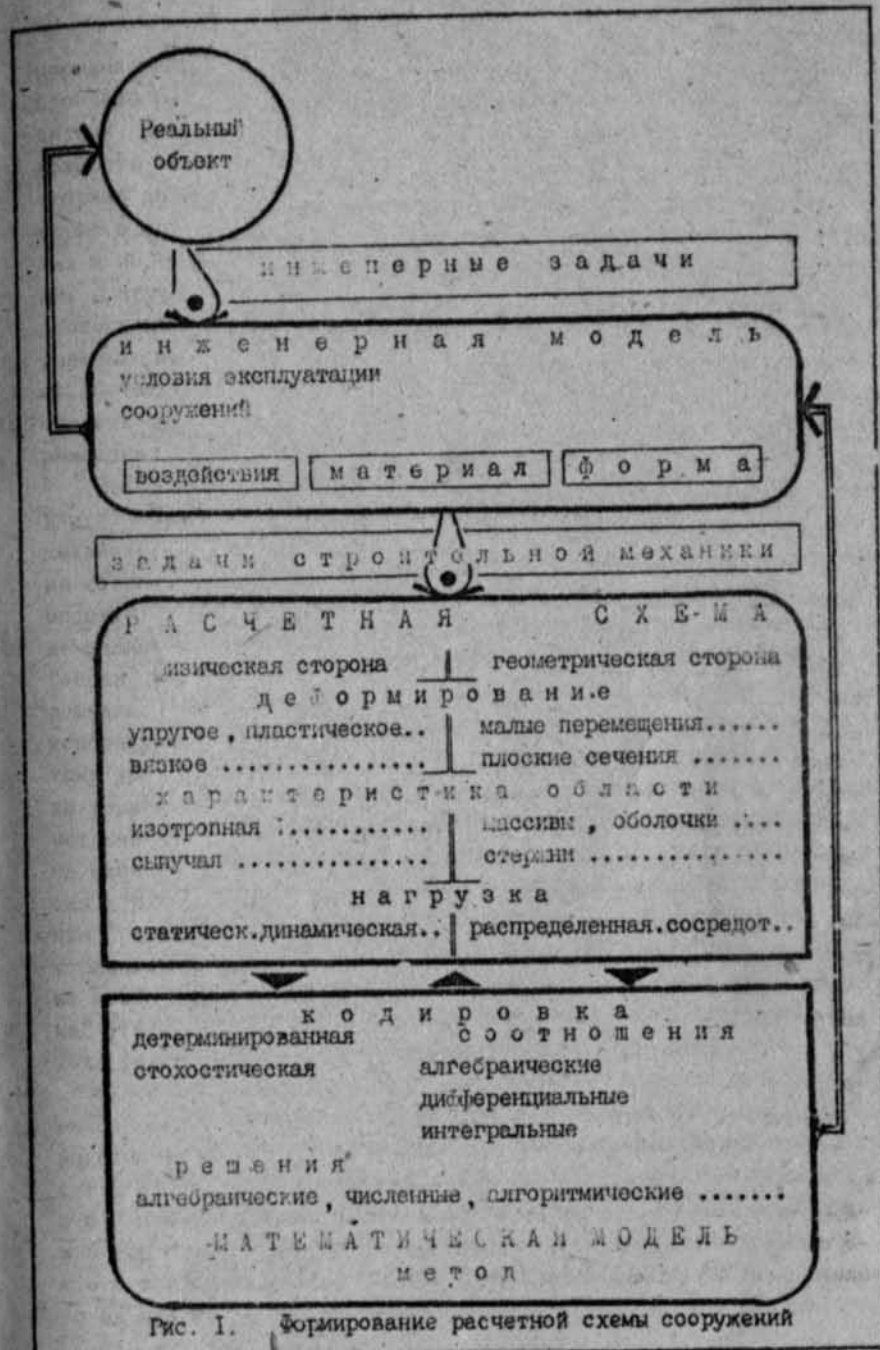


Рис. 1. Формирование расчетной схемы сооружений

- "Анализ работы сооружений показал, что в зависимости от характера, величины воздействия и условия работы сооружения целесообразно иметь не одну, а систему аппроксимирующих моделей сооружения, каждая из которых имеет свои пределы применения". Следовательно, требуется использовать гипотетические абстракции с определенными порогами влияния.

- Герсеванов Н.М. формулирует также принцип формирования расчетных моделей путем последовательных приближений с учетом предшествующих знаний и опыта.

2.3. Исторический очерк развития расчетных схем. Расчетные схемы реальных сооружений являются характеристикой уровня развития строительной механики. Они постоянно развиваются и совершенствуются. Если изучить историю строительной механики, то можно получить представление о том, что она тесно связана с построением, развитием и совершенствованием расчетных схем и методов их анализа.

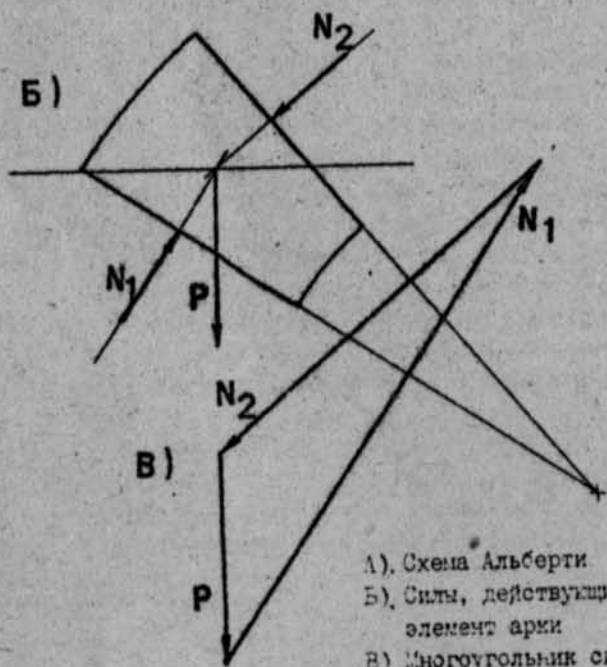
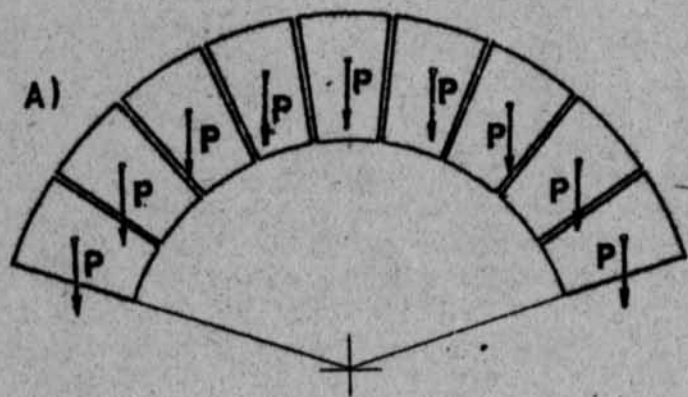
В имеющейся общ. лит. по истории строительной механики и по механике вообще [3, 13, 14, 19, 20] большее внимание уделяется построению методов расчета, а не расчетным схемам. Трудности использования указанных и других обзорных источников связаны также с другими обстоятельствами. Во-первых, в трудах по истории механики [16, 18] строительной механике уделяется весьма скромное место - обзоры носят схематический характер. Во-вторых, имеющиеся сведения по строительной механике приведены в хронологическом порядке, часто без анализа тех социально-экономических и производственных отношений, а также состояния техники [13, 14]. Ф.Энгельс в связи с этим писал: "Когда у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку вперед больше, чем десятки университетов..." [2]. - третьих, анализируя решения того или иного исследователя [3], авторы обзоров стараются подчеркнуть его упущения с точки зрения современного состояния науки. "Исторические заслуги судятся не по тому, что не дали исторические деятели сравнительно с современными требованиями, а по тому что они дали нового сравнительно со своими предшественниками", - указывал В.И. Ленин. В-четвертых, работы ученых излагаются в терминах и понятиях современной механики и поэтому трудно выхватить появившиеся того или другого основополагающего понятия, в частности связанного с расчетной схемой сооружений. В связи с этим приводимые ниже сведения нуждаются в проверке по первоисточникам.

Первоначальные этапы развития расчетных схем можно проследить на примере арок (сводов), наиболее полно освещенных в имеющейся литературе. Известно, что арочные своды применялись в строительстве издавна. Строители древности заметили способность арок противостоять без разрушения большим нагрузкам. Существовало мнение, что арка является наиболее прочным сооружением. Леон Батиста Альберти (1402 г.) утверждал, что "полукруглая арка - самая крепкая из всех, это само собой явствует, а также обнаруживается путем рассуждения и доказательства. Ведь я не вижу, как она может распасться, разве только один клин вытолкнет другой, но от этой беды они настолько далеки, что скорее, наоборот, один укрепит поддержку другого". Итак, умозрительно свод Альберти представлялся как система клиньев (камен), соединенных весьма слабым раствором (рис. 2).

В дошедшей до нас работе члена французской академии наук Д'Алагира - "Трактате по механике" (1696 г.) на основе расчетной модели Альберти (рис. 2, а) (система клиньев со смазкой между ними, позволяющей свободно без трения сдвигаться клинья относительно друг друга) построена методика определения усилий в кладке. Наличие смазки позволило Д'Алагире считать в швах силы перпендикулярными поверхности скольжения (рис. 2, б) и графическим построением найти усилия в швах (рис. 2, в) при известной нагрузке P , приложенной к клину.

В дальнейшем Д'Алагир заметил, что при одинаковой нагрузке, приложенной к каждому клину, из условий равновесия соседних клиньев в одном шве получаются разные по величине усилия (рис. 3, б). Поэтому Д'Алагир предположил, что нагрузка на арку не равномерна - чем ниже клин, тем больше нагрузка. На рисунке 3, в показано второе решение Д'Алагира. По силовому многоугольнику, который для удобства повернут на девяносто градусов, можно узнать силы, действующие на каждый клин (P_1, P_2, P_3, \dots), и усилия в швах ($N_1, N_2, N_3, N_4, \dots$). Но при таком предположении усилия в горизонтальном шве стремятся к бесконечности.

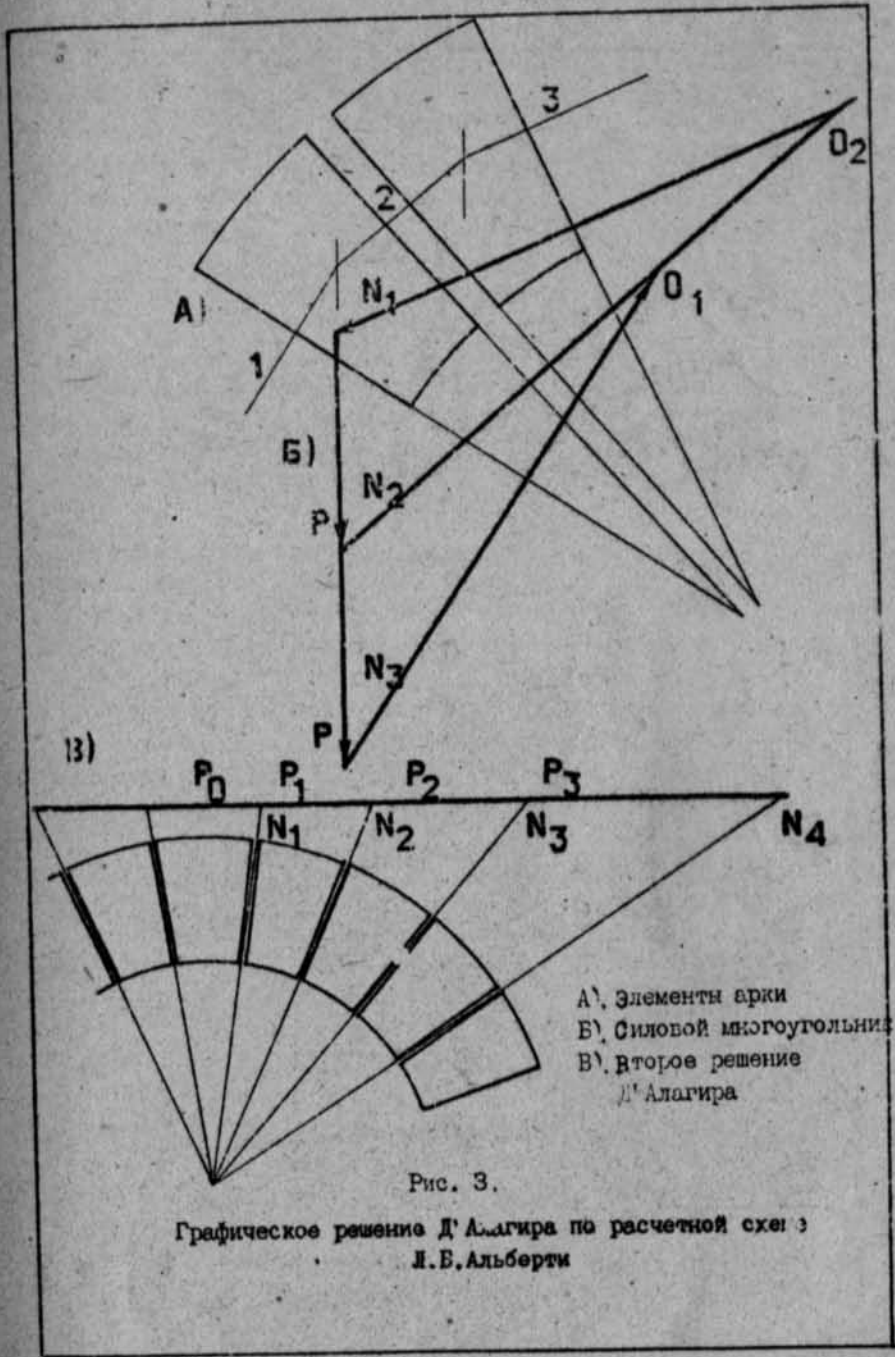
Весьма вероятно, что наблюдения образования трещин в своде побудили того же Д'Алагира через 17 лет предположить, что разрушение арки происходит в четвертях ее пролета. Таким образом, арка уже представляется как система трех элементов (трехавенная расчетная схема), один из которых (средний) может без трения скользить по двум соседним. Методом расчета также служила графика (рис. 4).



А). Схема Альберти
 Б). Силы, действующие на элемент арки
 В). Многоугольник сил

Рис. 2.

Расчетная схема арки, построенная Д.Б.Альберти



А). Элементы арки
 Б). Силовой многоугольник
 Б'). Второе решение
 Д'Алагира

Рис. 3.

Графическое решение Д'Алагира по расчетной схеме Д.Б.Альберти



А). Расчетная схема
В). Многоугольник сил

Рис. 4.

Расчетная схема Д'Алагира и ее расчет

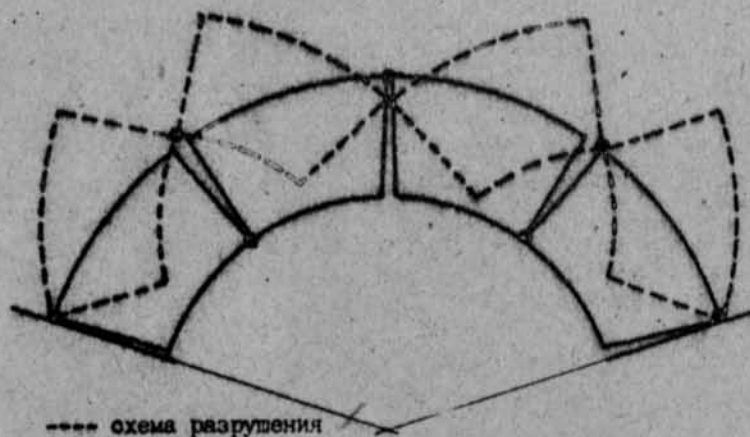


Рис. 5. Четырехзвенная расчетная схема

Эта расчетная схема совершенствовалась в дальнейшем рядом исследователей. Купле, например, (1730 г.) исходила из того, что причиной трещин является поворот клиньев в ключе свода и в четвертях пролетов (рис. 5). Опыты Даниэли (1732 г.) подтвердили эту четырехзвенную расчетную схему, составленную из четырех абсолютно жестких элементов, соединенных шарнирами. Кулон (1773 г.) рассматривал расчетную схему Купле, но искал положение промежуточных шарниров из условия наименьшего усилия, необходимого для разрушения арки.

Таким образом, первые расчетные схемы исходят из определенной концепции о характере разрушения и рассматривают сооружение в момент начинающегося разрушения. С геометрической точки зрения расчетная схема представлялась как система соединенных между собой геометрически неизменяемых дисков. В физическом отношении рассматриваются абсолютно жесткие тела. Исследуя конечное (предельное) состояние, ученые пытались определить величины нагрузок, при которых может произойти разрушение.

Однако первоначальная расчетная схема не смогла стать основой предсказывающего проектирования. Развитие капиталистических отношений, промышленная революция XVIII-XIX веков и последовавшее за ней развитие фабрично-заводской промышленности не могло проходить успешно без предсказания прочности сооружений. Здесь вступает также новый фактор - экономичность. Отставание расчетов от вопросов техники возрастало. Наблюдалось разрушение целого ряда сооружений. Насущная техническая потребность общества продвинула науку о прочности далеко вперед. Оснаменила это продвижение член французской академии наук Луи-Мари-Анри Навье (1785-1836 гг.). Навье впервые указал на важность знания того предела, до которого сооружение ведет себя как упругое тело, не получая остаточных деформаций.

Явление упругости, то есть свойство тел восстанавливать свои первоначальные размеры и формы после снятия нагрузок, было известно. Но исследование упругости началось только во второй половине XVIII века. В этом направлении работали Гук (1678 г.) и Мариотт (1686 г.). На основании многочисленных опытов Гук установил, что "совершенно очевидно, что правило природы в том, что сила или способность восстанавливать естественное состояние всегда пропорционально той мере, на которую оно выведено из этого состояния".

Навье сумел свойство упругости и закон Гука, теряющие справедливость задолго до разрушения, связать с проблемой прочности. Он ввел понятия напряжений, деформаций. Таким образом, он ввел одно из основных положений физической стороны расчетной схемы - положение о прямой пропорциональности напряжений и деформаций. В расчетную схему в это время внесены и геометрические допущения о малости перемещений, о плоских сечениях в стержнях, о прямой недеформируемой нормали в плитах и другие. Сооружение рассматривалось до разрушения - в период его рабочего состояния. Навье удалось внести немалый вклад в математическую модель - он впервые получил уравнение упругой оси прямого и кривого бруса, исследовал изгиб пластинки, вывел общие уравнения статики и динамики упругого тела. Идеи Навье были настолько плодотворны, что за пятьдесят лет наука о прочности не только покрыла свой долг перед практикой, но и опередила ее потребности. И до настоящего времени идеи Навье не потеряли своей актуальности.

В это же время в методы расчета упругого тела, волею во великим Эйлером (1707-1783 гг.) широкой волной влиялись математические методы, разработанные ранее и создававшиеся вместе с развитием механики упругого тела. На заре математического анализа Эйлер первым оценил величайшее могущество нового метода для решения задач механики: "механика - рай для математики", - говорил он. Эйлер показал, что теория дифференциальных и интегральных уравнений, вариационного исчисления есть вполне адекватный аппарат для познания сущности большого класса механических задач.

Реформа Навье дала впервые возможность обеспечить заведомую прочность сооружений и этот важнейший результат на долгое время имел преобладающее значение в глазах инженеров. Сооружения обладали большим запасом прочности.

В силу причин технического и социально-экономического характера в начале XX века такая расточительность стала немислимой, что привело к необходимости пересмотра науки о прочности. К этому времени накопился большой экспериментальный материал по свойствам материалов и конструкций. Было установлено отклонение этих свойств от идеально упругих, обнаружены пластические и вязкие и другие свойства материалов. При пересмотре расчетных моделей необходимо было внести в них эти новые данные.

На этом этапе, подчиняясь общим законам диалектики, сооружения снова рассматриваются в момент и с черпанием не сущей способности, но исследователи могут проследить, каким образом это состояние было достигнуто. Здесь основной вклад внесли советские ученые (Ильшин А.А., Стрелецкий Н.С., Гвоздев А.А. и др.). В настоящее время различают два пути решения задачи. Первый из них связан с переносом теоретических решений теории упругости на пластическую область. Целью этого направления является создание возможности предсказать поведение конструкции на всех этапах от начального до предельного. Второй путь построен на рассмотрении тела в период непосредственного разрушения.

Таким образом, расчетная схема сооружения меняется в процессе развития науки о прочности. Она зависит от существующего представления о физической работе материала конструкций и является характеристикой уровня развития науки. Вычислительные возможности современных средств позволили довести до практических результатов сложные в физическом и геометрическом отношении расчетные схемы.

2.4. Выводы. Строительная механика - наука, занимающаяся общими принципами расчета сооружений, вынуждена для построения расчетных методов решать основную проблему расчета - проблему построения абстрактной модели сооружения - расчетной схемы.

Построение расчетной схемы связано с теми задачами, которые решаются на этой модели. Расчетная схема должна отражать и проверяться опытом строительства. В зависимости от характера воздействия и условий работы сооружения нужно использовать целую систему аппроксимирующих моделей.

Расчетная схема является вторичным этапом абстрагирования. Выделяется геометрическая и физическая сторона сооружения и ее отдельных элементов. Математические модели - методы расчета зависят от физического и геометрического характера модели.

История развития строительной механики в значительной степени связана с историей становления, развития и совершенствования расчетных схем сооружений.

В начале формирования строительной механики как науки модель сооружения рассматривалась в момент разрушения как системы твердых тел. Затем на втором этапе исследовалось рабочее - упругое состояние сооружения и, наконец, третий этап

ознаменовался переходом к рассмотрению сооружения в момент разрушения, но на более высокой ступени развития (возвращение по спирали) с учетом того, что сооружение было приведено в это предельное состояние.

3. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

3.1. Место стержневых систем в общем классе сооружений, рассматриваемых строительной механикой. Из большого разнообразия конструктивных видов, конфигураций, форм и размеров сооружений, для которых решаются проблемы прочности, в зависимости от соотношения геометрических размеров элементов различают следующие их типы.

- Сооружения, составленные из элементов, у которых один размер (длина) значительно превышает два других. Такие системы получили название стержневых.

- Сооружения, составленные из элементов, в которых размеры по двум направлениям значительно превосходят третий (толщину). Такие элементы называют плитами, оболочками, складками или пространственными тонкостенными элементами.

- Сооружения, у которых все размеры одного порядка. Их называют массивами, сплошной средой или телами.

Строительная механика часто рассматривает различные типы сооружений отдельно. Выделяют, например

- строительную механику стержневых систем;
- строительную механику плит, оболочек;
- строительную механику сплошной среды, или механику сплошной среды.

В строительной практике наибольшее распространение получили сооружения из стержней. Они используются не только в стержневых системах непосредственно, но и для подкрепления плит, оболочек, а также как несущий каркас массивных сооружений. Стержневые системы отличаются экономичностью, простотой изготовления, перевозки, сборки, монтажа.

В расчетном отношении к стержневым могут быть приведены и другие типы сооружений. Известно, например, что плиты и оболочки могут рассматриваться как непрерывная перекрестная система

стержней [22], а массивы - как пространственные шарнирно-стержневые системы.

Построение расчетных схем стержневых конструкций сложно, особенно с геометрической стороны, из-за чрезвычайно большого разнообразия форм, размеров самих стержней, их соединений и опор. В то же время принципы построения расчетных схем стержневых сооружений могут быть перенесены с несущественными изменениями и на другие типы сооружений.

Ниже рассматриваются плоские стержневые системы. У таких систем не только оси всех стержней, но и нагрузки находятся в одной плоскости.

3.2. Элементы расчетных схем плоских стержневых систем. Расчетные схемы, являясь идеализацией инженерных сооружений (несущих конструкций), должны выделять те стороны их элементов, которые необходимы для решения основной задачи строительной механики - определение усилий и перемещений всех точек системы от заданных внешних воздействий. Расчетная схема стержневой конструкции включает идеализованные стержни, соединения, опоры и воздействия (нагрузки). Ниже при рассмотрении элементов расчетных схем обращается внимание на те стороны, которые отражаются в расчетной схеме с целью решения основной задачи строительной механики.

3.2.1. Стержни. В каждом сечении стержня усилия приводятся к трем составляющим (для плоских систем):

- изгибающему моменту, который численно равен алгебраической сумме статических моментов всех сил, приложенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно центра тяжести последнего;
- поперечной силе - алгебраической сумме проекций всех сил, приложенных по одну сторону от сечения, на нормаль к оси стержня в этом сечении;
- продольной силе - алгебраической сумме проекций всех сил, приложенных по одну сторону от сечения, на касательную к оси стержня в этом сечении.

Из приведенных определений видно, что для нахождения усилий в стержне необходимо и достаточно знать только его ось - геометрическое место центров тяжести сечений.

Оказывается, что и перемещения стержня с учетом гипотезы

плоских сечений (сечения плоские и перпендикулярные оси стержня до деформации остаются плоскими и перпендикулярными к деформированной оси) также полностью определяются перемещениями оси стержня. Действительно, если известны линейные перемещения U и V и угол поворота оси ψ , то перемещения любой точки сечения, находящейся на расстоянии Z от оси, определяются по зависимости, полученной из геометрических соображений (рис. 6, б):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma \\ u_z &= u + z \cdot \psi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Следовательно, для решения основной задачи строительной механики геометрически на расчетных схемах стержень должен необрабатываться осью. Стержни в зависимости от очертания оси могут быть прямолинейными, криволинейными и ломаными (рис. 6, в, г, д).

3.2.2. Соединения и опоры. Для определения усилий и перемещений сложных стержневых систем необходимо знать: кинематические свойства соединений и опор — какими перемещениями последние допускают и какими параметрами определяется их положение; статические свойства — какие реакции (усилия) возникают в соединениях и опорах. Кинематические и статические свойства тесно связаны между собой, ибо наличие связи по определенному направлению говорит о наличии реакции по этому направлению при удалении соответствующей связи, а отсутствие связи — отсутствие усилия.

Соединения стержней получили название **узлов**.

Жесткий узел (рис. 7, а, б) кинематически характеризуется тем, что препятствует повороту концов соединяемых в нем стержней относительно друг друга. Его положение определяется на плоскости линейными смещениями по двум направлениям (U, V) и углом поворота (ψ). К концам стержней в таком узле должны быть приложены вертикальные (V_i), горизонтальные (H_i) силы и момент (M_i) (рис. 7, б). Силы должны удовлетворять условиям равновесия. Для узла, изображенного на рисунке 7, б, например:

$$\left. \begin{aligned} V_1 + V_2 + V_3 &= 0 \\ H_1 + H_2 + H_3 &= 0 \\ M_1 + M_2 + M_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

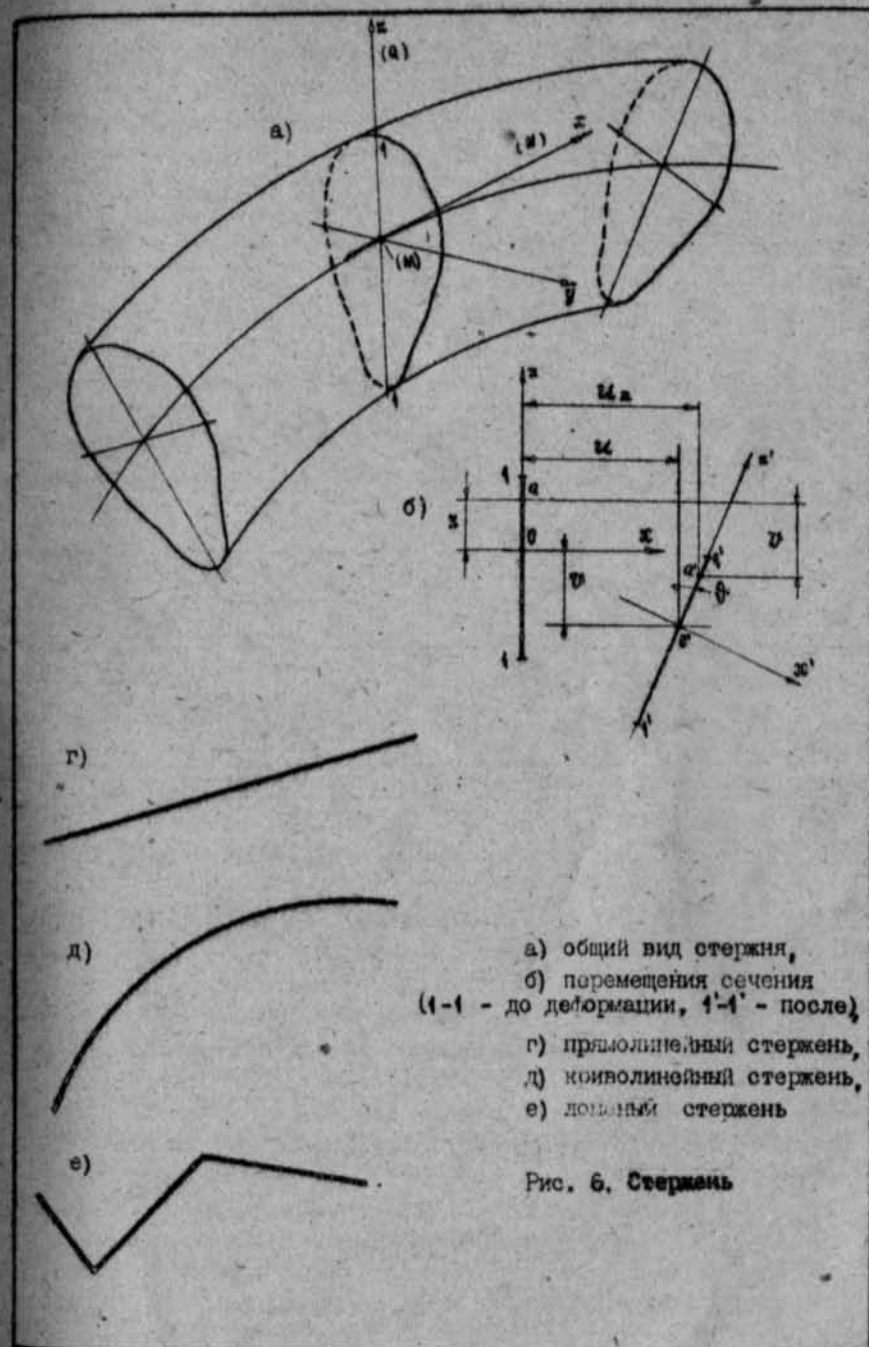


Рис. 6. Стержень

На расчетных схемах жесткий узел изображается заштрихованным треугольником, если стержни в узле не являются продолжением друг друга.

Шарнирный узел (рис. 7, в, г) имеет кинематические свойства: концы стержней могут свободно (без трения) поворачиваться друг относительно друга, положение узла определяется двумя линейными смещениями. В связи с этим в шарнирном узле отсутствует реактивный момент, а возникают вертикальные (V_i) и горизонтальные (H_i) усилия взаимодействия концов стержней. Реактивные усилия должны удовлетворять условиям равновесия (рис. 7, г)

$$\left. \begin{aligned} V_1 + V_2 + V_3 &= 0 \\ H_1 + H_2 + H_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

На расчетных схемах шарнирный узел изображается окружностью.

В расчетных схемах используются и более сложные соединения, представляющие собой комбинированные узлы (рис. 7, д).

В кинематическом отношении узлы реальных конструкций занимают промежуточное положение между жестким (абсолютно жестким) и шарнирным (идеально шарнирным) узлами. Такие узлы называют *податливыми*. Реакции в податливых узлах зависят от взаимного смещения концов стержней.

Практика расчетов показала, что применение в расчетных схемах идеальных узлов соединений вполне оправдано. При этом в значительной степени упрощается получение практических результатов — основы для проектирования сооружений.

Устройства, прикрепляющие конструкцию к земле или другим частям сооружения, называют *опорами*. В плоских расчетных схемах используются следующие типы опор.

Шарнирно-подвижная опора (каток) (рис. 8, а) с кинематической точки зрения характеризуется тем, что не препятствует ни повороту системы в ее плоскости, ни ее поступательному перемещению в одном направлении (параллельном плоскости качения), а устраняет лишь возможность поступательного перемещения по нормали к этой плоскости. Опорная реакция всегда направлена по перпендикуляру к плоскости качения и проходит через центр шарнира. Это является статическим свойством опоры. Учитывая кинематические и статические свойства опоры, расчетная схема ее может быть представлена стержнем АВ

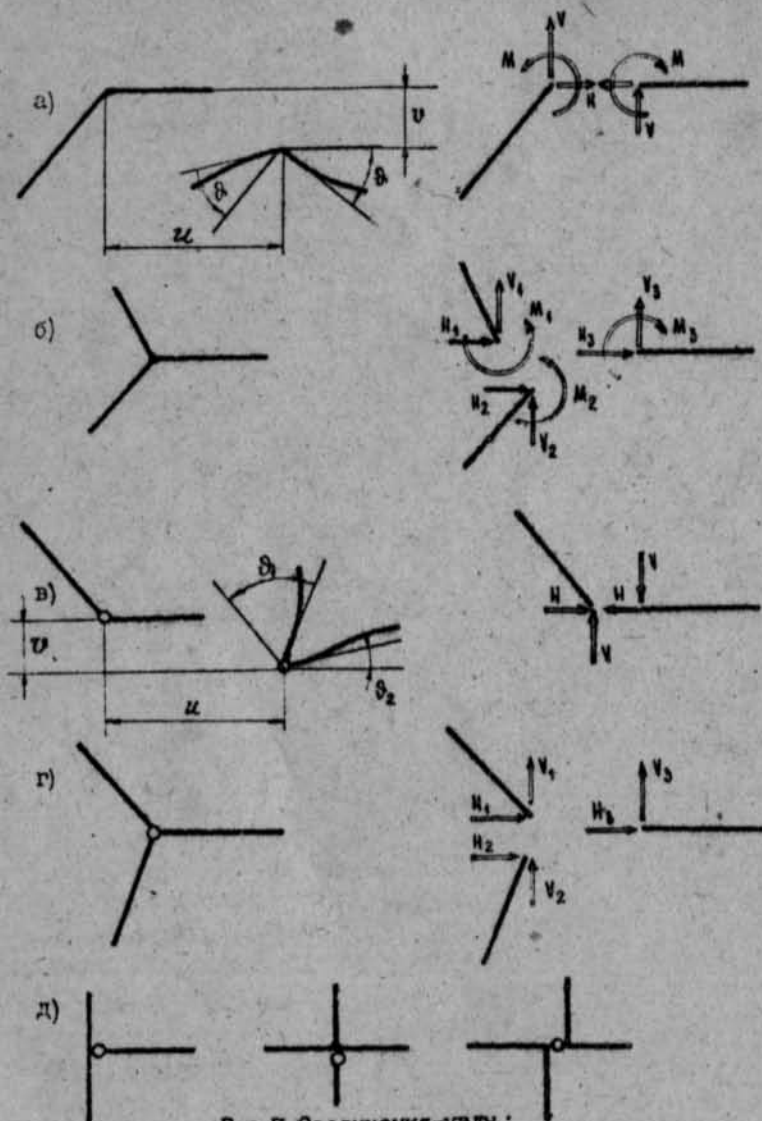
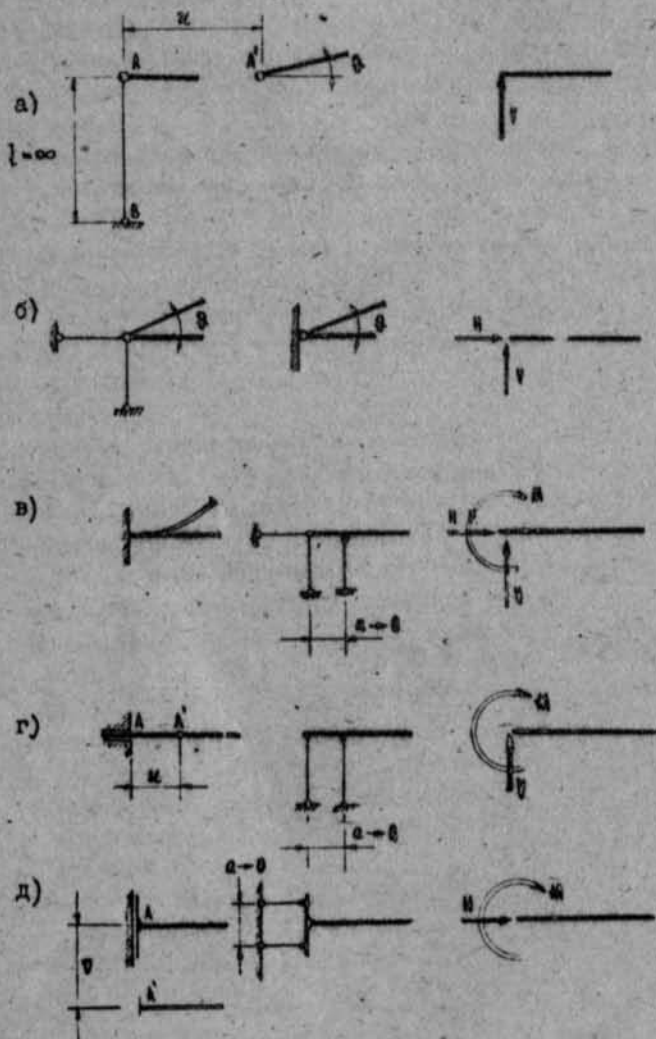


Рис. 7. Соединения-узлы:

- а) двухстержневой жесткий узел, б) трехстержневой жесткий узел, в) двухстержневой шарнирный узел, г) трехстержневой шарнирный узел, д) комбинированные узлы (слева показаны возможные перемещения узлов)



- а) шарнирно-подвижная опора,
 б) шарнирно-неподвижная опора,
 в) заземляющая опора,
 г, д) подвижные заземляющие опоры

Рис. 8. Опоры

(рис. 8, а). Такое устройство (стержень бесконечной длины с двумя идеальными шарнирами по концам) называется опорным стержнем. Он допускает поворот системы вокруг шарнира А и перемещение по окружности с центром в точке В и радиусом l . Так как $l = \infty$, то такое перемещение происходит по прямой, перпендикулярной оси стержня. Направление стержня в то же время показывает направление опорной реакции — вдоль стержня. При известном направлении опорной реакции остается определить только ее величину, зависящую от действующей нагрузки. Длина вектора \vec{R} определяет одно неизвестное (опора изображается одним стержнем).

Шарнирно-неподвижная опора (рис. 8, б) кинематически характеризуется тем, что сооружение может только поворачиваться вокруг шарнира. Опорная реакция такой опоры имеет только один заранее известный параметр — точку приложения, величина и направление ее обычно заранее известны. Расчетная схема такой опоры показана на рис. 8, б. Два опорных стержня в расчетной схеме неподвижной опоры оставляет возможность вращения вокруг точки А. Их количество равно числу неизвестных параметров опорной реакции. Возможно изображение шарнирно-неподвижной опоры шарниром, прикрепленным к "земле" (рис. 8, б), что не нарушает ни кинематических, ни статических свойств.

Заземляющая опора (рис. 8, в) не дает возможности сооружению перемещаться в точке закрепления. Опорную реакцию в такой опоре можно привести к силе \vec{R} и паре M . На расчетных схемах заземление изображается так, как показано на рис. 8, в. Это изображение эквивалентно трем опорным стержням, не пересекающимся в одной точке (рис. 8, в). Количество опорных стержней соответствует числу неизвестных параметров опорной реакции (величины \vec{R} , M).

На рис. 8, г и 8, д изображены еще два вида опор, которые называют подвижными, соответственно в горизонтальном и вертикальном направлении, заземлением. Эти опоры отличаются от заземляющих тем, что направление реакции известно. На рис. 8, г и 8, д показаны эквивалентные изображения опор с помощью опорных стержней.

Таким образом, изображение любой опоры на расчетной схеме соответствует и статическим, и кинематическим

условиями реального закрепления, если количество опорных стержней в ней равно числу неизвестных параметров опорной реакции.

3.2.3. Нагрузки. Из всего многообразия внешних воздействий на сооружение строительная механика занимается изучением таких воздействий, которые стремятся вызвать смещение и усилия в сооружении. Этот класс воздействий носит название **нагрузки**.

Нагрузки разделяются на активные и реактивные. Активными нагрузками могут быть: ветер, собственный вес сооружения, вес оборудования и людей, вес снега, сейсмические движения, перемещения поездов, удар, изменение температур, перемещение опор и другие. Величины этих нагрузок нормируются Строительными нормами и правилами (глава "Нагрузки и воздействия" СНиП II-6-74). Реактивные нагрузки возникают в различного рода закреплениях (соединениях, опорах) и могут быть получены расчетом.

В расчетных схемах не учитывается природа образования нагрузки, а оставляется основное, определяемое задачей строительной механики, свойство нагрузки как силовой величины или смещения с учетом развития ее во времени.

Нагрузки, которые медленно растут так, что смещения сооружения изменяются практически одновременно с изменением нагрузки, а затем остаются в своем конечном положении достаточно долго, называются **статическими** приложенными. **Динамические** нагрузки прикладываются (или снимаются) достаточно быстро. Они не только меняют свою величину, но и направление. Под их действием смещения сооружения происходят не одновременно с загрузением, например, после того, как нагрузка снята (свободные колебания). Изображение статических и динамических нагрузок показано на рис. 9.

Всякое воздействие распределяется на некоторой поверхности или по объему сооружения. Такая нагрузка называется **распределенной**. В частном случае, когда интенсивность нагрузки постоянна, нагрузка носит название **равномерно-распределенной**.

Если размеры сооружения велики, а площадь или объем, на который действует нагрузка, мал, то такую нагрузку приводят к равнодействующей или к паре сил и изображают сосредоточенной силой (рис. 9) или сосредоточенным моментом.

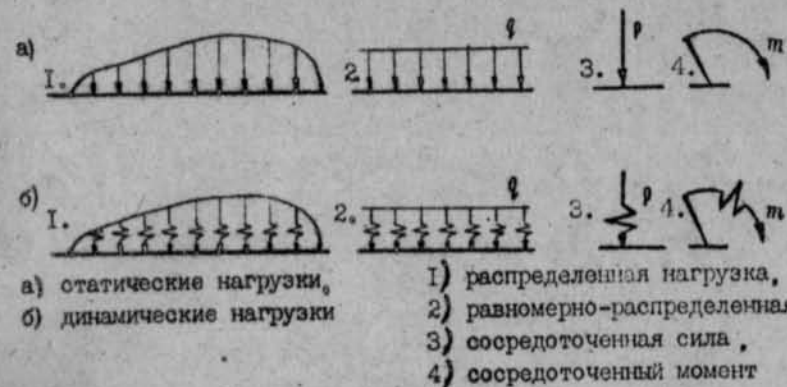


Рис. 9.

Изображения нагрузок на расчетных схемах

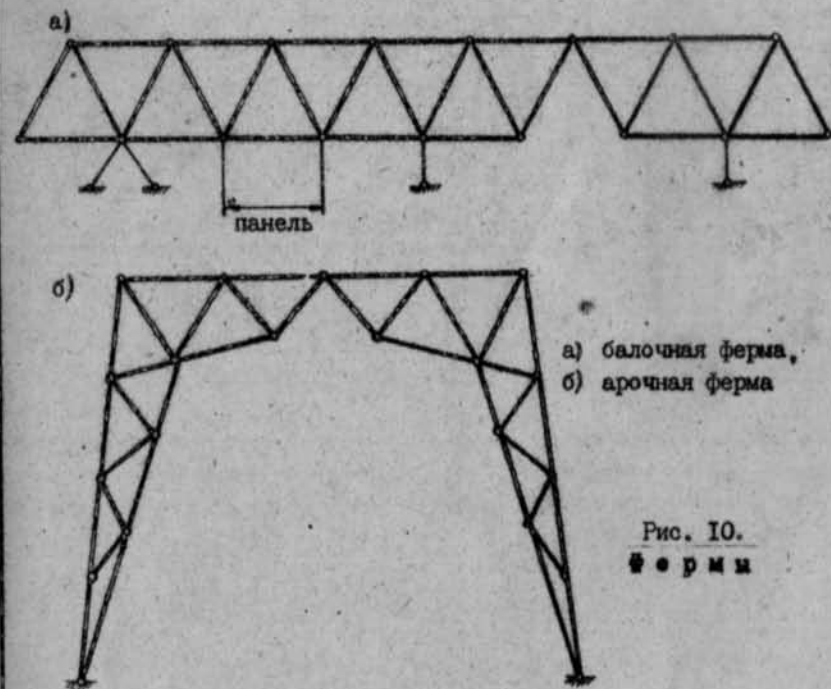


Рис. 10.
Фермы

В расчетах различают постоянные нагрузки, которые действуют на сооружение во время всего его срока эксплуатации (собственный вес, вес оборудования и тому подобных), и временные — те, которые действуют на сооружение в отдельные промежутки времени (давление ветра, торможение кранов и др.).

Поезда, автомобили и другие движущиеся объекты создают подвижную нагрузку в отличие от неподвижной — не меняющей своего поджима на сооружении.

Зная изображения и свойства элементов расчетных схем, можно образонивать сами расчетные схемы сооружений.

3.3. Классификация расчетных схем плоских стержневых систем. Классификация (от латинских слов *classis* — разряд, группа и *facio* — делаю) — распределение данного множества предметов или явлений по определенному, общему для каждого класса признаку, так, что классы множества составляют систему.

Классификация может быть вспомогательной и естественной или научной. Естественная классификация осуществляется по существенным признакам, характеризующим внутреннюю общность предметов или явлений каждого класса и классов внутри множества. Естественная (научная) классификация является результатом и важным средством научного исследования, так как предполагает и закрепляет результаты изучения закономерностей классифицируемых объектов.

Таким образом, при классификации необходимо соблюдать три важнейших принципа:

- классификация должна быть проведена по одному общему признаку;
- признак должен устанавливать внутреннюю общность предметов и явлений, то есть быть существенным с точки зрения решаемых задач;
- классификация должна быть результатом и средством научного познания и исследования.

Этим принципам полностью удовлетворяет классификация, проведенная ранее (п. 3.1) по типам сооружений. Действительно, имеется один общий признак — соотношение размеров элементов сооружения. Этот признак является общим и существенным, так как дает в руки расчетчика (специалиста, решавшего основную задачу строительной механики) возможность вводить или использовать

допущения физического или геометрического характера в направлении малого параметра — размера (например, гипотезы плоских сечений — для стержней, прямой недеформированной нормали — для плит и оболочек), что приводит к упрощению постановки задачи и к разработке инженерных методов расчета соответствующих конструкций.

Анализ различных классификаций расчетных схем стержневых систем, приводимых в учебниках и учебных пособиях, показывает, что эти принципы до конца не выдерживаются. Обычно расчет сооружений в учебниках по строительной механике ([15, 19, 24, 27] и др.) рассматривается по классам: балки, арки, фермы, рамы. Но классификация расчетных схем либо совсем не приводится, либо приводится по признакам, не определяющим деление на такие классы, которые затем изучаются. Например, проводится классификация по соединению стержней (жесткое, шарнирное, податливое), по геометрической структуре (геометрически изменяемые и неизменяемые), по направлению опорных реакций (распорные и нераспорные системы), по назначению. Но вторым признаком должны обладать все рассматриваемые строительной механикой системы, что касается четвертого признака, то он относится к инженерным моделям, а не к расчетным схемам, так как помогает инженеру в решении конструкторских задач, первый и третий признаки не являются существенными.

Терминология по строительной механике дает следующие определения расчетным схемам стержневых сооружений [26]:

- балка — стержень, работающий главным образом на изгиб;
- арка — плоская распорная система, имеющая форму кривого бруса, обращенного выпуклостью в направлении, противоположном направлению действия нагрузки;
- ферма — стержневая система, оставшаяся геометрически неизменяемой, если в ней все жесткие узлы заменены на шарнирные;
- рама — стержневая система, стержни которой во всех или некоторых узлах жестко соединены между собой.

Приведенные определения, служащие для выделения определенного класса стержневых систем, не удовлетворяют требованиям научной классификации. В них нет общего признака, по которому расчетные схемы различаются и, следовательно, нет деления по существенному признаку (нет внутренней общности). Действительно, балка отличается работой на изгиб; арка характеризуется только

направлением опорных реакций и формой, что может быть отнесено не только к арке; ферма — неизменяемой геометрической структурой, что может быть отнесено и к другим расчетным схемам; рама характеризуется соединением стержней в узлах. Это приводит к тому, что классификация, предлагаемая в учебниках, практически не усваивается, так как она не связана с дальнейшим изучением предмета.

Основной признак классификации должен рассматриваться с точки зрения решения основной задачи строительной механики. Таким признаком может быть работа на действующие нагрузки. Исходя из него:

- ферма — система стержней, которые работают на осевое усилие (растяжение-сжатие);
- балка — стержневая система, работающая преимущественно на изгиб;
- рамы и арки — относятся к одному типу расчетных схем, в которых стержни работают на осевое усилие с изгибом (внецентренное растяжение-сжатие);

- комбинированные системы — стержневые системы, которые содержат признаки нескольких классов.

Предлагаемый признак — единый и существенный. Такая классификация позволяет в дальнейшем разбирать расчет наиболее общих по работе сооружений и показывать особенности расчета каждого класса, то есть служить основой научных исследований и является необходимым этапом в изучении строительной механики как науки. В пределах каждого класса расчетные схемы могут быть разделены и по другим признакам: по структуре, по форме стержней, по направлению опорных реакций и другим, определяющим особенности решения основной задачи строительной механики.

3.3.1. Фермы. Стержень только тогда испытывает осевые деформации и работает на растяжение-сжатие, то есть в нем возникает продольная сила N , когда он прямолинеен, по концам его шарниры (стержни соединяются в шарнирных узлах) и нагрузка непосредственно к нему не прикладывается (а только к узлам). Следовательно, прямолинейные или иногда покривленные стержни, соединенные между собой во всех узлах полными шарнирами и нагруженные в этих узлах, образуют конструкцию, называемую фермой, в которой все стержни при узловой нагрузке испытывают деформацию растяжения-сжатия (внутренним усилием является продольная сила N).

Фермы применяются в самых разнообразных зданиях, сооружениях, машинах и выполняют различные функции (фермы пролетных строений мостов, стропильные фермы, фермы кранов и др.). Такое широкое распространение фермы получили ввиду того, что в них полно используется несущая способность материала и, как следствие, они обладают высокой экономичностью. Фермы имеют разнообразную форму (рис. 10, 11, 12).

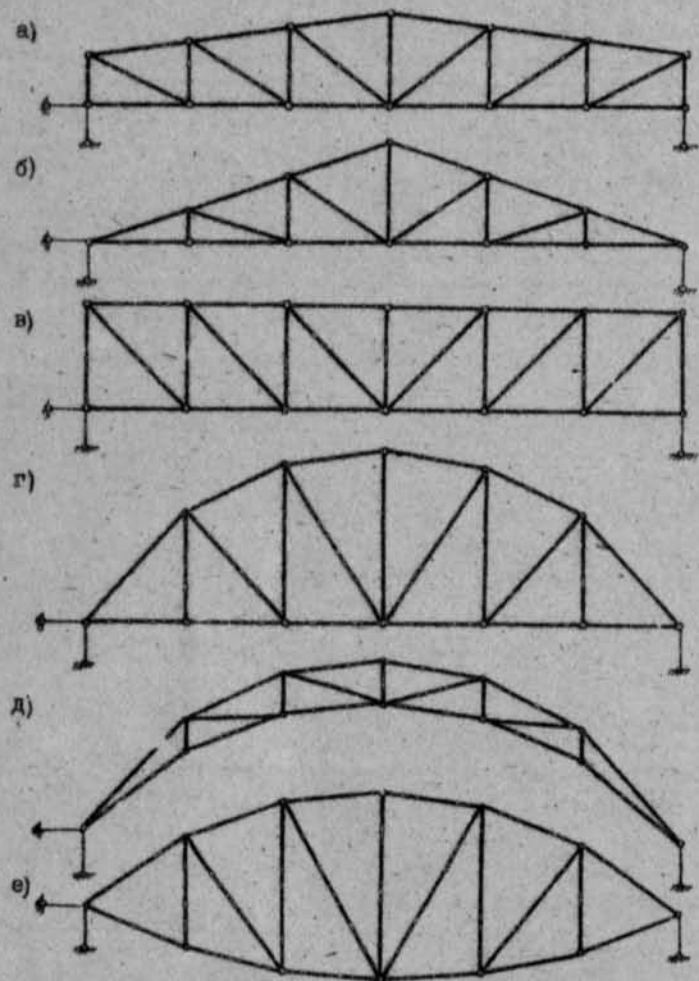
Стержни, ограничивающие ферму сверху и снизу, носят название соответственно верхнего и нижнего поясов. Остальные стержни, находящиеся между поясами, образуют решетку фермы (рис. 12). Вертикальные элементы решетки называются стойками, наклонные — раскосами. Расстояние между соседними узлами верхнего или нижнего пояса носит название панели.

Если от вертикальной нагрузки в опорах фермы возникают вертикальные опорные реакции и методика их определения совпадает с методикой определения реакций в балке, то такие фермы называются балочными. Если же вертикальная нагрузка вызывает не только вертикальные, но и горизонтальные реакции, а методика их определения совпадает с методикой определения реакций в рамах и арках, то их называют рамными или арочными. Последние фермы называются, кроме того, распорными. (Распор — горизонтальные реакции от вертикальной нагрузки).

3.3.2. Балки. Чтобы стержни сооружения работали на изгиб (в них возникал изгибающий момент M и поперечная сила Q), необходимо иметь прямолинейный стержень, к которому активная и реактивная нагрузки приложены перпендикулярно к оси. Следовательно, система прямолинейных стержней, присоединенных к земле опорами, реакции в которых перпендикулярны к этим стержням, образует конструкцию, называемую балкой, в которой стержни испытывают деформацию изгиба (внутренние усилия: изгибающий момент — M и поперечная сила — Q).

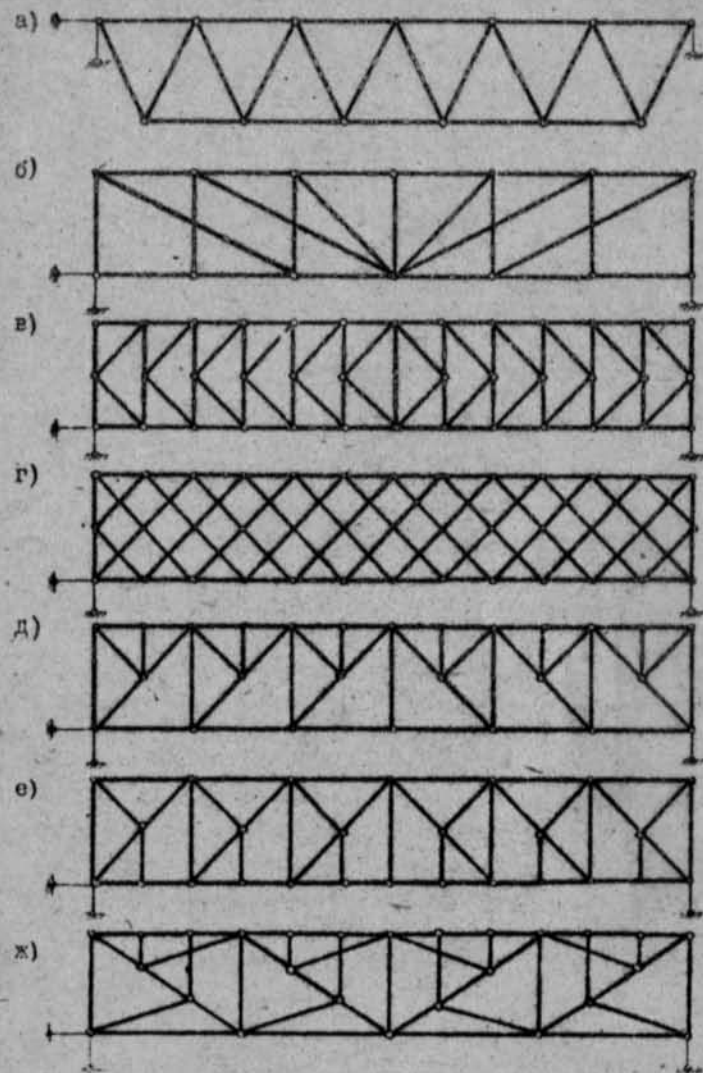
Расстояние между соседними опорами в балке называют пролетом, а расстояние от опоры до конца консоли — влетом консоли.

Балки, имеющие один пролет с консолью или без нее, и чисто консольные принято называть простыми (рис. 13, а, б). Многопролетные балки могут иметь в пролетах шарниры (рис. 13, в).



а) ферма с ломаным верхним поясом,
 б) треугольная ферма, в) ферма с параллельными поясами,
 г, д, е) фермы с криволинейными или полигональными поясами.

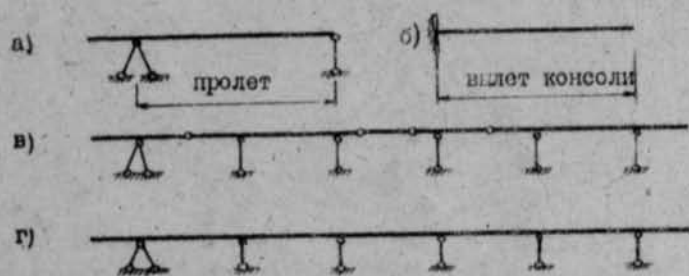
Рис. II.
 Типы поясов ферм



а) треугольная, б) двухраскосная, в) полураскосная,
 г) решетчатая, з, е, ж) шпренгельная

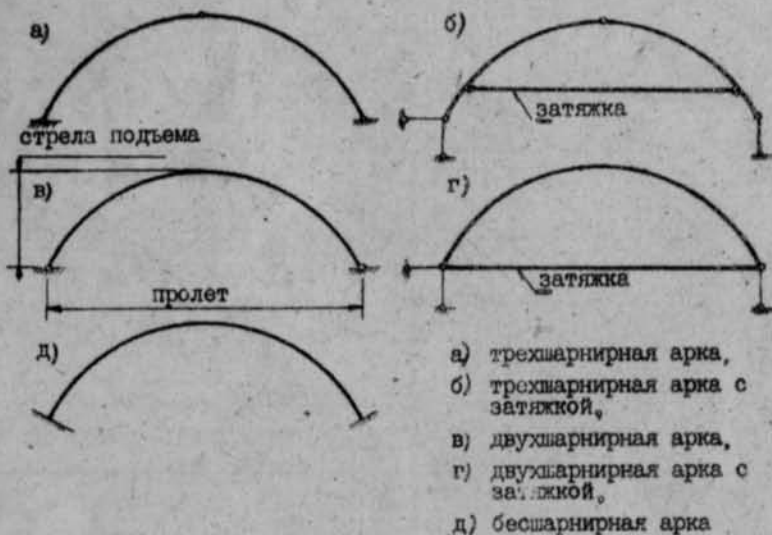
Рис. Iа.

Типы р. леек ферм



- а) простая свободноопертая балка,
 б) простая консольная балка,
 в) многопролетная шарнирно - консольная балка,
 г) многопролетная неразрезная балка

Рис. 13.
Балки



- а) трехшарнирная арка,
 б) трехшарнирная арка с
 затяжкой,
 в) двухшарнирная арка,
 г) двухшарнирная арка с
 затяжкой,
 д) бесшарнирная арка

Рис. 14. Арки

Тогда их называют шарнирно - консольными. Если шарниров в пролетах нет, то балка является неразрезной (рис. 13, г).

3.3.3. Рамы и арки. Стержни рам, работающие на внецентренное растяжение-сжатие (в них возникает: изгибающий момент - M , поперечная - Q и продольная - N силы), могут быть произвольной конфигурации (прямолинейными, криволинейными, ломаными). Произвольно направленной нагрузкой загружаются узлы и непосредственно стержни. Узловые соединения могут быть как жесткими, так и шарнирными, и податливыми (рис. 15).

Горизонтальные стержни рамы носят название ригелей, вертикальные - стоек. Наклонные стержни иногда называют подкосами.

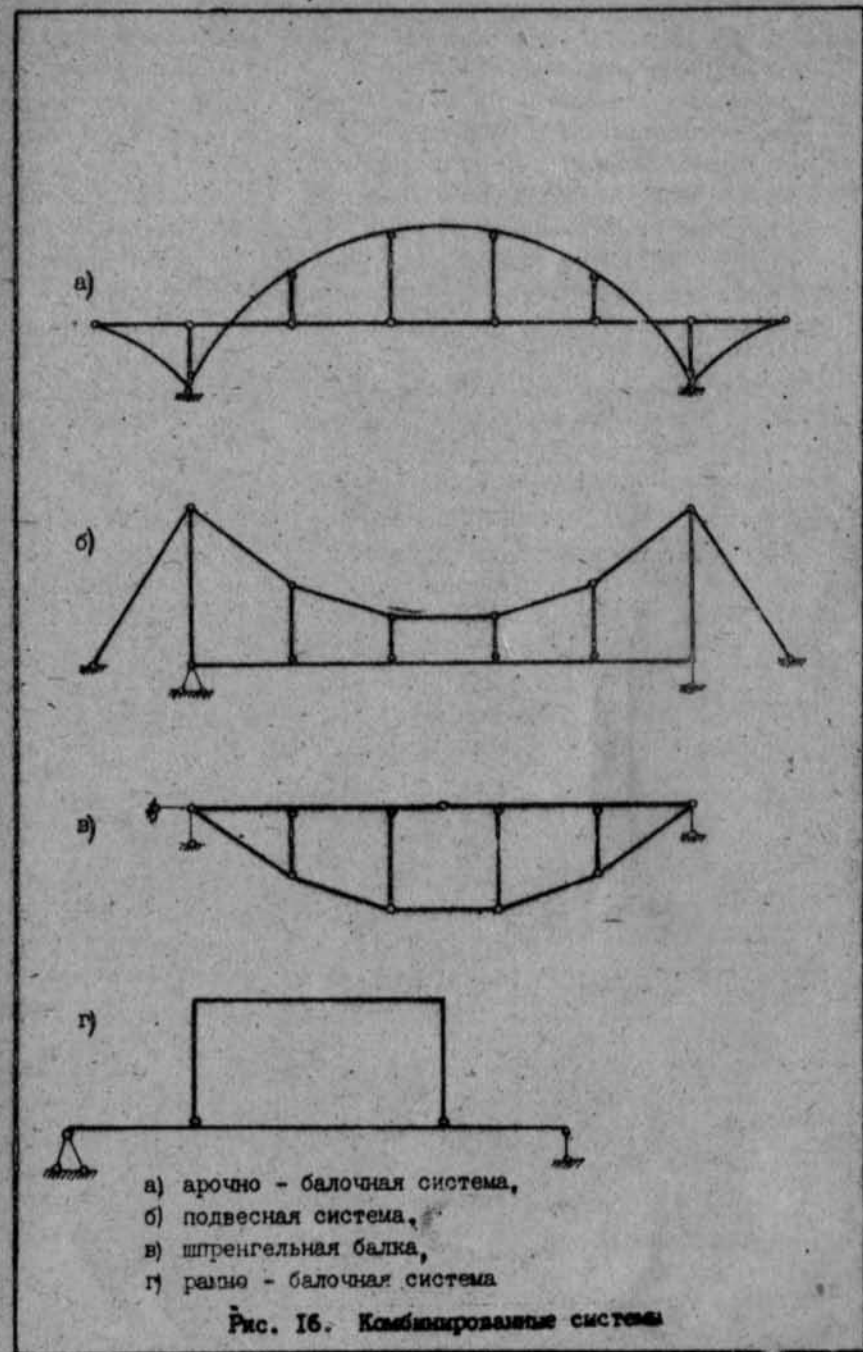
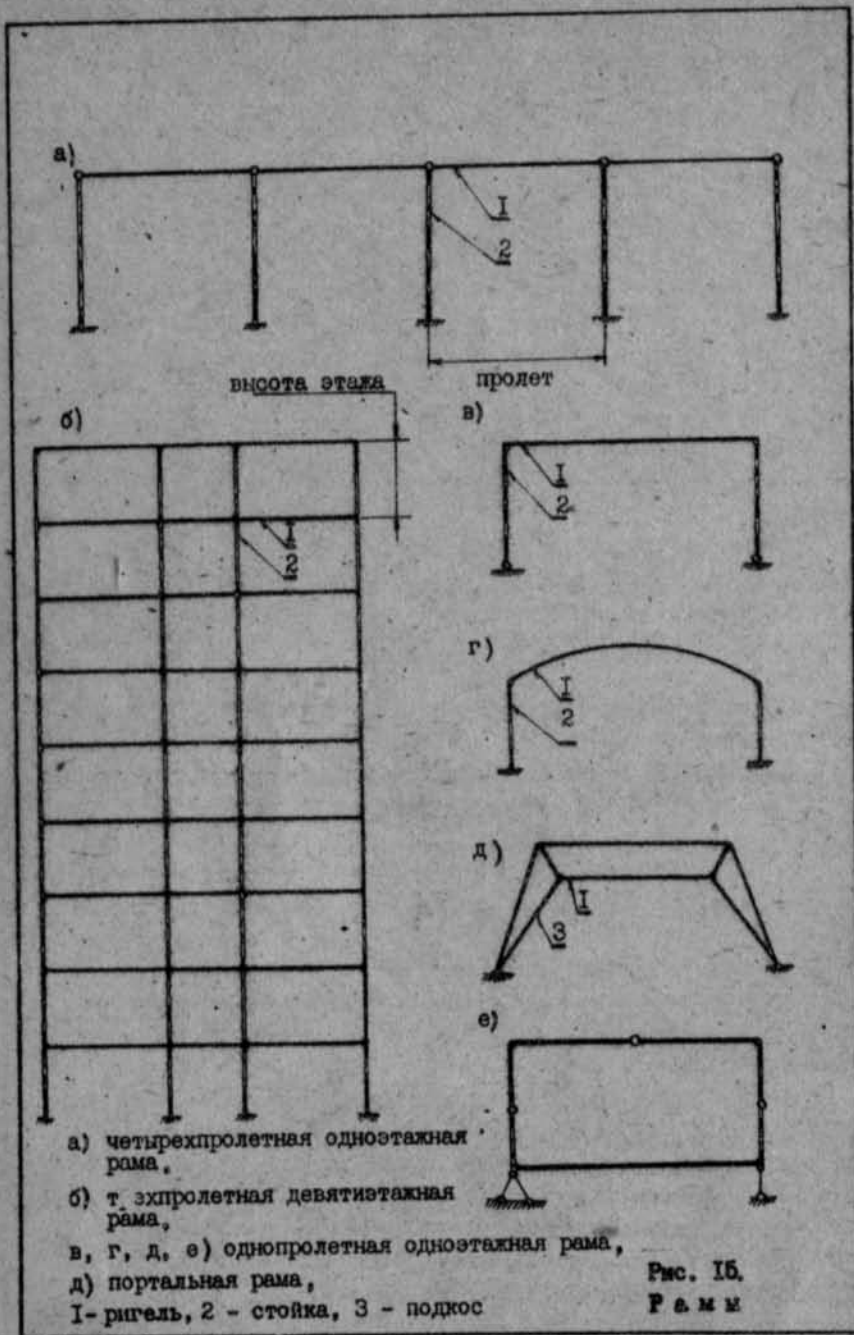
Расстояние между стойками соседних рам называют пролетом, а между соседними ригелями - высотой этажа.

Арки могут рассматриваться как частный случай рамы. Они обычно имеют форму кривого стержня, выпуклого навстречу нагрузке. На практике широкое применение находят трехшарнирные, двухшарнирные и бесшарнирные арки (рис. 14).

Верхнюю точку арки называют замком, а опоры - пятнами. Расстояние между пятнами - пролет арки, а высота замка относительно линии пят - стрела подъема. В зависимости от отношения стрелы подъема к пролету арки делают на пологие, если это отношение мало, и подъемистые, если велико.

3.3.4. Комбинированные системы. В комбинированных системах используются элементы, работающие на осевое усилие (элементы ферм), работающие на изгиб (балочные элементы), а также работающие на внецентренное растяжение-сжатие (элементы рам и арок). Из комбинированных систем наибольшее распространение получили так называемые подвесные системы (рис. 16).

Таким образом, по структуре стержневой системы, конфигурации стержней, характеру узловых соединений и работе на действующей нагрузке рамы является "общим" классом стержневых сооружений. Так показала практика обучения, расчет именно этих сооружений должен рассматриваться при изучении строительной механики [8], а остальные классы имеют свои особенности, которые можно рассматривать с общих позиций.



4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ СТЕРЖНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Для того, чтобы практически строить расчетные схемы, необходимо уметь уверенно находить их элементы в реальных сооружениях. Признаки стержней, узлов и опор, приведенные в главе 3 и традиционно встречающиеся во всех учебниках по строительной механике, не позволяют этого делать. Они не полностью характеризуют указанные элементы расчетных схем, что создает неопределенность при нахождении последних. Поэтому необходимо уточнить и дополнить эти признаки и разработать классификацию множества реальных конструкций и их деталей, подходящих под определение стержней, узлов и опор. Приводимая ниже классификация носит методический характер и разработана в рамках поставленной задачи - построения расчетных схем сооружений. Она дает возможность систематизировать сведения о строительных конструкциях, их деталях и соединениях, что облегчает освоение рассматриваемого раздела изучаемого курса строительной механики.

4.1. Классификация стержней. Одним из основных моментов, которые необходимо решить в процессе построения расчетной схемы сооружения, является вопрос о том, какой элемент его есть стержень. Для нахождения стержня по соотношению размеров необходимо принимать во внимание габаритные размеры. Под ними понимаются предельные минимальные размеры, в которые можно поместить элемент (рис. 17). Специально поставленные научные исследования [17] показали, что в случае, когда отношение наибольшего габаритного размера (длины) к среднему (высоте) больше пяти, то к элементу может быть полностью применена теория стержней. Если же это отношение меньше трех, то стержнем такой элемент не является. При отношении длины к высоте от трех до пяти справедливость применения к элементу теории стержней требует дополнительных исследований.

Приведенные выше уточнения и конкретизация признаков стержня позволяют считать стержнем не только отдельный элемент сооружения или конструкции, но и целую группу стержней. Например, ферма покрытия при расчете поперечника одноэтажного промышленного здания может рассчитываться как стержень. Определение стержней и узлов, включая и опорные, тесно связано между собой. В зависимости от того, какие элементы в рассматриваемой конструкции приняты за стержни, устанавливается местоположение узлов и опор.

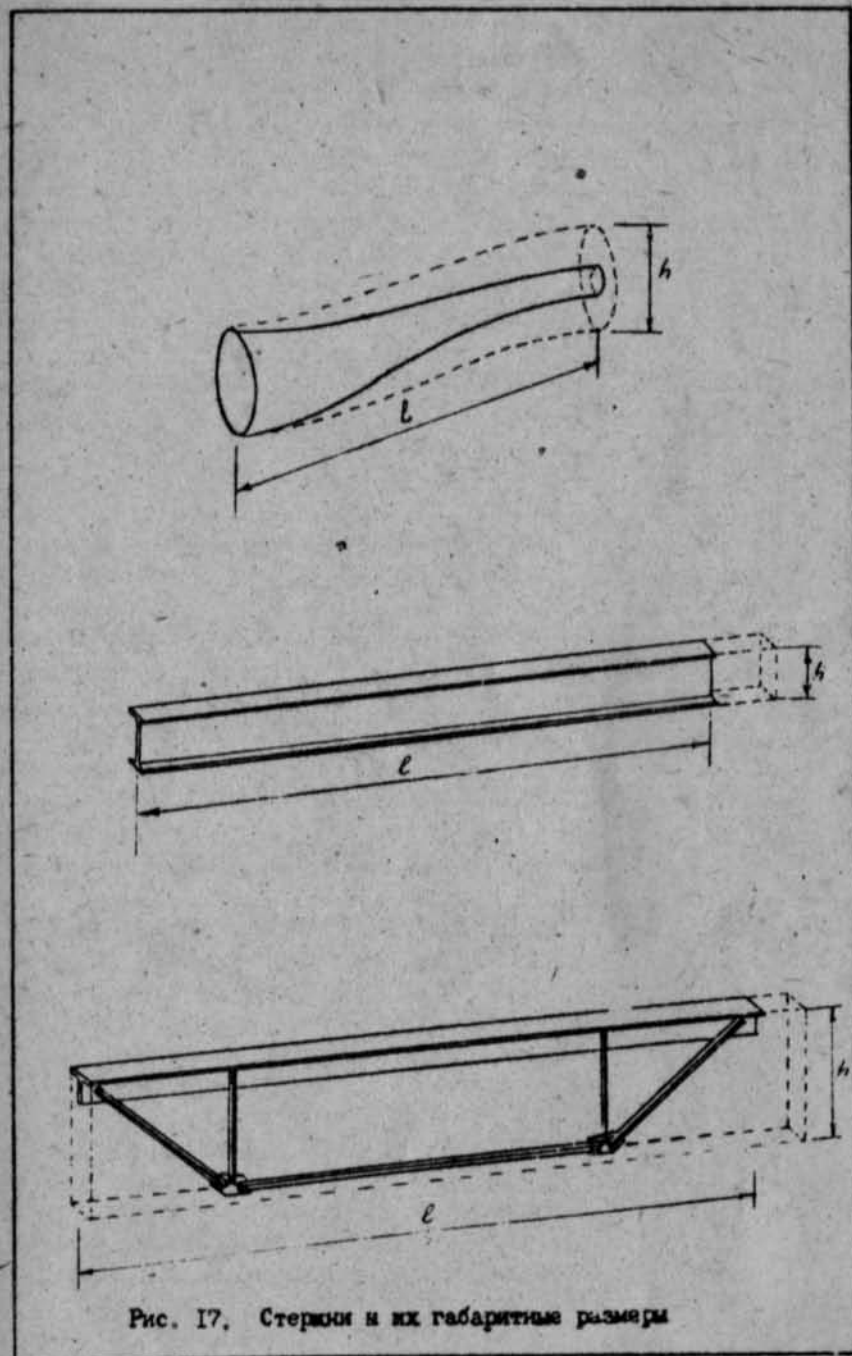


Рис. 17. Стержни и их габаритные размеры

Стержень как элемент расчетной схемы характеризуется двумя сторонами: геометрической и физической. Первая определяется геометрической формой и, в частности, очертаем осью. По этому признаку различают стержни прямолинейные, ломаные и криволинейные (рис. 18). Форма и размеры сечения вдоль оси стержня могут не изменяться, тогда это стержень постоянного сечения. В стержнях переменного сечения имеет место плавное или скачкообразное изменение формы и размеров поперечного сечения вдоль оси (рис. 19).

Физическая сторона выражается в конструктивном исполнении и представлена следующими признаками: способом изготовления и распределением материала вдоль оси. Стержни изготавливаются монолитными или составными. Монолитные выполнены как бы из одного куска материала. Примерами таких стержней будут железобетонные балки, прокатные элементы конструкций, деревянные брусья и т.п. (рис. 20). Составные изготавливаются соединением в единое целое нескольких элементов, например, клепаные балки, дощато-гвоздевые балки, клееные элементы рам и др. (рис. 21).

По распределению материала вдоль оси различают стержни сплошные и сквозные. В сплошных материал вдоль оси распределяется непрерывно (рис. 19-21). В сквозных материал распределен с разрывами, которые можно видеть, например, на боковой поверхности стержней в виде различного рода сквозных отверстий (рис. 18, б, 17, в).

Классификация стержней по указанным выше признакам приведена на рис. 22. В соответствии с ней можно дать полное наименование стержня. Например, на рис. 20, а изображен прямолинейный монолитный сплошной стержень переменного сечения, а на рис. 18, б ломаный составной сквозной стержень постоянного сечения.

4.2. Классификация узлов и опор. Определение стержней и узлов должно проводиться одновременно, поскольку после выделения стержней сразу выявляются места их соединений. При этом надо иметь в виду, что габаритные размеры узла должны быть соизмеримы с габаритами соединявшихся в нем стержней. Узел (или опора), так же как любой элемент расчетной схемы, может рассматриваться с геометрической и физической стороны.

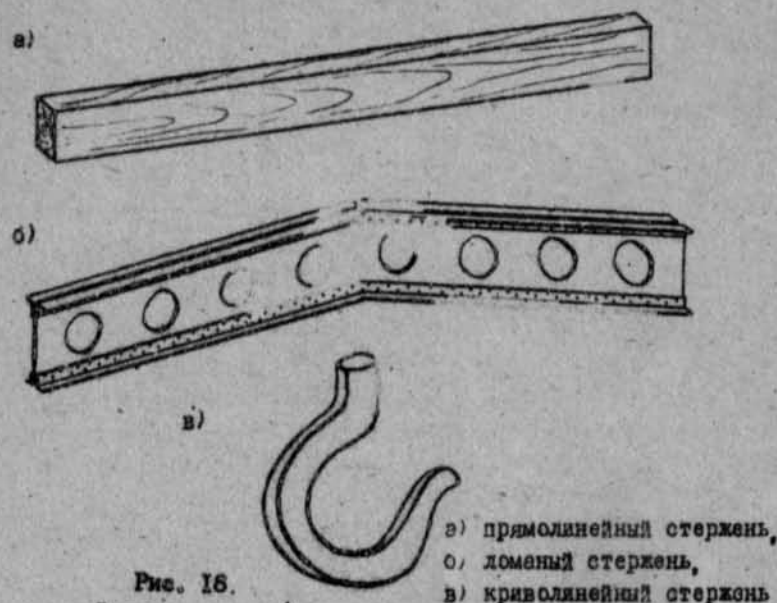


Рис. 18.
Стержни

а) прямолинейный стержень,
б) ломаный стержень,
в) криволинейный стержень

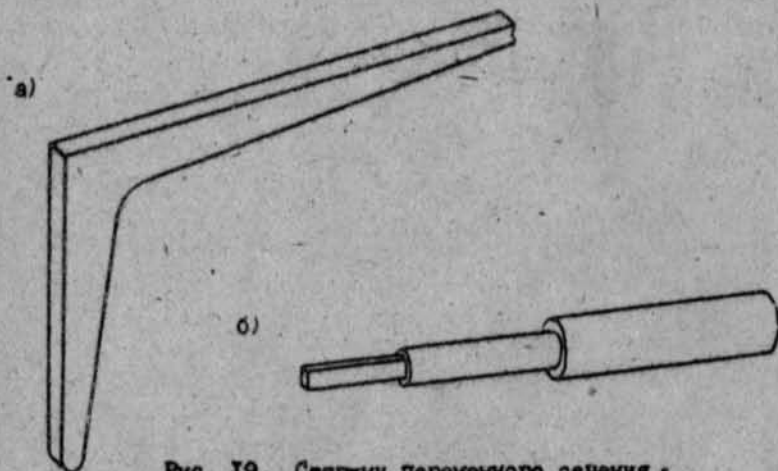
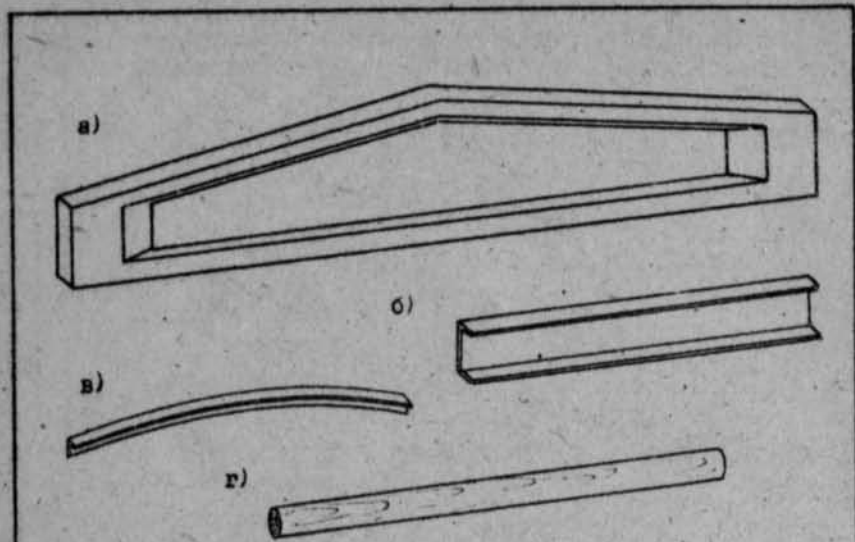


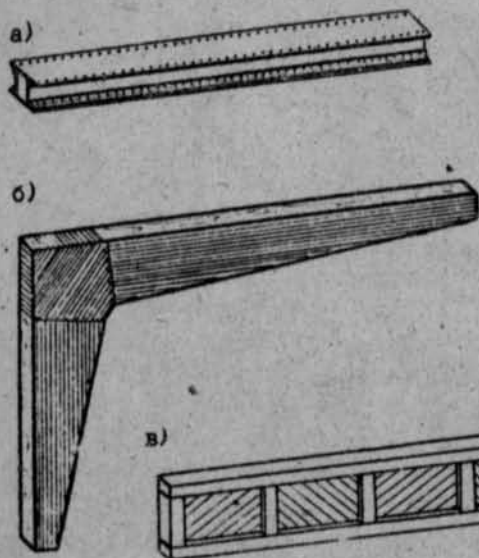
Рис. 19. Стержни переменного сечения:

а) плавное изменение поперечного сечения,
б) скачкообразное изменение форм и размеров поперечного сечения



а) железобетонная балка покрытия,
 б), в) прокатные элементы,
 г) деревянный брус

Рис. 20.
 Монолитные стержни



а) клепаная балка,
 б) элемент клееной рамы,
 в) дощато-гвоздевая оалка

Рис. 21.
 Составные стержни

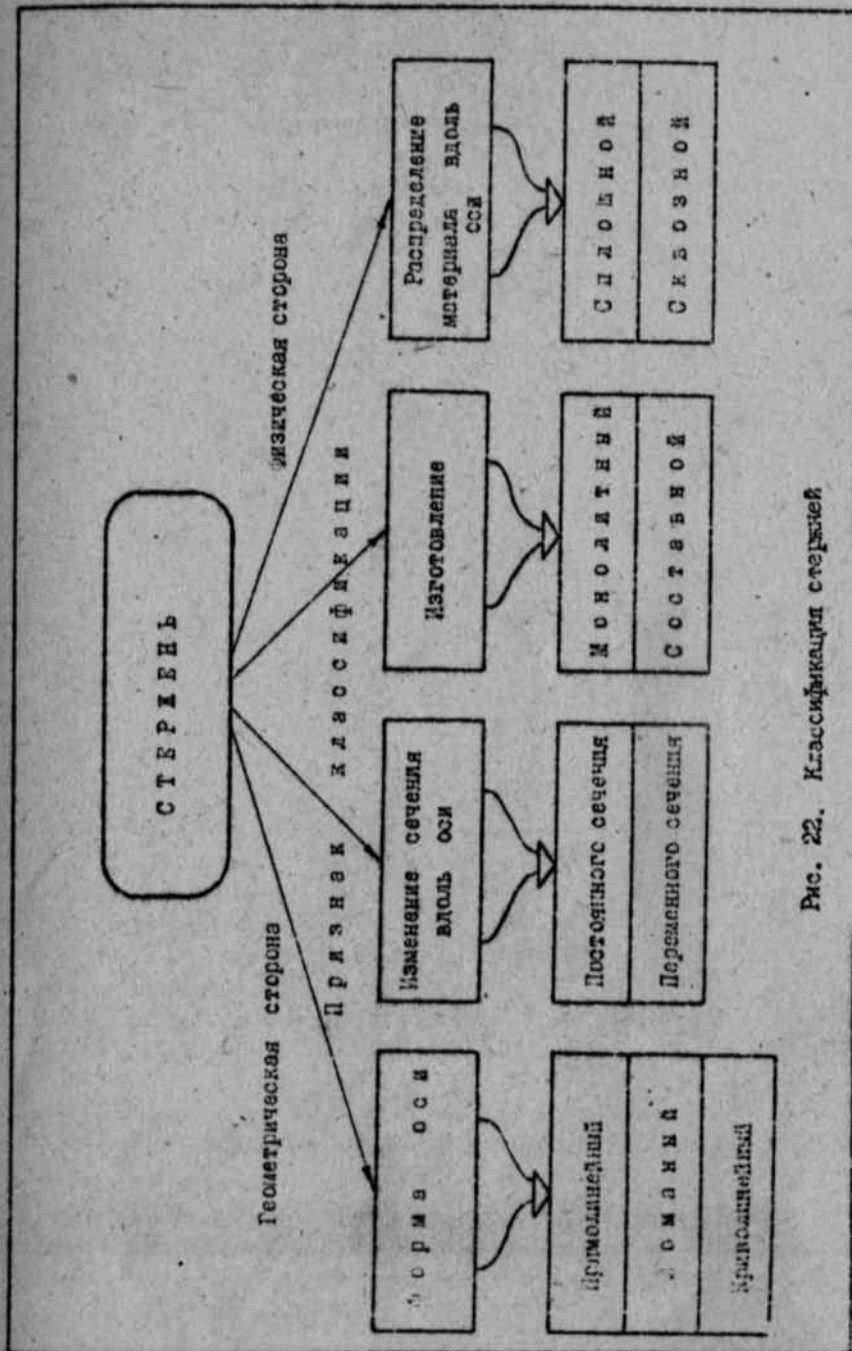


Рис. 22. Классификация стержней

Традиционная классификация узлов, принятая в строительной механике и связанная с характером статической работы и кинематическими свойствами, подробно рассмотрена в главе 3 настоящего пособия. Различают шарнирные и жесткие узловые соединения и соответствующие опорные закрепления (шарнирно-подвижные, шарнирно-неподвижные, защемления).

Наиболее сложны в построении расчетных схем является определение характера работы узлов. При анализе узлового соединения необходимо опираться на их статические и кинематические свойства. Если конструкция узла позволяет соединяемым элементам хотя бы на малую величину поворачиваться друг относительно друга, то такой узел - шарнирный, если же в узле имеются элементы, препятствующие вращению, то узел жесткий. В случае, когда конструкция узла способна воспринимать изгибающий момент, узел жесткий, в противном случае - шарнирный. По исполнению различают конструктивно явно выраженные и конструктивно неявно выраженные узлы (опоры).

К первому типу относятся те соединения, характер работы и кинематические свойства которых явно выражены в конструктивном исполнении. Явно выраженные шарнирные узлы имеют в месте соединения стержневой конструктивные элементы, допускающие взаимный поворот концов соединяемых стержней и определяющие ось вращения шарнира (болты, втулки и т.п.). Явно выраженные жесткие узлы выполнены в виде монолитных соединений, не допускающих взаимный поворот соединяемых стержней.

Ко второму типу относятся узлы и опоры, о характере работы которых можно судить по некоторым косвенным признакам. Так, неявно выраженные шарнирные узлы выполняются с уменьшением, ослаблением поперечного сечения и соответственно жесткости стержней в месте их соединения. Жесткость стержня можно характеризовать отношением длины к высоте l/h , чем оно больше, тем жестче стержень. По соотношению жесткостей соединяемых в узле стержней можно судить о характере узла. В неявно выраженных жестких узлах это соотношение имеет малую величину. Такие узлы выполняются с постановкой различного рода связей - дополнительных элементов, увеличивающих жесткость соединения.

Конструктивное исполнение узлов и опор весьма разнообразно, поэтому указанные типы узлов можно классифицировать по конструктивным признакам. Явно выраженные шарнирные узлы делятся на

- балансирные;
- плиточные, пятниковые;
- болтовые.

Балансирный шарнирный узел или опора выполняется устройством на концах соединяемых стержней балансиров - специальных деталей, в гнезда которых укладываются плотно пригнанную цилиндрическую цапфу (рис. 23,а). Часто гнездо для цапфы устраивают непосредственно на концах соединяемых стержней (рис. 23,б,в). Для восприятия растягивающих усилий ставятся дополнительные связи по оси соединяемых элементов так, чтобы не препятствовать их взаимному углу поворота.

Плиточные шарнирные узлы выполняются постановкой на конце стержня плиты, одна сторона которой имеет цилиндрическую поверхность (рис. 24). Пятниковые шарнирные узлы имеют специальное опорное гнездо - пятник, в который вставляется закругленная часть срежня (рис. 25). Плиточные и пятниковые шарниры применяются чаще всего в конструкциях опор.

В болтовых шарнирах ось болта определяет положение шарнира. Для его устройства обычно на концах соединяемых стержней закрепляются накладки или обоймы, в соосные отверстия которых вставляется болт (рис. 26).

Явно выраженные жесткие узлы выполняются монолитными, они могут быть с усилением или без усиления. Монолитные жесткие узлы с усилением делаются таким образом, что поперечное сечение стержней при подходе к узлу увеличивается или же в месте соединения стержней ставятся дополнительные элементы и связи, увеличивающие жесткость узла (рис. 27,а-д). Монолитный жесткий узел без усиления представляет собой соединение стержней постоянного сечения с равными или мало отличающимися размерами (рис. 27,е-з).

Следующие соединения в большинстве случаев могут быть отнесены к шарнирам, в них конструктивно шарнир неявно выражен:

- соединения стержней со значительно различающейся жесткостью ($\alpha > 5$);
- соединения стержней с уменьшением, ослаблением сечения в узле;
- соединения с центрирующими элементами,

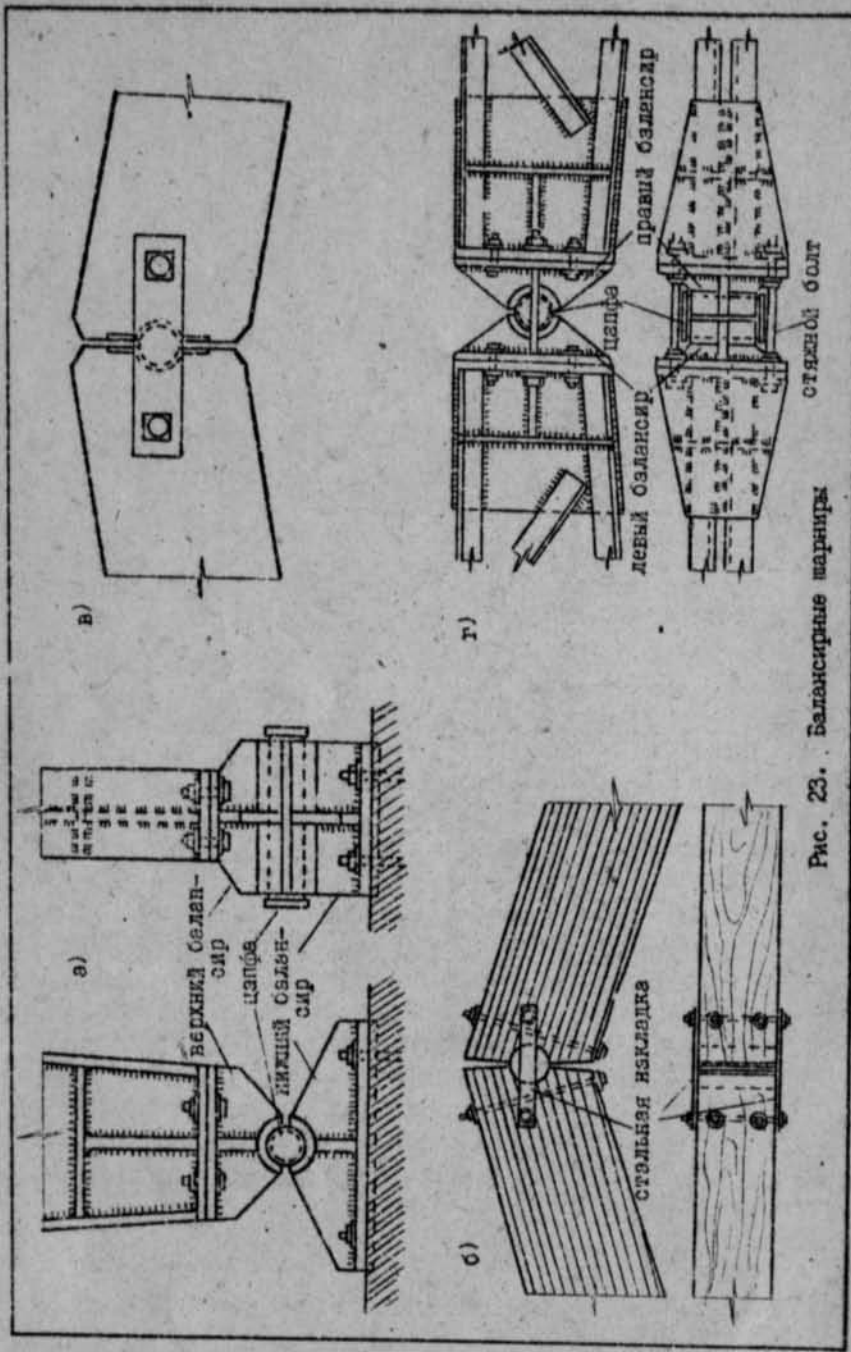


Рис. 23. Балансирующие шарниры

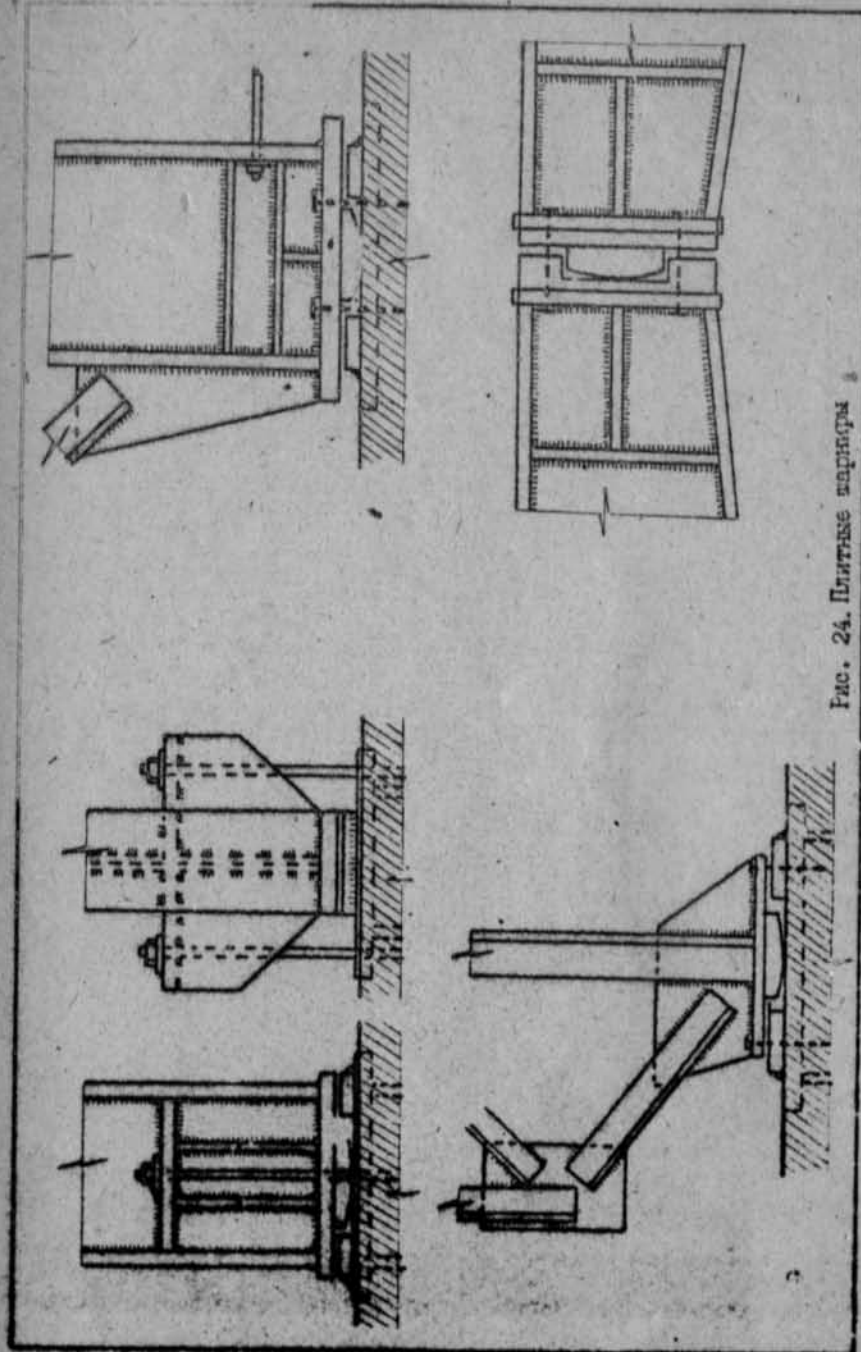
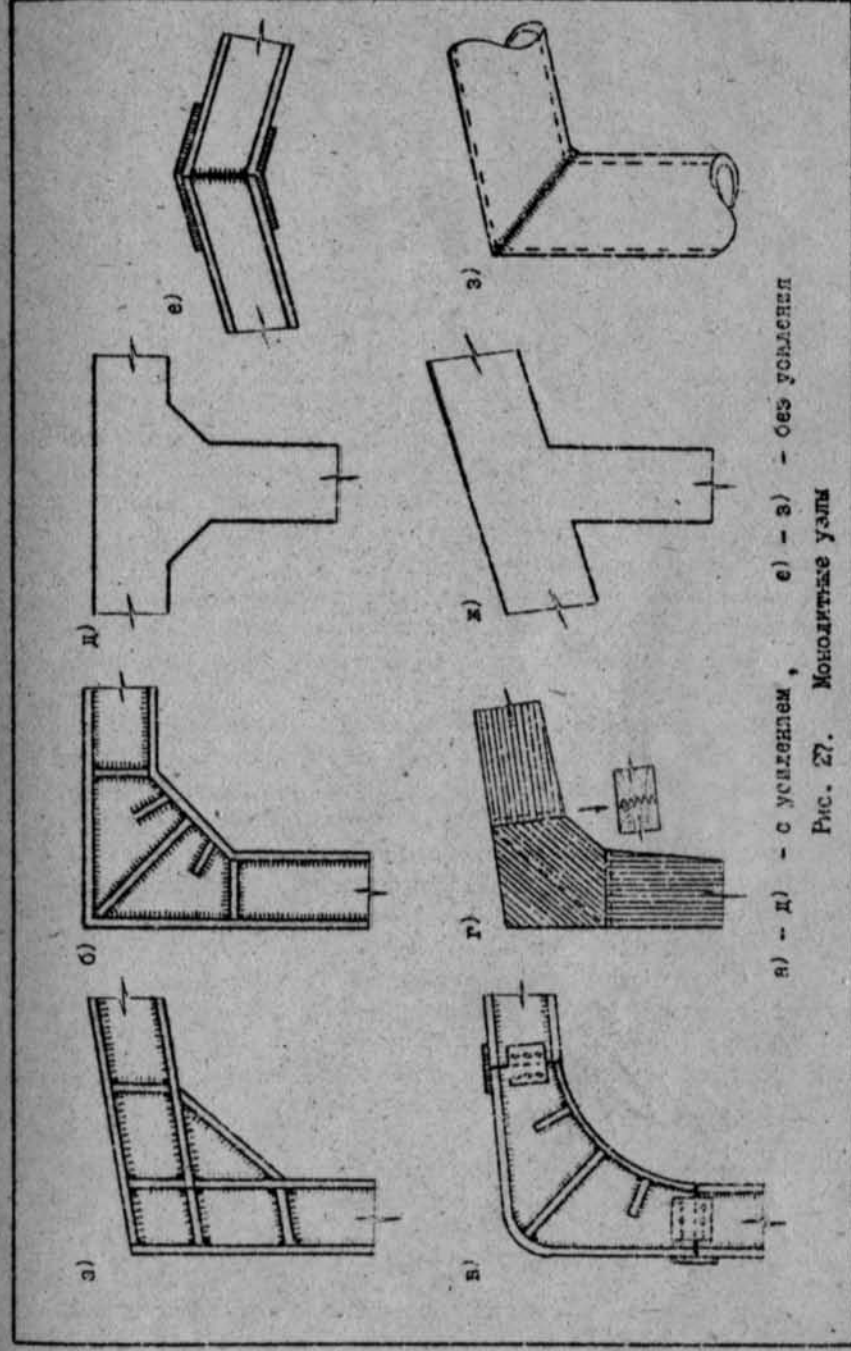
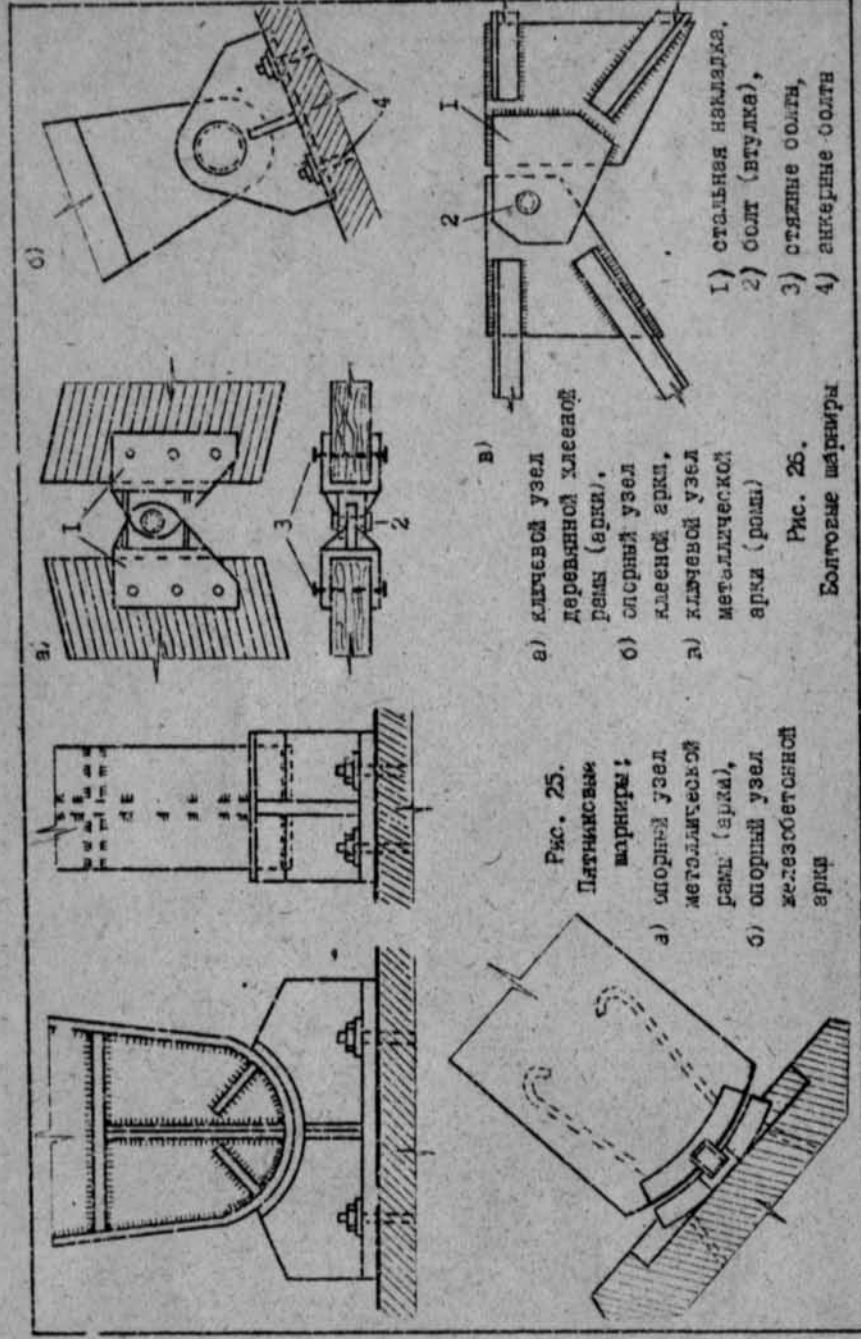


Рис. 24. Литые шарниры



- гнездовые соединения, врубки.
Все эти соединения выполняются, как правило, с разрезкой соединяемых в узле стержней. Показатель α определяется как частное от деления отношений габаритных размеров соединяемых стержней

$$\alpha = \frac{l_1}{h_1} : \frac{l_2}{h_2}$$

Если показатель $\alpha > 5$ то имеет место соединение гибкого стержня с жестким ("тонкого" с "толстым"). В этом случае гибкий стержень не способен воспринять изгибающий момент, поэтому можно считать, что он присоединен неявным шарнирным узлом (рис. 28).

Если при подходе к узлу поперечное сечение стержней уменьшается или ослабляется различными вырезами, то такой узел не будет воспринимать изгибающий момент и также относится к неявно выраженным шарнирным узлам (рис. 29). Уменьшение или ослабление сечения может быть резким, например, как в листовом шарнире (рис. 29, в, г) - соединении стержней с помощью расположенного по оси стержней листа, который в силу своей гибкости не препятствует повороту концов стержней.

К неявно выраженным шарнирным узлам относятся и узлы, в которых стержни соединяются посредством центрирующих элементов - штирей, болтов, прокладок, устанавливаемых по оси соединяемых элементов (рис. 30).

Присоединение стержней с помощью гнезд, врубок оставляет некоторую подвижность - концы соединяемых стержней могут поворачиваться относительно друг друга. В этом случае также будет неявный шарнирный узел (рис. 31). В случае соединения врубками стягивающие скобы должны ставиться неподалеку от оси узла, в противном случае жесткость узла возрастает и такой узел будет способен воспринимать изгибающий момент и его необходимо отнести к жестким узлам.

Неявно выраженные жесткие узлы могут быть в случае:

- соединения стержней различной жесткости $\alpha < 5$;
- соединения с дополнительными связями, воспринимающим момент.

Если присоединяются стержни различной жесткости $\alpha < 5$, то такое соединение способно воспринимать изгибающий момент и относится к неявно выраженным жестким узлам (рис. 32).

Постановка дополнительных связей - накладок, распорок и т.п., воспринимающих изгибающий момент, относит узел к жестким

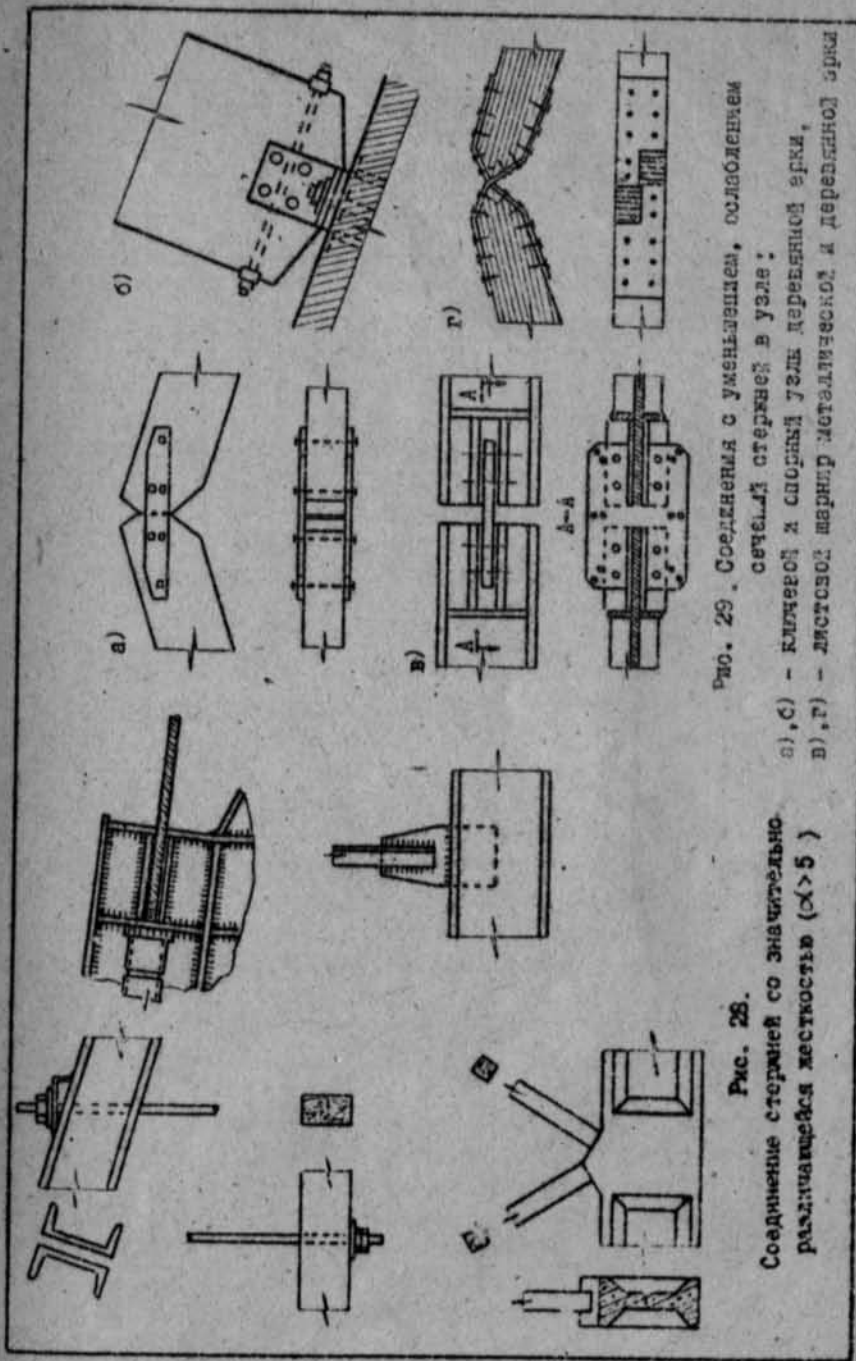
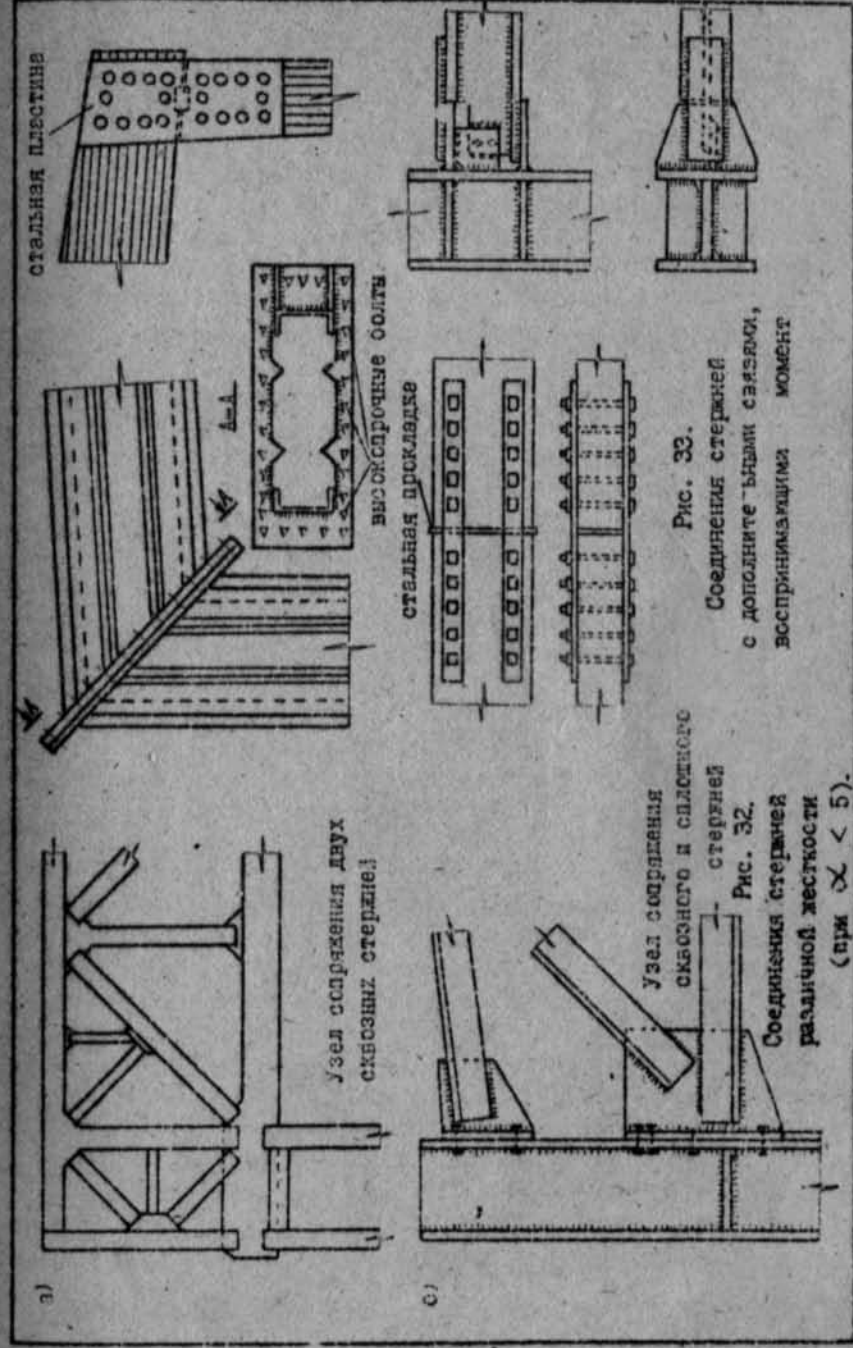
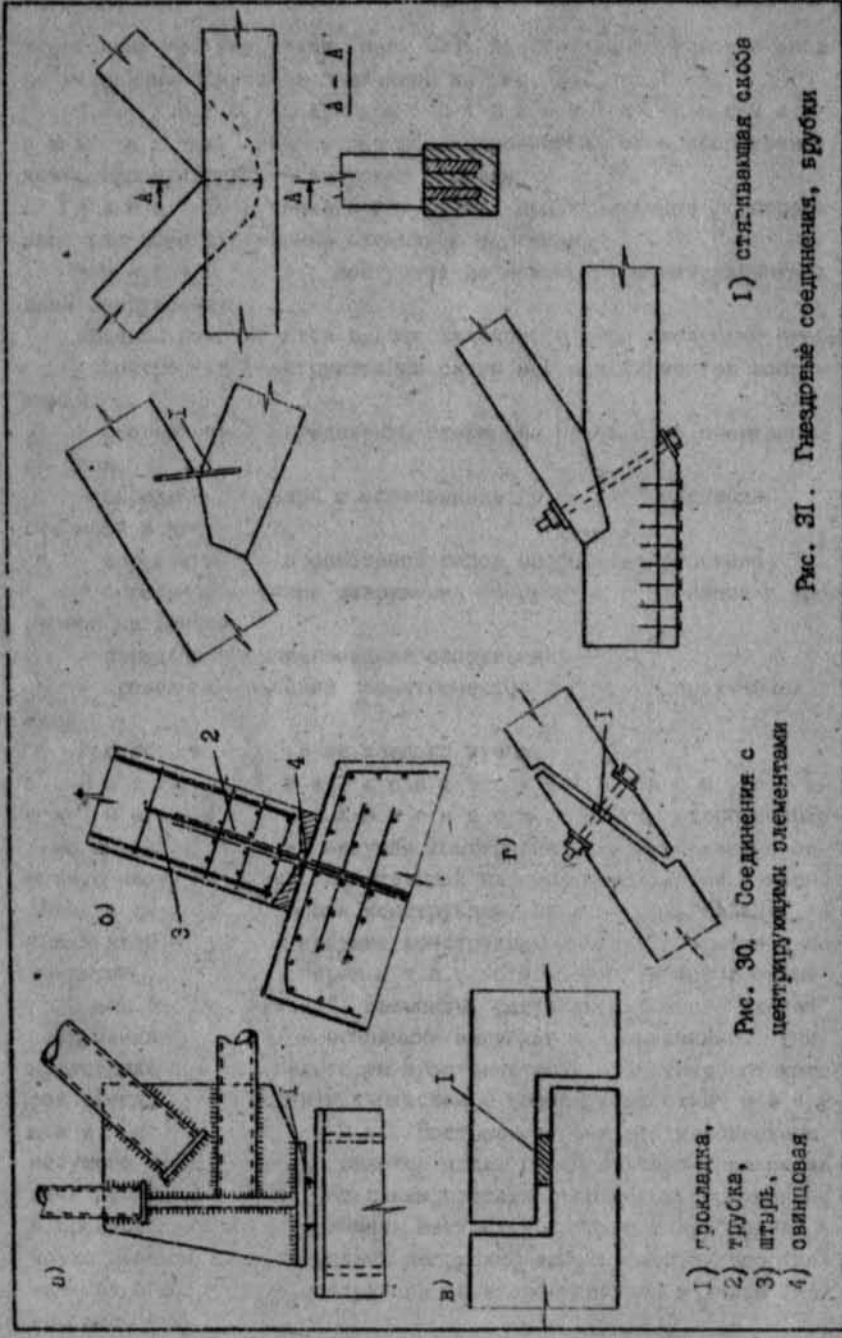


Рис. 29. Соединения с уменьшением, ослаблением сечений стержней в узле:

а), б) - клинчатый и спиновый узлы деревянной арки,
в), г) - листовый шарнир металлической и деревянной арки

Рис. 28.

Соединение стержней со значительно различающейся жесткостью ($\alpha > 5$)



Обоснованное определение стержней и, нахождение очертания их осей. Учитывая отношение габаритных размеров, в сооружении находят элементы, которые можно принять за стержни. Вариантов выделения стержней может быть несколько, и каждому из них будет соответствовать своя расчетная схема.

После определения стержней становится ясным местоположение узлов и опор. Поэтому рекомендуется построить схему выделенных стержней, узлов и опор. На ней стержни обозначаются контурными линиями, узлы квадратиками, опоры (опорные узлы) квадратиками с чертой (рис. 37, а).

Положение оси стержня определяет величины усилий. Если же отклонение оси составляет 3-5% длины стержня, то величины усилий изменяются в пределах допустимых для практических целей. Поэтому часто проводят сглаживание оси. Кривой стержень заменяется прямой, наклонной - горизонтальной или вертикальной. Изменение оси за счет приливов, консолей, конструктивных выступов и впадин, размеры которых малы по сравнению с длиной стержня, не учитывается. Сглаживание оси оправдано только в том случае, когда это не приводит к нарушению неизменяемости геометрической структуры расчетной схемы.

Построение расчетных осей стержней состоит из двух этапов: во-первых, намечается геометрическое место центров тяжести сечений - получается как бы "черновая ось"; во-вторых, производится сглаживание до расчетной оси. Все построения необходимо проводить в масштабе. Рекомендуется следующий порядок построения расчетных осей:

- вычерчиваются необходимые конструктивные схемы сооружения, определяются оси стержней;
- на чертеж накладывается галька и на нее переносятся черновые оси;
- производится сглаживание осей и перенос их на окончательную схему.

Определение узлов и обоснование способов соединения стержней в них. Одновременно с выделением стержней необходимо определить характер узловых соединений. По размерам габариты узла должны быть соизмеримы с габаритами поперечных сечений сходящихся в нем стержней. Для определения характера узлового соединения требуется выявить его кинематические и статические

свойства. Если анализ конструкции узла показывает, что концы сходящихся в нем стержней могут поворачиваться друг относительно друга хотя бы на малую величину, то узел шарнирный. В связи с тем, что в шарнире не возникает момента, сечение в плоскости действия сил при подходе к такому узлу уменьшается, а в самом узле наблюдается резкое сужение. При подходе к жесткому узлу сечение увеличивается. Графически запроектированное сооружение всегда обладает формой, соответствующей распределению усилий в нем, то есть отвечает его статическим свойствам. В процессе анализа кинематических и статических свойств узлов большую помощь может оказать приведенная выше классификация узлов и опор.

При анализе конструктивной схемы может оказаться так, что нагрузка передается только в узлы сооружения и в них не возникает значительных моментов. Тогда этими усилиями можно пренебречь. Это означает, что узел может быть принят шарнирным несмотря на его конструктивное исполнение. Необходимо, однако, помнить, что поставка шарниров увеличивает подвижность построенной расчетной модели и может привести к тому, что она станет геометрически изменяемой. В этом случае не все узлы принимаются шарнирными.

Определение и обоснование типов опорных закреплений. Опорные закрепления намечаются совместно с узлами. Опоры, так и узлы, характеризуются статическими и кинематическими свойствами. Чтобы определить характер закрепления, необходимо проанализировать возможность перемещения сооружения в опоре, обусловленную конструктивными связями. Для этого необходимо отделить опору вместе с частью сооружения, примыкающего к ней, и установить направления связей. Затем на расчетной схеме с помощью опорных стержней ограничить перемещения опор в соответствии с препятствиями в их конструкции.

Здесь, как и в узлах, учитывается форма сооружения. Если при движении к опоре сечение стержня увеличивается, то в ней следует ожидать защемление, если уменьшается, то шарнир. Следует также обращать внимание на характер работы опорного узла - места соединения стержней. Знание приведенной выше классификации узлов и опор облегчает анализ характера работы опорного закрепления.

Определение линии загрузки сооружений постоянной и временной нагрузкой. На основные несущие конструкции опираются другие части сооружения, которые передают на них нагрузку в виде собственного веса, веса снегового покрова, оборудования, людей, действия ветра, тормоз или крана и других факторов. Для решения основной задачи строительной механики нет необходимости знать природу нагрузки, она должна быть представлена как силовой фактор, известный заданное направление, точку приложения и величину.

Возможное место приложения нагрузки удобно показать линией загрузки — линией, перпендикулярной направлению нагрузки. Эта линия, состоящая из двух элементов, указывает и направление нагрузки — от тонкой к толстой черте (рис. 39, г). Величины же нагрузок нормируются. Для их нахождения требуется знать район строительства, назначение сооружения и его оборудование и другие усл. я. Однако это не входит в задачи строительной механики и поэтому здесь не рассматривается.

Определение наименования сооружения. Анализируя характер работы полученной расчетной схемы, необходимо установить наименование сооружения в соответствии с классификацией расчетных схем плоских стержневых систем, приведенной в главе 3 (п. 3.3). Поскольку реальное сооружение может иметь несколько расчетных схем, то и наименование его может быть различным в расчетном отношении, это зависит от тех допущений, которые были приняты в процессе построения этих расчетных схем.

Проведение анализа геометрической структуры полученных схем. Необходимо проанализировать полученные расчетные схемы с точки зрения их геометрической неизменяемости, поскольку сооружение способно воспринимать действующие на него нагрузки только в том случае, если оно будет неизменяемым. Анализ геометрической структуры производится в соответствии с порядком и правилами, приведенными в соответствующем разделе строительной механики.

Полученные геометрически неизменяемые расчетные схемы сооружений можно рассчитывать на действие нагрузок и определять перемещения и внутренние усилия любых точек сооружения.

4.4. Примеры построения расчетных схем. Пусть дано сооружение, изображенное на

рис. 35. Требуется построить возможные расчетные схемы несущего поперечника.

Решение.

1. Строим конструктивную схему.

1.1. Проанализируем заданное сооружение. Оно включает (как видно из рис. 35) покрытие и элементы, несущие это покрытие. В состав покрытия входят плиты и кровля. Плиты являются несущими конструкциями для кровли. Они передают свой собственный вес, вес кровли и всего, что может на ней находиться (например, снег), на нижнюю решетчатую конструкцию. Последняя расположена перпендикулярно продольной оси, т.е. является поперечной несущей конструкцией или поперечником, передающим все давление на фундамент.

По длине сооружения несущие конструкции распределены равномерно, и находятся они в равных условиях. Поэтому можно выделить один поперечник и рассматривать несущие конструкции в его плоскости.

1.2. Выделим поперечник и вычертим его конструктивную схему (рис. 36).

1.3. Плиты покрытия передают нагрузку в местах опирания их на поперечники ребрами. Эти места на рис. 35 обозначены треугольниками.

2. Выделяем стержни, углы и опоры.

2.1. Рассматривая каждый сплошной элемент конструкции, устанавливаем, что расстояние между узлами (точками, где сходятся элементы) — длина — больше максимального размера поперечного сечения — высоты — в пять и более раз, следовательно, они являются стержнями. Условно на схеме (рис. 37, а) стержни обозначаем контурными линиями.

2.2. Поскольку мы приняли за стержень все сплошные элементы несущей конструкции, то места их соединения принимаем за узлы. Узлы условно обозначим квадратами.

2.3. Узел соединения элементов с фундаментами будем считать опорным. Условно опору обозначим квадратом с чертой.

Схема с выделенными стержнями, узлами и опорами изображена на рис. 37, а.

3. Устанавливаем оси стержней.

3.1. В каждой сечении стержней находим центры тяжести и наносим их на рис. 37, б.

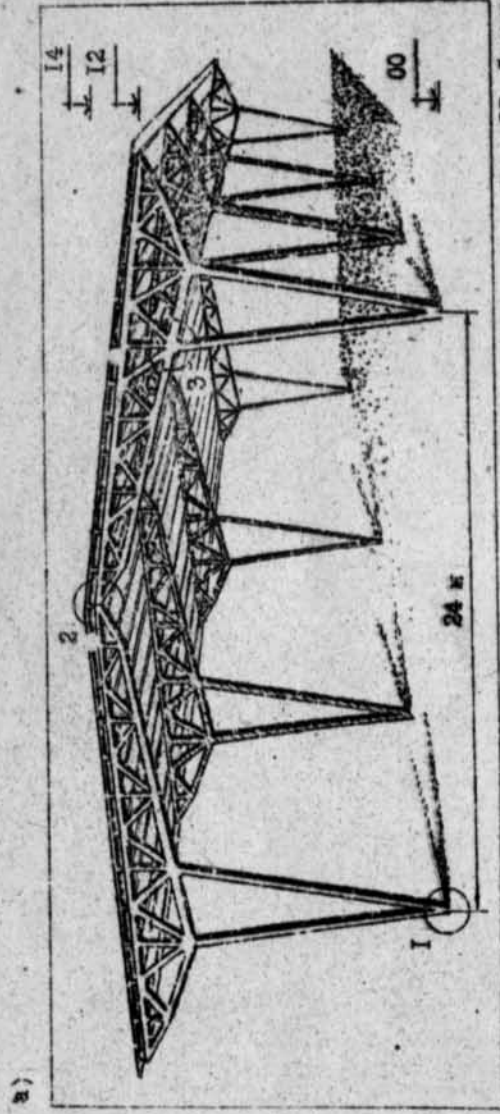


Рис. 35. Сооружение и узлы:

а) перспектива каркаса,

б) узел 1,

в) узел 2,

г) узел 3,

1 - трубка,

2 - штырь,

3 - стальной прокладок,

4 - заделанные раствором

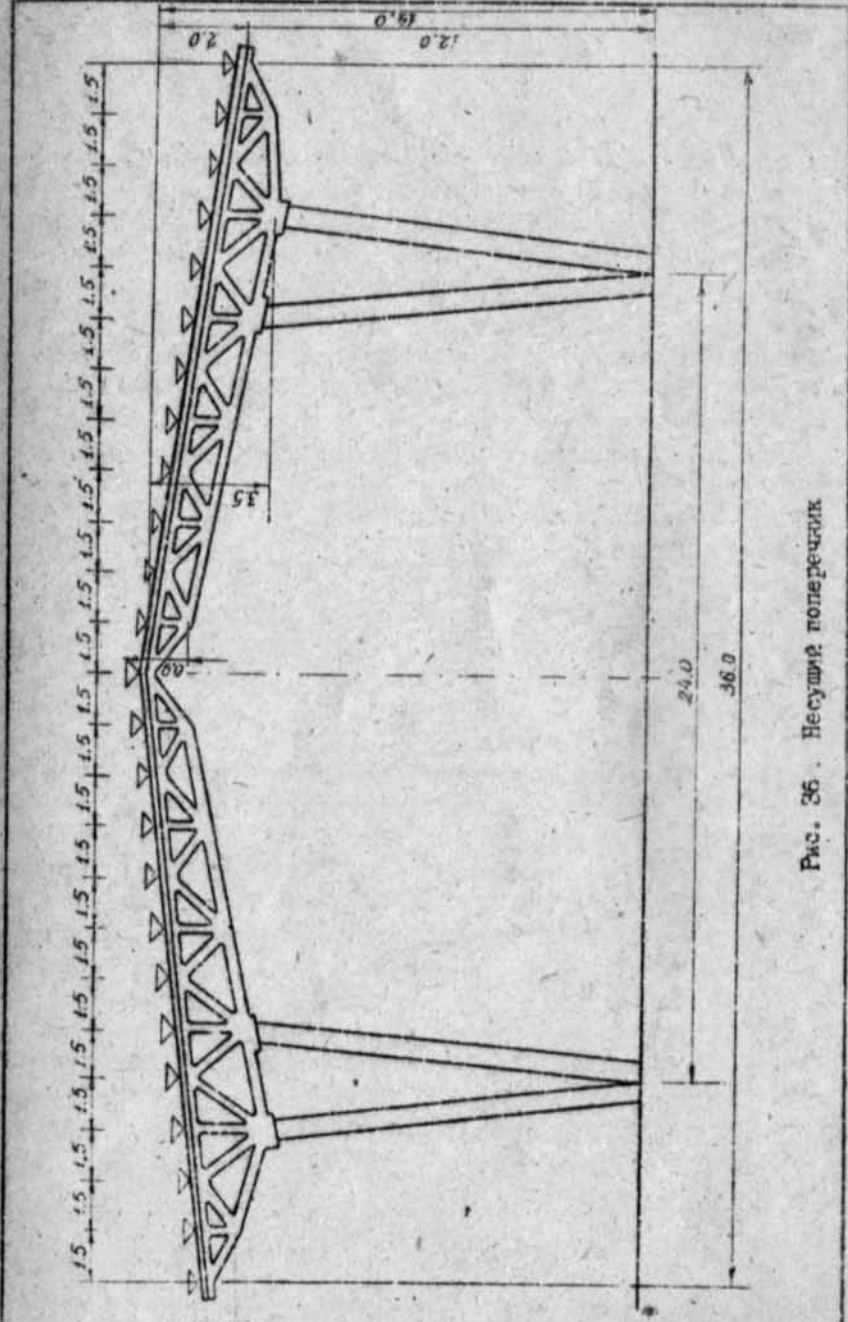
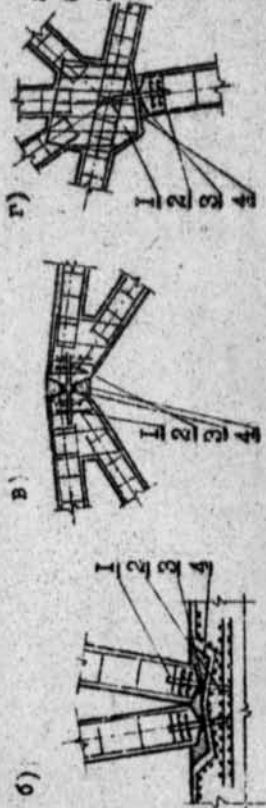


Рис. 36. Несущий полеречник

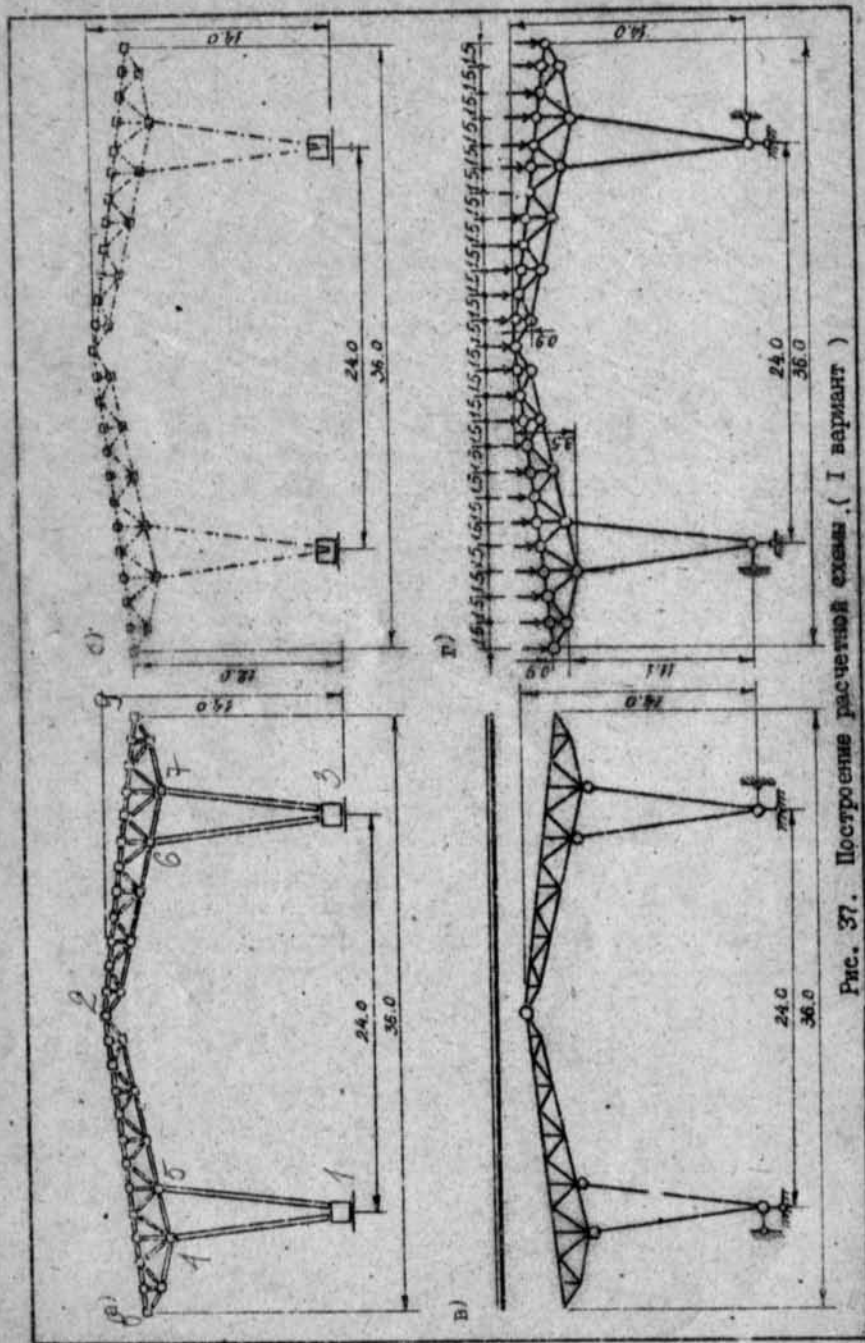


Рис. 37. Построение расчетной схемы (I вариант)

3.2. Соединив центры тяжести сечений, получим их оси (рис. 37,б).

4. Устанавливаем характер узлов и опор.

4.1. Узлы 4, 5, 6, 7 крепления стоек к элементам перекрытия, а также 1, 3 - соединения стоек с фундаментом и 2 - коньковый узел выполнены одинаково. В них элементы соединяются с помощью центрирующего штыря и свицовой прокладки, а зазор между концами элементов замоноличивается раствором. В этом соединении центрирующие штыри препятствуют линейным перемещениям концов стержней. Поскольку площадь контакта между элементами небольшая по сравнению с их поперечными сечениями (слабый раствор не учитываем), центрирующий штырь установлен на нейтральной оси присоединяемого элемента и не воспринимает изгибающих моментов, то узел можно считать шарнирным.

Остальные узлы выполнены монолитными и не допускают ни смещений, ни поворотов сходящихся в них стержней, т.е. являются жесткими.

4.2. Исходя из анализа опорных узлов 1 и 3 (подробно такие соединения рассмотрены в п. 4.1), устанавливаем, что в опоре стержни не имеют линейных смещений. На расчетной схеме опорными стерженьками устраняем соответствующие перемещения.

Полученная расчетная схема изображена на рис. 37,в.

5. Устанавливаем линии нагрузки и характер передачи ее на сооружение.

Нагрузка на сооружение действует вертикальная - собственный вес несущих конструкций, перекрытия и снегового покрова. Замечаем, что плиты покрытия опираются на несущую конструкцию в узлах (узловая передача нагрузки). А в этом случае изгибающие моменты в узлах незначительные, поэтому можно заменить все жесткие узлы на шарнирные. Полученная расчетная схема изображена на рис. 37,г.

6. Устанавливаем наименование сооружения.

Поскольку стержни во всех узлах (рис. 37,г) соединены полными шарнирами, нагрузка узловая, и в стержнях возникают только продольные усилия, то данное сооружение является фермой.

7. Проанализируем геометрическую структуру полученной расчетной схемы.

7.1. Подсчитываем степень свободы системы, имеющей 39 узлов и 78 стержней, включая опорные: $W = 2 \cdot 39 - 78 = 0$, т.е. имеется достаточное количество связей.

7.2. Проверим геометрическую неизменяемость расчетной схемы. Элементы 2-8-4-5-1 и 2-9-6-7-3 являются дисками, их неизменяемость можно доказать, например, так: выбираем любой треугольник (три стержня соединены тремя шарнирами, не лежащими на одной прямой), а к нему следующий шарнир присоединен двумя стержнями, оси которых не лежат на одной прямой, к полученному диску аналогично присоединяется следующий шарнир и т.д. И, наконец, шарнир 2 присоединен к земле с помощью двух дисков 1-2 и 2-3 так, что линии 1-2 и 2-3 не лежат на одной прямой, поэтому вся система геометрически неизменяема.

Расчетная схема заданного сооружения, изображенная на рис. 37, г, не единственная.

8. Строим другие расчетные схемы.

8.1. Элементы 2-8-4-5 и 2-9-7-6 в соответствии с классификацией являются монолитными сквозными стержнями переменного сечения (по соотношению габаритных размеров).

Выделю стержни и узлы (рис. 38, а). Оси стержней построены на рис. 38, б. Узлы 1-7 - шарнирные, их анализ произведен ранее (см. п. 4.1 и 4.2). Поскольку узлы 4, 5, 6, 7 лежат на нижней грани стержней 2-8 и 2-9, то их необходимо соединить с осями жесткими консолями (рис. 38, в).

Полученная расчетная схема изображена на рис. 38, в. Эту схему можно упростить, спрямив стержни 2-8 и 2-9 и сделав шарниры 4, 5, 6, 7 приставными (рис. 38, г).

Устанавливаем наименование полученного сооружения. Это комбинированная система, поскольку в стержнях 1-4, 1-5, 3-6 и 3-7 возникают только продольные усилия (эти стержни не нагружены и имеют шарниры по концам), а в стержнях 2-8 и 2-9 - все три вида внутренних усилий.

Проанализируем геометрическую структуру полученной расчетной схемы. Она состоит из шести дисков, соединенных между собой семью шарнирами, и прикреплена к земле четырьмя опорами.

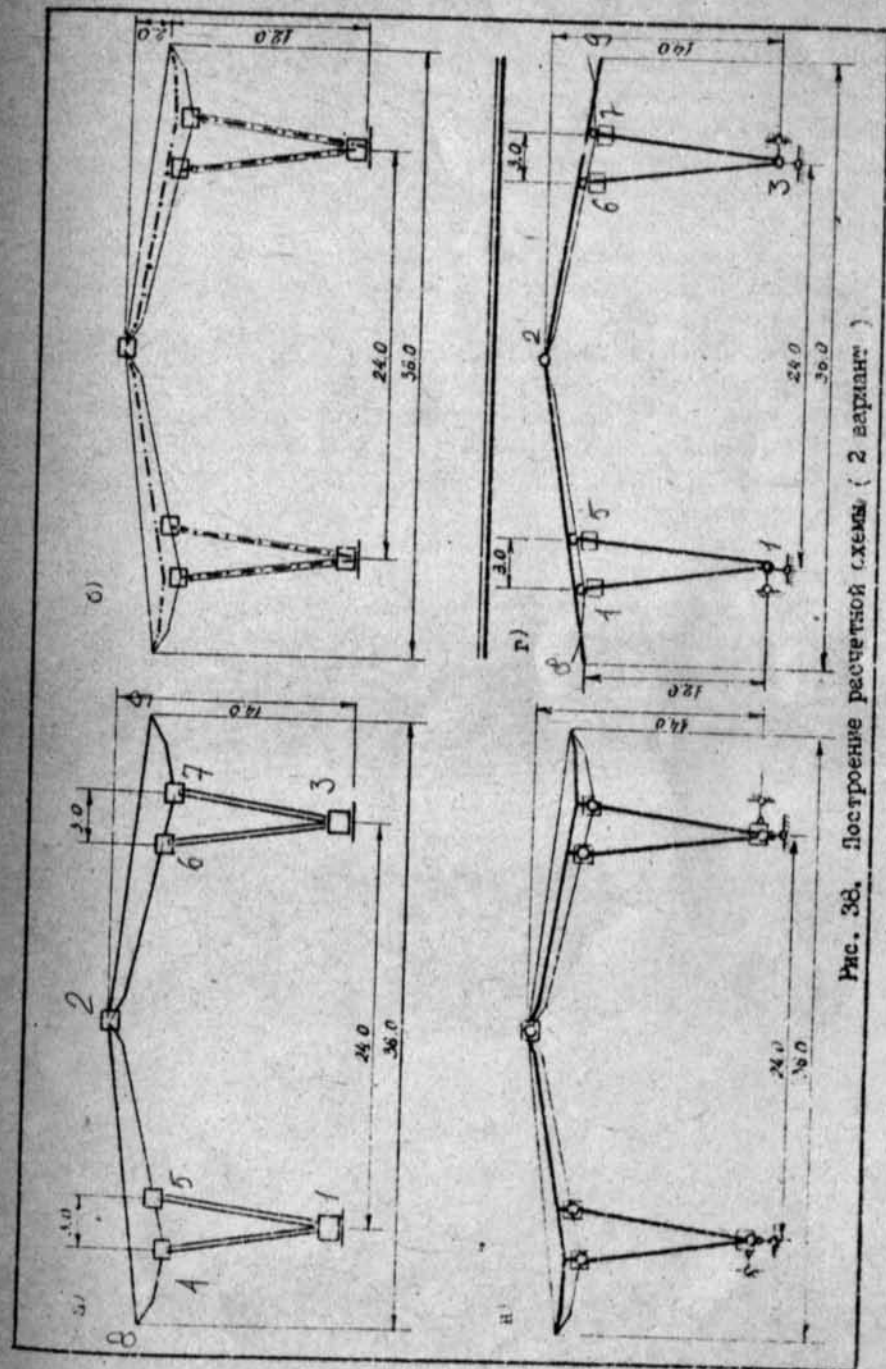


Рис. 38. Построение расчетной схемы. (2 вариант)

стержнями. Степень свободы ее $W = 3 \cdot 6 - 2 \cdot 7 - 4 = 0$. Стержни 1-4, 1-5 и 4-5 образуют диск (три стержня соединены тремя шарнирами, не лежащими на одной прямой). Стержни 3-6, 3-7 и 2-6-7 образуют аналогичный диск. Шарнир 2 прикреплен к земле двумя стержнями 1-2 и 1-3, причем оси последних не лежат на одной прямой, поэтому все сооружение будет геометрически неизменяемым.

8.2. Можно принять за единый стержень обе стойки 1-4 и 1-5 (а также 3-6 и 3-7). Схема выделенных стержней и узлов изображена на рис. 39, а.

Оси стержней построены на рис. 39, б. Узлы 1-3 такие же, как и в построенных ранее расчетных схемах.

Стержень 1-4-5 (или 3-6-7) соединен со стержнем 2-8 (или 2-9) в двух точках 4 и 5 (или 6 и 7). Хотя соединение в каждой этой точке шарнирное, но, работая совместно, они не допускают поворота стержня 1-4-5 (или 3-6-7) относительно 2-8 (или 2-9). Следовательно, узел в месте соединения указанных стержней - жесткий (рис. 39, в).

После упрощения расчетная схема представлена на рис. 39, г. Это однопролетная одноэтажная рама с наклонным ригелем. Она является геометрически неизменяемой, так как имеет необходимое количество связей ($W = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 1 - 4 = 0$) и в ней два диска присоединяют шарнирный узел 2 к земле так, что точки 1, 2, 3 не лежат на одной прямой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогрессивную поступь наук остановить невозможно. В связи с этим те знания, которые мы получили ранее, нас перестают устраивать. Мы стремимся к получению новых знаний и умений, удовлетворяющих современную эпоху. Так как расчетные схемы являются отражением состояния науки о прочности, то они должны соответствующим образом изменяться.

1. Пути дальнейшего развития и совершенствования расчетных схем. Естественен вопрос: какие объективные обстоятельства в наше время могут повлиять на развитие и совершенствование расчетных схем? Жизнь - практика здесь лучший указатель на такие обстоятельства. В последнее время (10-20 лет) широким фронтом внедряется в расчетную практику вычислительная техника.

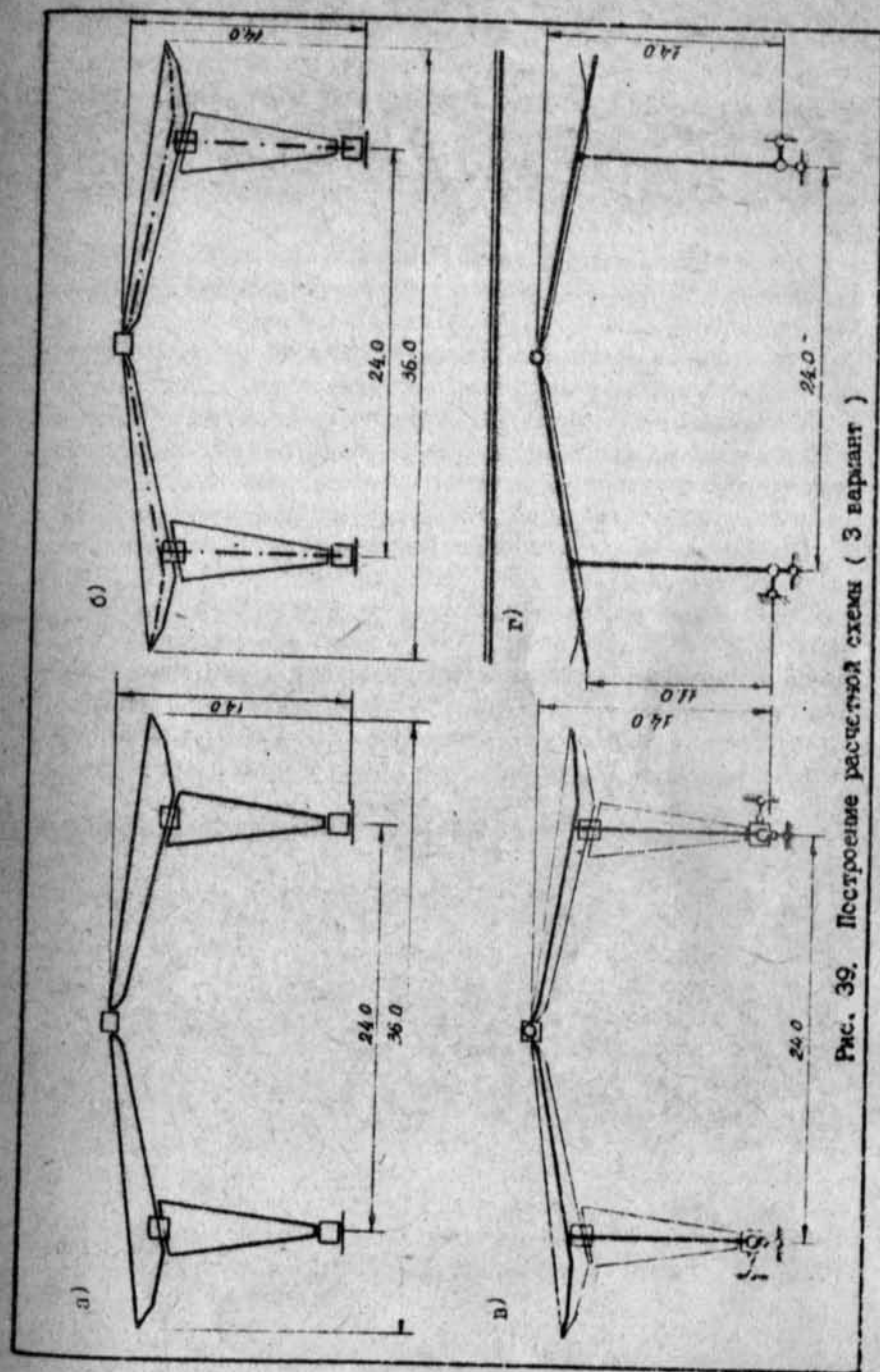


Рис. 39. Построение расчетной схемы (3 вариант)

Строительная механика как высокоматематизированная наука уже сейчас приняла на вооружение эту технику, что соответственно повлияло и на расчетные схемы сооружений. В них вводятся близкие к реальным свойства опор, узлов и самих стержней (например, рассматриваются податливые опоры, материал, не подчиняющийся закону пропорциональности в физическом и геометрическом смысле).

Второе веяние эпохи — создание новых экономичных строительных материалов, из которых могут выполняться несущие элементы зданий и сооружений. Эти новые материалы, обладающие свойствами, отличными от традиционных представлений об оценке прочности, ставят новые задачи перед строительной механикой в части оценки надежности и долговечности. А новые задачи накладывают отпечаток на расчетные модели, ибо только с учетом этих задач они строятся.

Еще предстоит большая работа по совершенствованию методики построения расчетных схем. Мы надеемся, что настоящая работа послужит основой дальнейшего развития этой методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленин В.И. Еще раз о профсоюзках, о текущем моменте и об ошибках Троцкого и Бухарина. — Соч., т. 42. М.: Политиздат, 1963.
2. Энгельс Ф. Диалектика природы. — Л.: Политиздат, 1948.
3. Бернштейн С.А. Избранные труды по строительной механике. — М.: Госстройиздат, 1961.
4. Бернштейн С.А. Счерки по истории строительной механики. — М.: Госстройиздат, 1957.
5. Воронков И.М. Курс теоретической механики. — М.: Физматгиз, 1959.
6. Гольденблат И.И., Бажанов В.А. Физические и расчетные схемы сооружений: Строительная механика и расчет сооружений. — М.: 1970, №2.
7. Гольденблат И.И., Бажанов В.А. Модели в теории устойчивости: об. Сопоставление материалов и теория сооружений. — Киев: Будивельник, 1975, вып. XXV.
8. Головин А.Я., Константинов И.А., Кунина Л.И., Николаева М.В. Строительная механика, ч. I: Статически определимые системы. — Л.: ЛПИ, 1959.
9. Герсеванов Н.М. Собрание сочинений. — М.: Стройвоенморпроект, 1948, т. 1.2.
10. Горский Д.П. Вопросы абстракции и образования понятий. — М.: АН СССР, 1969.
11. Даль В.И. Толковый словарь живого великорусского языка. — М.: Русский язык, 1981.
12. Дмитриев Ф.Д. Крушение инженерных сооружений. — М.: Госстройиздат, 1953.
13. История механики с древних времен до конца XVIII века. — М.: Наука, 1971.
14. История механики с конца XVIII века до середины XX века. — М.: Наука, 1972.
15. Киселев В.А. Строительная механика. — М.: Стройиздат, 1976.
16. Моисеев Н.Д. Счерки развития механики. — М.: МГУ, 1961.
17. Подольский Д.М. Выбор расчетных моделей по экспериментальным данным: Строительная механика и расчет сооружений. — М.: 1978, №5.
18. Подольский Д.М. Выбор расчетных моделей диафрагм жесткости многостаяных зданий на основе экспериментальных исследований: Строительная механика и расчет сооружений. — М.: 1978, №1.
19. Рабинович И.М. Курс строительной механики. — М.: Стройиздат, 1950, т. I.
20. Рабинович И.М. Строительная механика в СССР 1917—1957. — М.: Стройиздат, 1969.
21. Рабинович И.М. Об интуиции в строительной механике: сб. Исследования по теории сооружений. — М.: Стройиздат, 1970, XVIII.
22. Розин Л.А. Основы расчета арочных плотин по теории облочек методом расчленения: Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1965, т. 77.
23. Розин Л.А., Константинов И.А., Смелов В.А. Расчет статически определимых систем. — Л.: ЛГУ, 1963.
24. Снитко Н.К. Строительная механика. — М.: Высшая школа, 1972.
25. Стоценко А.А. Конспект лекций по строительной механике. — Владивосток: ДВПИ, 1975.
26. Строительная механика. Терминология. — М.: Наука, 1970.
27. Строительная механика (ред. Дарков А.В.) — М.: Высшая школа, 1976.
28. Строительная механика: стержневые системы (ред. Смирнов А.Ф.) — М.: Высшая школа, 1961.
29. Тольина И.А., Ракчев Е.Н. История механики. — М.: МГУ, 1962.
30. Феодосьев В.И. Сопроотивление материалов. — М.: Физматгиз, 1963.
31. Хайкин С.Э. Механика. — М.: Гостехиздат, 1947.

Св. план 1986, поз. 1364

Николай Михайлович Мальков
Алексей Александрович Стоценко

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ СООРУЖЕНИЙ
Учебное пособие

Научный редактор А.А. Цвид
Редактор С.А. Хмелева
Техн. редактор Л.П. Абраменко

Подписано в печать 10.06.86. ВД 14215. Формат 60x84/16. Бумага
оберточная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 4,65. Уч.-изд.л. 4,07
Тираж 300 экз. Заказ 362. Цена 14 коп.

Остоофсетная лаборатория ДВПИ. Владивосток, Ленинская, 53