

Михайлов А.М.

**Металлические конструкции
в примерах**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
М69

М69 **Михайлов А.М.**
Металлические конструкции в примерах / Михайлов А.М. – М.: Книга
по Требованию, 2012. – 320 с.

ISBN 978-5-458-36039-5

В начале каждого раздела книги приведены краткие теоретические сведения, конструктивные требования и практические рекомендации по расчету конструкций рассматриваемого типа. Примеры охватывают расчет соединений элементов металлических конструкций, расчет и конструирование балок и центрально-сжатых колонн. Большое внимание уделено проектированию и расчету конструкций стального каркаса одноэтажного производственного здания: подкрановых балок, внецентренно-сжатых колонн и стропильных ферм. Приведен также необходимый нормативный и справочный материал.

ISBN 978-5-458-36039-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

4) при проектировании сооружений следует предусматривать максимально возможную унификацию габаритных схем, рациональную типизацию¹ применяемых конструкций, наиболее совершенную технологию их изготовления и прогрессивные методы монтажа с использованием современных средств комплексной механизации строительного производства;

5) стальные конструкции должны проектироваться преимущественно сварными с широким применением механизированной сварки, конструкции из алюминиевых сплавов можно проектировать как сварными, так и клепаными;

6) необходимо предусматривать противокоррозонные мероприятия (создание условий для проветривания, очистки и окраски конструкций и наблюдения за ними);

7) следует предусматривать меры по уменьшению возможности отрицательного влияния дополнительных местных и внутренних напряжений (сварочных, усадочных и температурных напряжений, концентрации напряжений в местах резкого изменения геометрии сечения и т. д.), вызывающих склонность к хрупкому разрушению.

При проектировании необходимо хорошо знать технологию изготовления и монтажа конструкций проектируемого сооружения, учитывая оснащенность и производственные возможности заводов-изготовителей и монтажных организаций. Надо иметь представление о наличии и характере механического оборудования, о возможности переноса трудоемких операций сборки и сварки с монтажной площадки в условия высокомеханизированного завода, применения крупноблочного монтажа. Следует учитывать необходимость создания условий для получения качественных сварных и болтовых соединений при изготовлении и монтаже, предусматривать рациональную разбивку конструкций на транспортабельные отправочные элементы и т. п.

Конструкции, удовлетворяющие всем перечисленным требованиям, могут быть названы технологичными.² Практика, однако, показывает, что одновременное удовлетворение всех требо-

¹ Под *типизацией* подразумевается разработка и отбор наилучших конструктивных решений ряда однородных конструкций и их элементов в целях достижения наибольшей экономии материала, наименьшей трудоемкости изготовления, сокращения сроков монтажа при одновременном удовлетворении условий эксплуатации, капитальности и прочности. В настоящее время типизация сопровождается *унификацией*, т. е. приведением многообразных видов типовых конструкций к небольшому числу взаимозаменяемых типов, единообразных по форме и размерам.

² Согласно [17] *технологичным* считается конструктивное решение, обеспечивающее наиболее простое, быстрое и экономичное изготовление, транспортирование и монтаж, безаварийную и экономичную эксплуатацию при одновременном соблюдении условий прочности, устойчивости, выносливости, жесткости и стойкости против агрессивных воздействий.

ваний не всегда возможно из-за их противоречивости (например, мероприятия по обеспечению устойчивости увеличивают трудоемкость изготовления и поэтому находятся в некотором противоречии с принципом наименьшей трудоемкости). Перед проектировщиком стоит задача добиться оптимального¹ удовлетворения этих требований. Так как стоимость проектирования сравнительно невелика (3—5% стоимости возведения сооружения), дополнительные затраты на внесение поправок, повышающих технологичность конструктивного решения, в дальнейшем многократно окупаются.

§ 2. СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТОВ

Итак, прежде чем начать строительство, составляют проект будущего сооружения. Проектирование включает комплекс исследовательских, расчетных и конструкторских работ, направленных на разработку оптимального объемно-планировочного и конструктивного решения сооружения. Исходным документом для проектирования любого предприятия, здания или сооружения является задание на проектирование, составленное организацией-заказчиком при непосредственном участии проектной организации, разрабатывающей проект. В этом задании указывают: наименование предприятия, здания или сооружения; основание для проектирования (ссылка на соответствующее постановление правительства, министерства или ведомства); район, пункт и площадку строительства; производственную характеристику и режим работы предприятия; основные требования, которые должны быть заложены в проект; намечаемые сроки и очередность строительства; стадийность проектирования² и т. п.

В соответствии с заданием на проектирование проектная организация разрабатывает проект предприятия, здания или сооружения в две стадии — *технический проект* и *рабочие чертежи* или в одну стадию³ — *техно-рабочий проект* (технический проект, совмещенный с рабочими чертежами).

На стадии технического проекта путем сравнения вариантов выявляют наиболее рациональные объемно-планировочное, архитектурное и конструктивное решения предприятия, здания или сооружения; устанавливают номенклатуру строительных материалов, конструкций и изделий (в частности, целесообразность применения металлических конструкций); намечают источники снабжения проектируемого объекта сырьем, энергией,

¹ *Оптимальный* (от лат. *optimus* — лучший) — наиболее благоприятный.

² При строительстве промышленных предприятий следует руководствоваться инструкцией [5].

³ Одностадийное проектирование осуществляют при строительстве технически несложных объектов и объектов, возводимых по типовым или повторно применяемым экономичным индивидуальным проектам.

водой и другими ресурсами; производят технико-экономический анализ предполагаемого строительства и т. п.

Графическая часть технического проекта носит эскизный характер (принципиальное решение конструктивных схем с нанесением генеральных размеров), выполняется на основе ориентировочных расчетов и сопровождается пояснительной запиской с кратким изложением содержания проекта, сопоставлением вариантов, на основе которого приняты проектные решения и очередность строительства, перечнем объемов работ, сметной документацией и основными технико-экономическими показателями (стоимость 1 м², 1 м³ или 1 м конструкции, трудоемкость, масса конструкции и др.).

После утверждения технического проекта в соответствии со сводной сметой открывается финансирование строительства и начинается вторая стадия проектирования — разработка рабочих чертежей и проектной документации, необходимых для изготовления конструкций.

Рабочие чертежи металлических конструкций делятся на две группы: а) *чертежи КМ* (конструкции металлические), составляемые на основе материалов технического проекта и более точных расчетов в проектных организациях для последующей разработки детализованных чертежей; б) *чертежи КМД* (конструкции металлические, детализовка), служащие для изготовления отдельных элементов конструкций, а также частично для монтажа и выполняемые на основе проекта КМ, как правило, в конструкторских бюро заводов-изготовителей с учетом технологических возможностей последних и наличия металла.

Проект КМ состоит из общих схематических чертежей конструкций сооружения (планы, продольные и поперечные разрезы) с указанием размеров сечений, конструктивных решений элементов, их сопряжений и спецификации металла на все сооружение. На этой стадии производят увязку конструкций с архитектурно-строительной, технологической, транспортной, энергетической, санитарно-технической и другими частями проекта. Окончательный расчет конструкций оформляют в виде расчетно-пояснительной записки или расчетных листов, входящих в состав рабочих чертежей. Рабочие чертежи КМ утверждению не подлежат, и ответственность за качество их выполнения возлагается на проектную организацию.

Проект КМД состоит из чертежей всех металлических конструкций в виде отдельных элементов, отправляемых после изготовления с заводов на стройку (так называемые *отправочные элементы*, или *марки*), а также монтажных схем отправочных элементов. Рабочие чертежи отправочных элементов должны содержать все необходимые для их изготовления на заводе размеры и указания, спецификации деталей на каждый от-

правочный элемент, ведомости отправочных элементов, заводских сварных швов и заклепок.

Монтажные схемы предназначены для сборки конструкций на монтаже и поэтому должны содержать сведения о взаимном расположении отправочных элементов с размерами и отметками, необходимыми для выверки конструкций, сводной таблицей отправочных элементов, монтажных сварных швов, болтов и заклепок.

Следует иметь в виду, что отмеченная сравнительно невысокая стоимость проектирования металлических конструкций охватывает только технический проект и чертежи КМ. Стоимость же чертежей КМД входит в стоимость изготовления конструкций и может достигать 15—20%, т. е. является значительной. Поэтому проект КМ должен быть разработан так, чтобы в дальнейшем максимально облегчить составление детализованных чертежей. В то же время в заводских конструкторских бюро необходимо не только проверять проекты КМ на технологичность, но и повышать ее, поскольку ошибки, допущенные при разработке чертежей КМД, трудноисправимы и отрицательно скажутся на изготовлении конструкций и их монтаже.

§ 3. РЕАЛЬНОЕ СООРУЖЕНИЕ И ЕГО РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Проектирование любого сооружения начинают с *компоновки*, т. е. выбора рациональной конструктивной формы. Компонировка — основная и наиболее творческая часть проектирования. Она непосредственно зависит от условий функционального процесса, обеспечить который призвано проектируемое сооружение. Так, условия производственного процесса требуют определенных технологических габаритов для размещения станочного оборудования и пропуска грузовых потоков, что в свою очередь диктует генеральные размеры всего сооружения и его отдельных конструкций, которые должны располагаться вне этих габаритов. Выявление рациональной компоновки и решение отдельных конструкций производят в техническом проекте на основании сравнения возможных вариантов.

После выбора конструктивной формы сооружения приступают к его расчету. Расчет сооружения с учетом всех его свойств, точных геометрических размеров, строгого взаимодействия элементов является или теоретически невозможным, или практически неприемлемым по своей сложности. Поэтому необходимо произвести схематизацию сооружения и отбросить второстепенные факторы, которые не влияют сколько-нибудь заметным образом на достоверность и требуемую точность расчета.

Расчетной схемой сооружения (конструкции) называется упрощенная, идеализированная схема, которая отражает

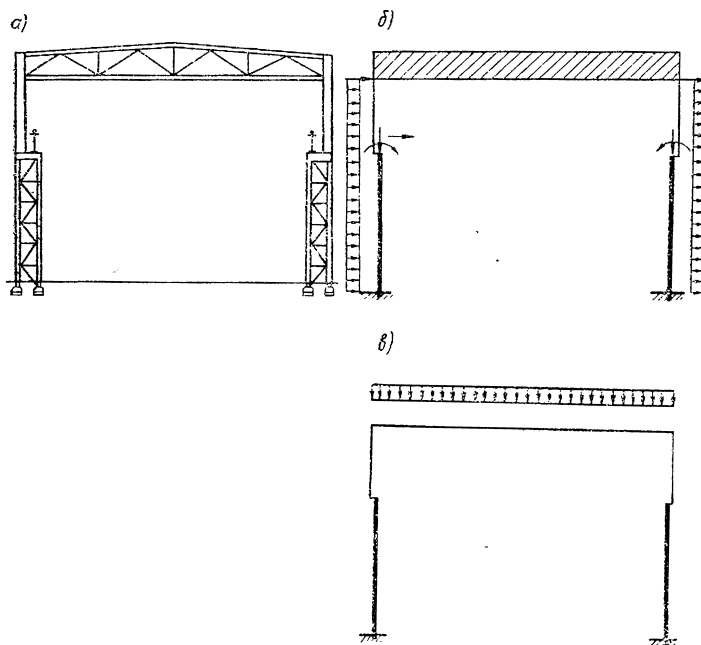


Рис. 1

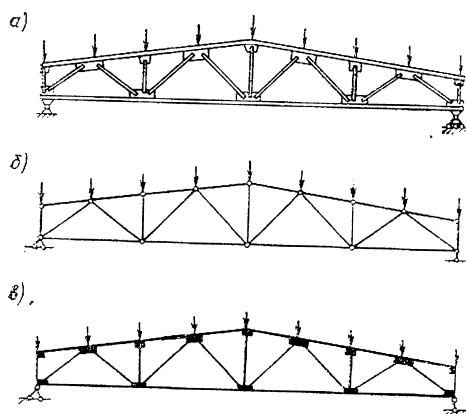


Рис. 2

наиболее существенные особенности реального сооружения (конструкции), определяющие его поведение под нагрузкой. Так, например, при расчете поперечной рамы производственного здания (рис. 1,а) на ветровую и крановые нагрузки учет упругих деформаций ригеля мало влияет на расчетные усилия в стойках. Это позволяет во многих случаях считать ригель бесконечно жестким (рис. 1,б). Подобное допущение значительно упрощает расчет рамы на указанные нагрузки методом перемещений: при бесконечно жестком ригеле углы поворота в узлах его сопряжения со стойками равны нулю и, таким образом, неизвестным является только горизонтальное смещение ригеля. В расчетной схеме стержневой конструкции стержни заменяют их продольными осями, реальные опорные устройства — идеальными опорными связями, а нагрузки с поверхности стержней переносят на оси.

Выбор расчетной схемы является сложной и ответственной частью расчета. От него в первую очередь зависит качество расчета. Расчет по неправильно выбранной расчетной схеме не может быть достоверным даже при использовании самых точных методов. Так, расчет упомянутой поперечной рамы на вертикальные нагрузки, приложенные к ригелю, по той же схеме, что и на горизонтальные нагрузки, привел бы к ошибке: бесконечно жесткий ригель передавал бы на стойки только осевую сжимающую нагрузку, что для их работы более благоприятно, поскольку в действительности стойки работают на сжатие с изгибом. В этом случае должна учитываться конечная, т. е. фактическая, жесткость ригеля, что приводит к иной расчетной схеме (рис. 1,в).

Таким образом, в зависимости от поставленной задачи расчетная схема может видоизменяться. Отказываясь от того или иного упрощения или заменяя его менее грубым, можно получить более точную расчетную схему. Например, ферму (рис. 2,а) обычно рассчитывают как шарнирно-стержневую систему, все элементы которой работают на осевое растяжение-сжатие (рис. 2,б). Такое допущение, при котором все узлы принимаются шарнирными, противоречит действительной конструкции фермы, но довольно точно отражает действительную работу ее элементов¹. Можно отказаться от гипотезы идеальной шарнирности узлов и считать взаимное соединение концов стержней абсолютно жестким (рис. 2,в). Это предположение также не соответствует действительности, хотя значительно меньше, чем

¹ Во второй половине XIX в. американская строительная техника встала на глубоко неверный путь приближения конструкции ферм к их расчетной схеме, заменив жесткие узлы болтовыми шарнирами. Такие фермы имели пониженную жесткость и требовали непрерывного наблюдения и ухода, поскольку их узлы постоянно расстраивались. Это один из примеров неправильного понимания взаимосвязи между конструкцией и ее расчетной схемой.

гипотеза шарнирности, однако оно значительно усложняет расчет.

Сравнивая результаты, полученные при использовании обеих расчетных схем, можно установить предел допустимости более простой схемы. Точные расчеты показывают, что расчетная схема фермы как шарнирно-стержневой системы становится тем менее приемлемой, чем больше жесткость стержней EJ/l , где J — осевой момент инерции поперечного сечения стержня, а l — его длина. При некотором значении этого отношения, когда ферма состоит из сравнительно коротких стержней мощного сечения, гипотеза шарнирности узлов становится чересчур грубой. Следовательно, для каждой расчетной схемы существует граница, за которой она становится неприемлемой.

Так как и сами рассчитываемые сооружения, и условия их работы разнообразны, определенных рецептов в области составления расчетных схем не существует. Конструктор принимает схему, соответствующую требованиям расчета, по своему усмотрению, и на его ответственности лежит решение вопроса о том, какие условия важны для проводимого расчета, а какие могут быть оставлены без внимания.

§ 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

После выбора расчетной схемы переходят непосредственно к расчету сооружения и его конструктивных элементов методами статики сооружений и сопротивления материалов. Назначение расчета — проверка прочности, жесткости и устойчивости сооружения по принятой расчетной схеме, позволяющая подобрать размеры поперечных сечений элементов сооружения и обеспечить надежность эксплуатации в сочетании с экономичностью.

В нашей стране с 1955 г. внедрена в практику методика расчета строительных конструкций *по предельным состояниям*, разработанная под руководством проф. Н. С. Стрелецкого¹. Предельное состояние не является состоянием разрушения конструкции. Оно характеризуется развитием таких напряжений или деформаций, которые препятствуют возведению или дальнейшей эксплуатации, и может наступить раньше разрушения. Таким образом, предельное состояние является предельным не с точки зрения исчерпания несущей способности конструкции, а с точки зрения потери ее эксплуатационной способности.

Если принять наибольшую нагрузку, которую может выдерживать конструкция, не разрушаясь, за предел несущей способнос-

¹ Н. С. Стрелецкий (1885—1967) — выдающийся советский ученый, возглавлявший в течение 50 лет отечественную конструкторскую школу металлостроительства.

ти, а нагрузку, при превышении которой прекращается эксплуатация, за предел эксплуатационной способности, то можно сказать, что *пределом несущей способности конструкции является наивысший предел ее эксплуатационной способности.*

Расчет металлических конструкций имеет целью не допустить наступления предельных состояний при эксплуатации в течение всего срока службы конструкции или сооружения, а также при их возведении; его производят по двум группам предельных состояний:

1) по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации;

2) по непригодности к *нормальной* эксплуатации¹ (по деформациям).

Предельные состояния первой группы характеризуются неравенством

$$N_{\text{макс}} \leq \Phi_{\text{мин}} \quad (I.1)$$

где $N_{\text{макс}}$ — наибольшее возможное за время эксплуатации усилие в рассматриваемом элементе конструкции от силовых воздействий² в самой невыгодной комбинации;

$\Phi_{\text{мин}}$ — наименьшее возможное предельное усилие, которое может воспринять элемент.

В главе СНиП [19] установлены нагрузки и воздействия, отвечающие условиям нормальной эксплуатации конструкции (сооружения) того или иного типа и называемые соответственно *нормативными* (см. § 5). Однако определение усилия N в неравенстве (I.1) производят не по нормативным, а по так называемым *расчетным* нагрузкам (воздействиям):

$$P = P^{\text{н}} n, \quad (I.2)$$

где P — расчетная нагрузка;

$P^{\text{н}}$ — нормативная нагрузка;

n — коэффициент перегрузки, учитывающий возможное отклонение фактической нагрузки в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от нормативного значения вследствие изменчивости нагрузки или отступлений от нормальной эксплуатации ($n \geq 1$).

Коэффициенты перегрузки зависят от вида нагрузки или воздействия и устанавливаются той же главой СНиП*. Значения коэффициентов n приведены в табл. 1 приложения 1.

Изменчивость расчетной несущей способности конструктивного элемента Φ зависит от изменчивости его геометрических размеров и сопротивления материала. Основным параметром

¹ Нормальной эксплуатацией считается постоянный процесс бесперебойной работы конструкции или сооружения, осуществляемый в соответствии с предусмотренными в нормах или заданиях на проектирование функциональными условиями.

² Под силовыми воздействиями понимают как непосредственные воздействия от нагрузок, так и воздействия от изменения температуры, смещения опор, усадки и других подобных явлений, вызывающих реактивные силы.

* Нормативные величины и коэффициенты n нагрузок, не регламентируемых указанной главой СНиП, устанавливаются другими нормативными документами, утвержденными или согласованными с Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам строительства (Госстроем СССР).

сопротивления материала силовым воздействиям является нормативное сопротивление R^n , устанавливаемое нормами проектирования строительных конструкций с учетом условий контроля и статистической изменчивости сопротивления.

За нормативное сопротивление растяжению, сжатию и изгибу прокатной стали и отливок из углеродистой стали, как правило, принимают наименьшее значение предела текучести (рис. 3,а), установленное соответствующими государственными стандартами (ГОСТ) или техническими условиями:

$$R^n = \sigma_{т. мин} \quad (1.3)$$

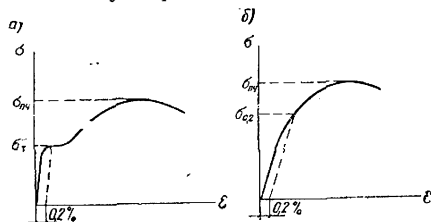


Рис. 3

Если эксплуатация конструкций, работающих на растяжение, возможна и после достижения сталью предела текучести (например, трубопроводы, цилиндрические емкости и другие конструкции, подвергающиеся внутреннему давлению), за нормативное сопротивление принимают наименьшее значение предела прочности на разрыв, установленное соответствующими ГОСТ или техническими условиями:

$$R^n = \sigma_{пч. мин} \quad (1.4)$$

То же справедливо для высокопрочной стальной проволоки, применяемой в виде пучков или прядей¹, и отливок из серого чугуна, которые не обладают свойством текучести.

За нормативное сопротивление растяжению, сжатию и изгибу деформируемых алюминиевых сплавов принимают меньшую из двух величин (рис. 3,б): а) $0,7 \sigma_{пч. мин}$; б) $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести (напряжение, соответствующее относительному остаточному удлинению $\epsilon = 0,2\%$).

Возможное отклонение сопротивлений материалов в неблагоприятную сторону от нормативных значений учитывают коэффициентом безопасности по материалу k :

$$R = R^n/k, \quad (1.5)$$

где R — сопротивление, принимаемое при расчете конструкций и называемое поэтому расчетным сопротивлением материала.

Численные значения коэффициента k устанавливаются нормами проектирования конструкций в зависимости от свойств материала, их изменчивости и ряда других факторов. В расчетах по несущей способности значения k принимают не менее 1.1.

¹ За нормативное сопротивление растяжению стальных канатов принимают разрывное усилие каната в целом, установленное ГОСТ или заводскими сертификатами.

Значения расчетных сопротивлений стали установлены в СНиП [21], алюминиевых сплавов — в [22]. Расчетные сопротивления прокатной стали приведены в табл. 2, алюминиевых сплавов — в табл. 3 приложения 1.

Особенности действительной работы материалов, элементов и соединений конструкций, а также конструкций и сооружений в целом, имеющие систематический характер, но не отражаемые в расчетах прямым путем, в необходимых случаях учитывают коэффициентом условий работы m . Значения этого коэффициента для элементов стальных и алюминиевых конструкций, установленные на основании экспериментальных и теоретических данных о действительной работе материалов, конструкций и сооружений в период эксплуатации и строительства, приведены соответственно в [21 и 22]. В большинстве случаев, при нормальных условиях работы, коэффициент $m=1$ и может быть опущен. Значения коэффициента m , отличные от единицы, приведены в табл. 4 и 5 приложения 1.

Степень ответственности и капитальности сооружений, недостаточную изученность действительной работы и предельных состояний конструкций, а также значимость последствий наступления тех или иных предельных состояний в необходимых случаях учитывают коэффициентом надежности k_n . Численные значения этого коэффициента для стальных и алюминиевых конструкций и сооружений устанавливают упомянутые выше главы СНиП и издаваемые в их развитие другие нормативные документы. Коэффициент k_n следует вводить в качестве делителя к значению предельной несущей способности, расчетного сопротивления, предельной деформации или в качестве множителя к значению расчетных нагрузок, воздействий и усилий.

Для удобства и упрощения расчетов коэффициенты m и k_n разрешается вводить в расчетное сопротивление материала. Тогда формула (1.5) принимает вид:

$$R = R^H / (m k_n). \quad (1.5a)$$

Таким образом, в методике расчета по предельным состояниям первой группы единый коэффициент запаса, характерный для известного из сопротивления материалов расчета по допускаемым напряжениям, заменяется четырьмя коэффициентами: n , k , m и k_n , каждый из которых обеспечивает величину запаса соответствующего параметра.

К предельным состояниям второй группы относятся состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкции или снижающие их долговечность вследствие появления недопустимых прогибов, углов поворота, колебаний, трещин. Эти предельные состояния характеризуются неравенством

$$\delta \leq \delta_{\text{пред}}, \quad (1.6)$$