

1. СВЯЗИ И СИЛЫ

1.1. Формирование системы взглядов на прочность сооружений (концепции¹ сил в строительной механике)

Качественная сторона понятий прочности, жесткости, устойчивости, долговечности общеизвестна из жизненного повседневного опыта. Нетрудно перенести ее и на «жизнь сооружений». Сохранение эксплуатационных качеств зданий и сооружений без разрушений называют прочностью; без потери начального положения и формы - жесткостью, устойчивостью; в течение длительного времени - долговечностью. Теория сооружений - строительная механика - вырабатывает методы оценки качественных характеристик количественными критериями. Чтобы создать методы количественных критериальных оценок прочности потребовалось ответить на многочисленные вопросы: что сравнивать, как определить сравниваемые величины, каков физический и математический смысл самих критериев и входящих в них характеристик. Решение этих проблем потребовало усилий многих поколений строителей, ученых, инженеров.

Долгое время только интуиция и опыт подсказывали архитектору - строителю размеры и формы жилищ, дворцов, мостов, дорог, плотин и других объектов. Строитель еще до возведения объекта должен был не только иметь представление об облике самого здания, но и предсказать размеры всех его деталей, в том числе и тех, которые «отвечают» за прочность сооружения. Проверить свои предсказания было возможно только на полностью возведенном или возводимом объекте. Как сказали бы сегодня, что проверка производилась в натуральных условиях. Дошедшие до нас свидетельства говорят о том, что строительство обычно поручалось людям опытным, обладавшим высоким профессиональным мастерством, богатым воображением и интуицией. Но, несмотря на это, здания разрушались как во время строительства, так и после его окончания. В связи с этим в древнем Вавилоне (19 - 6 в.в. до новой эры), например, существовал закон: «Если построенный архитектором дом развалится и при этом погибнет его владелец, архитектор подлежит смертной казни. Если при этом погибнет сын владельца дома, смертной казни подлежит сын архитектора». Немногие интуитивные догадки были удачными, но они поражают своим совершенством и сегодня.

Один из первых теоретиков архитектуры - римский архитектор и инженер второй половины 1 в. до новой эры - Витрувий (M.P. Vitruvius),

¹ Концепция (лат. *conceptio* - восприятие) - система взглядов на то или другое явление, способ понимания чего-либо, общий замысел.

автор трактата «Десять книг об архитектуре»², предлагал в отношении прочности полагаться на чувство пропорций. Красота внутренне тесно связана с прочностью. Воспитание чувства красоты и было основным стержнем в обучении архитектора. Чувство пропорциональности играет важную роль в назначении форм и размеров сооружений и дает возможность инженеру быстро оценить свои поиски. Известно высказывание знаменитого русского конструктора самолетов А.Н. Туполева (1888 - 1972): «Некрасивый самолет не полетит». При соответствующем усердии и накоплении опыта чувство пропорциональности приобретает, развивается и приносит неоценимую помощь инженеру, совершенствуя его интуицию и глазомер.

При отсутствии теории в объяснении прочности убедительными считались интуитивные доводы: «Я не вижу, как это может разрушиться». В эпоху Раннего Возрождения Леон Батиста Альберти (L.V. Alberti, 1404 - 1472) писал, например: «Полуциркулярная арка - самая крепкая из всех. Это само собой явствует, а также обнаруживается путем рассуждений 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 укрепитя поддержкой другого»³.

Великий мастер, художник, архитектор, инженер Леонардо да Винчи (Leonardo da Vinci, 1452-1519) не отрицал значения пропорциональных отношений в прочности (им предложено название одной из известных пропорций - «золотое сечение»⁴), но предлагал также использовать лишь такие элементы, которые опробованы на практике или специально испытаны. Он рекомендовал, например, провести серию опытов с балками разного поперечного сечения и установить зависимость разрушающей нагрузки от размеров балки. Его собственные опыты привели к выводу о том, что «во сколько раз длина одной балки меньше второй, во столько же раз больший груз способна она выдержать». В то же время он призывал к более точному количественному подходу: «Никакой достоверности нет в науках там, где нельзя применить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с математикой. Всякая практика должна быть воздвигнута из хорошей теории».

² Витрувий М.П. Десять книг об архитектуре. - М.: Изд-во. Акад. архитект., 1936.

³ Здесь и в дальнейшем цитаты взяты из книг: Бернштейн С.А. Избранные труды по строительной механике. - М.: Госстройиздат, 1961; Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. - М.: Госиздат технической - теоретической литературы, 1957.

⁴ Золотое сечение - гармоническое деление отрезка на две части таким образом, чтобы большая его часть относилась к меньшей так, как длина всего отрезка относится к большей части.

Специалисты считают родоначальником науки о прочности Галилео Галилея⁵ (G. Galilei, 1564-1642). В объяснении прочности тел он следовал



Рис. 1.1. Репродукция иллюстрации Г. Галилея к исследованию изгиба

учению Аристотеля (384-322 г. до новой эры) о том, что «природа не терпит пустоты». Галилей считал, что если какие-либо причины стремятся раздвинуть частицы тела, то оно сопротивляется этому потому, что «боится пустоты». Он видел внутри тел сопротивление, которое уравнивает внешнюю тяжесть и препятствует разрушению.

Он писал, например: «Ясно, что если защемленный в стену призматический брус (рис.1.1) подвергается излому, то излом произойдет по ребру

В сечения в защемлении, играющем роль оси рычага **BC**, к концу **C** которого приложен груз; высота **BA** сечения в защемлении представляет другое плечо, вдоль которого распределяется сопротивление. Это сопротивление препятствует отделению части бруса, лежащей вне стены, от части, лежащей внутри ее. Из сказанного следует, что величина силы, приложенной к концу консоли, относится к величине сопротивления, обусловленного высотой **BA** призмы, то есть сцеплением основания с примыкающими к нему частями бруса, точно так же, как половина высоты **BA** относится к длине **BC**» (или иначе пара внешних сил уравнивается парой внутренних усилий сопротивления с плечом, равным половине высоты).

Решающее влияние на науку вообще и науку о прочности, в частности, оказала величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе трудов Исаака Ньютона (I. Newton, 1643 - 1727).

Согласно Ньютону весь мир состоит из «твердых, весомых, непроницаемых частиц». Эти «первичные частицы абсолютно тверды - они неизмеримо более тверды, чем тела, которые они составляют; настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются

⁵ Галилей Г.. Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению // Соч., т.1. - М.; Л.: Госиздат технической и теоретической литературы, 1934.

вдребезги». Центральная идея законов Ньютона заключается в том, что изменение состояния тел вызывается взаимным действием их друг на друга. Количественной мерой взаимодействия тел и частиц за счет наличия связей между ними Ньютон считал механическую силу.

Инструмент для измерения и сравнения величин сил дал Закон Гука (Роберт Гук - R. Hook, 1635 - 1703): «закон для всякого упругого тела состоит в том, что его способность восстанавливать свое естественное состояние всегда пропорциональна той мере, на которую оно выведено из своего естественного состояния», или «каково удлинение, такова и сила» (*ut tensio sic vis*). С помощью упругого тела (пружины) стало возможным определять не только величину тяжести, но измерять и сравнивать силы любой природы.

Со времен Ньютона существовало убеждение в том, что свойства упругости, открытые Гуком, могут быть объяснены силами притяжения и отталкивания между частицами тел. Ружеф Иосин Бошкович (R. I. Boshkovch, 1711-1787), например, ввел предположение, что между двумя неразрушимыми мельчайшими частицами по соединяющей их прямой действуют силы, обнаруживающие себя как притяжение при определенных расстояниях между ними и как отталкивание - при других значениях этого расстояния. Причем существует расстояние равновесия, при котором эти силы исчезают. Эти предположения послужили основой молекулярной теории упругого тела.

Труды Луи Мари Анри Навье (L.M.A.Navier, 1785-1836) ознаменовали новый этап в науке о прочности. Навье впервые указал на важность знания тех предельных сил, до которых сооружение ведет себя как упругое тело, не получая остаточных деформаций, и именно этот предел предложил считать опасным для прочности сооружений. Он связал предел упругости, значительно меньший предела прочности, с проблемой оценки прочности. Идеи Навье были настолько плодотворны, что до настоящего времени они не потеряли своей актуальности.

Мы проследили основные этапы создания теоретической модели, названной концепцией сил. В доведении ее до практического использования потребовались значительные дополнительные усилия ученых, инженеров, педагогов, упомянуть которых здесь нет возможности. В результате к концу XIX в. сложился мощный, оправдавший себя на практике теоретический аппарат прогнозирования прочности, построенный на концепции сил. Существуют также концепции без использования понятий связей и сил⁶, но они развиты чрезвычайно слабо.

1.2. Основы концепции сил в оценке прочности

⁶ Григорьев В.И., Мякишев Г.Я. Силы в природе. - М.: Наука, 1978.

Оценка любого качества состоит в сравнении двух состояний: заданного (реального) и эталонного (идеального). *Критерием приемлемости заданного качества является превышение или эквивалентность его эталонному качеству.* В теории сооружений критерии сохранения эксплуатационных качеств сооружений (прочности, жесткости, устойчивости, долговечности), которые в дальнейшем для краткости будем называть **критериями прочности**, построены на сравнении характеристик двух состояний. Одна из них количественно выражает наихудшее состояние сооружения при всех возможных ситуациях его эксплуатации (работы), то есть является характеристикой «рабочего состояния». Вторая по смыслу должна точно соответствовать первой величине, но выразить эталонное - «предельное состояние», при переходе через которое возможна полная или частичная потеря эксплуатационных качеств сооружения.

Наглядные количественные характеристики этих двух состояний, имеющие определенный и ясный физический смысл, позволяет ввести концепция сил. Она построена на идеализации материала (вещества), из которого выполнены сооружения и среда, в которой они эксплуатируются. Предполагается, что они состоят из совокупности абсолютно неразрушимых плотно прилегающих друг к другу частиц - **материальных точек**⁷ (объектов), соединенных между собой **механическими связями**. Механические связи отличаются от любых других связей тем, что через них осуществляется взаимодействие материальных точек, количественно измеряемое особой физической величиной - **силой**⁸ (напряжением). Эти связи могут изменять свою длину (по этому изменению, применяя закон Гука - инструмент для измерения сил, можно судить и о силах, возникающих в них) и при напряжениях в одной или в группе связей больше предельных, или удлинении связи больше допустимых, разрушаться (разрываться).

Те связи, разрыв которых приводит к разрушению сооружения, называют *внутренними*. Это связи внутри самого сооружения - в его элементах (между отдельными частичками, линиями, сечениями) и в соединениях. В рабочем состоянии они разрушаться не должны, а чтобы

⁷ Материальная точка - тело, размеры которого малы или не существенны в рассматриваемой задаче. Всякое тело можно мысленно разбить на столь большое число частей, чтобы размеры каждой из них были пренебрежимо малы по сравнению с размерами тела.

⁸ Сила - отвлеченное понятие общего свойства вещества, тел, ничего не объясняющее, а собирающее все явления под одно общее понятие (Даль В. Толковый словарь. - М.: Русский яз., 1982).

сооружение сохраняло форму и возвращалось к ней после вынужденного отклонения, они не должны терять и упругих свойств. Эти и другие условия сохранения свойств внутренних связей должны отражать критерии прочности.

Удлинения и силы (напряжения) во внутренних связях зависят от воздействий среды (массы самого сооружения, массы людей, машин, оборудования, снега, действия ветра, движения основания при землетрясениях и взрывах и др.). Воздействия изменяют длину связей между сооружением и средой и могут быть представлены силами (напряжениями) в этих внешних по отношению к сооружению связях. Такие силы называют *нагрузкой*. На прочности сооружения разрушение внешних связей не отражается, но перед самым их разрушением в них возникают максимальные усилия, а следовательно, и внутренние связи будут максимально напряжены. Для внутренних связей, «отвечающих» за прочность сооружения, такое состояние будет наиболее опасным (наихудшим).

Следовательно, неравенство

$$R_{\text{рабочее}} \leq R_{\text{предельное}} , \quad (1.1)$$

в левой части которого находится количественная характеристика связей рабочего состояния, а в правой - соответствующая их характеристика в предельном состоянии, является критерием сохранения эксплуатационных качеств сооружений или критерием прочности (рис.1.2). Отметим, что в неравенстве (1.1) сравниваются одинаковые по всем параметрам величины. Если, например, в левой части его находятся рабочие напряжения, то в правой части должны быть тоже напряжения предельного состояния, отличающиеся только интенсивностью. Если в левой части - удлинение, то и в правой должно быть тоже удлинение, но предельное.

Такие величины, как напряжения в связях, их удлинение, характеризуют каждую связь в отдельности, поэтому их принято называть *дифференциальными* (частными). В практике оценки прочности используются и характеристики совокупности связей, такие как: усилия, являющиеся суммой напряжений; перемещения, зависящие от удлинения связей во всем сооружении; величины повреждений, выражающие отношение количества разрушенных связей к общему их количеству и целый ряд других подобных характеристик. Такие характеристики называют *интегральными* (суммарными).

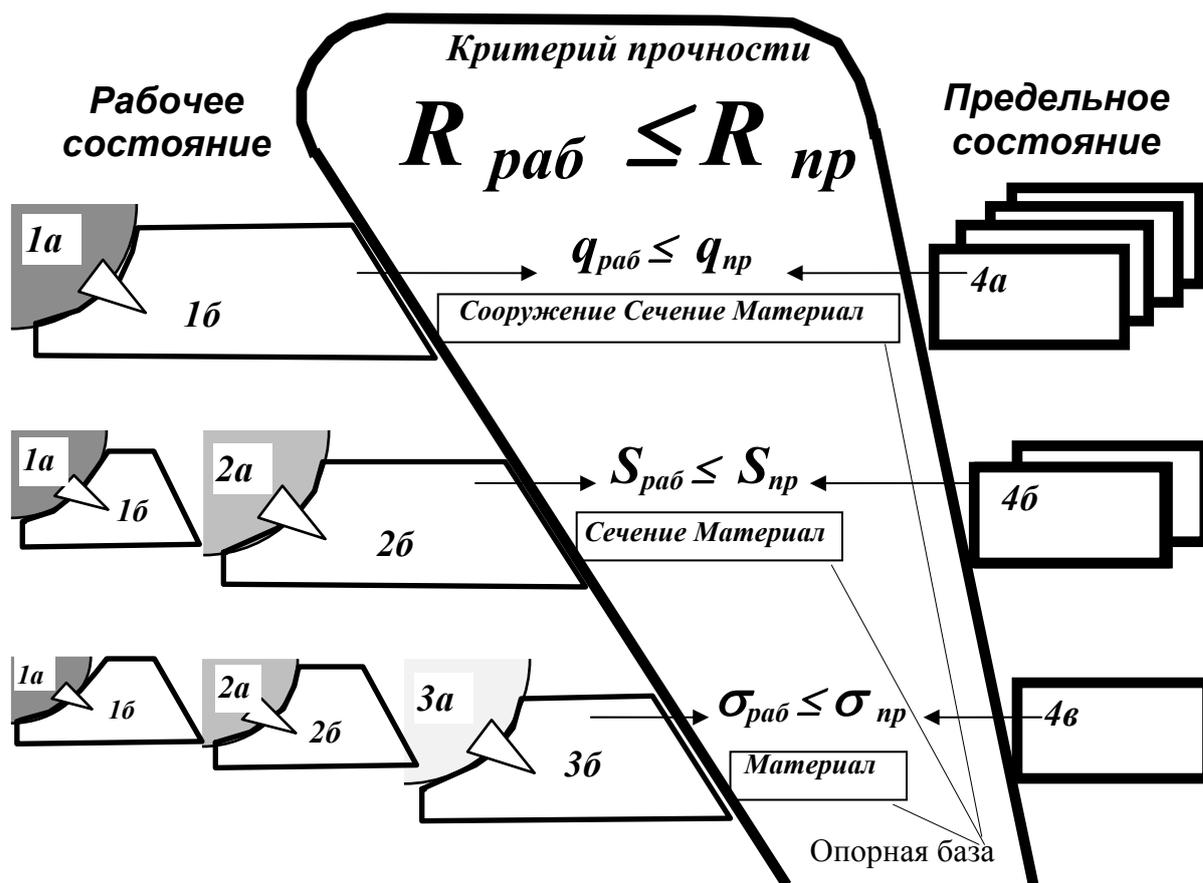


Рис. 1.2. Схема оценки прочности по нагрузке (q), усилиям (S) и напряжениям (σ):
 1а, 2а, 3а - исходная информация к расчету соответственно нагрузки, усилий и напряжений; 1б, 2б, 3б - блок вычислений соответствующих сил;
 4а, 4б, 4в - банк предельных нагрузок, усилий и напряжений соответственно

Представления, выработанные в концепции сил, могут ответить не только на вопрос о том, какие величины сравнивать, но и позволяют разработать аппарат их получения. Так как взаимодействие связывается с силами (тяжестью, грузом), то в теорию сооружений для определения напряжения в связях включаются теоретические положения механики, привлекаются математика, физика и другие науки, изучающие взаимодействия тел, работу связей и природу сил.

Наиболее распространенная схема расчета по получению характеристик рабочего состояния (будем называть ее классической) включает два основных этапа (рис. 1.2):

- вычисление сил взаимодействия, передаваемых внешними связями, то есть нагрузки (внешних сил);

- вычисление через нагрузку усилий (напряжений) во внутренних связях самого сооружения (внутренних сил).

В большинстве строительных конструкций (нитях, вантах, мембранах, тентах, стержневых системах, плитах, оболочках) второй этап расчета обычно выполняется в два приема. Вначале вычисляются интегральные характеристики напряжений в связях - усилия, а затем через полученные усилия - сами напряжения.

Возможны отклонения от классической схемы расчета как по содержанию основных этапов, так и по их количеству. Нагрузка в ряде случаев, например, при действии температуры, осадки опор, неточности изготовления деталей, не определяется, а сразу находятся внутренние усилия и напряжения.

В соответствии с классической схемой расчета в теории сооружений разрабатываются: методы определения усилий во внешних связях - нагрузки, составляющие *проблему внешних сил*, и методы определения усилий во внутренних связях несущих элементов, входящие в *проблему внутренних сил*. Эти проблемы дополняются методами получения характеристик предельного состояния, которые составляют *проблему оценки прочности и долговечности*, или *проблему предельных сил*.

Вопросы определения сил во внешних связях и принципы их разработки, составляющие *проблему внешних сил*, сложны тем, что решаются в условиях предельного состояния среды (когда связи с сооружением разрушаются, именно в этом случае возникают опасные для «жизни сооружений» внешние силы). Поэтому они решаются при относительно грубых и жестких допущениях в отношении качества связей сооружения и среды и внутренних связей в самой среде в предельном состоянии. Когда среда сохраняется, то ввиду того, что принципиальная разница между усилиями во внешних и внутренних связях отсутствует, при решении проблемы внешних сил используются методы определения внутренних усилий.

В теории сооружений самое полное решение имеет проблема внутренних сил. Вначале основным математическим аппаратом для определения внутренних усилий являлись условия равновесия, затем к ним добавились физические (зависимость между усилиями и деформациями, например, закон Гука) и геометрические (зависимость между перемещениями и деформациями) соотношения. Применяемый в настоящее время математический аппарат дает возможность в значительной степени алгоритмизировать процесс получения внутренних усилий и применять механизированный счет. Современный набор программных средств позволяет решать самые сложные практические задачи.

Характеристики предельного состояния являются результатом специально поставленных экспериментов с реальными материалами и объектами. Они являются также результатом обобщений многолетних наблюдений за работой конкретных сооружений, и только в частных случаях - результатом теоретических исследований, рассматриваемых теорией разрушений. Эти характеристики постепенно накапливаются, проверяются и уточняются. В настоящее время имеется значительный набор таких характеристик, которые составляют банк данных (банк характеристик или базу данных) предельного состояния (рис. 1.2).

1.3. Основные практические задачи теории сооружений

Оценка возможности сохранения эксплуатационных качеств сооружений (оценка прочности) выполняется путем сравнения дифференциальных или интегральных характеристик связей (см. неравенство (1.1) и рис.1.2). Выбор сравниваемых величин в каждом конкретном случае определяется требованиями решаемой задачи, полнотой имеющегося в распоряжении расчетчика банка характеристик предельного состояния (см. правую часть рис. 1.2) и в немалой степени квалификацией и опытом расчетчика. Рассмотрим использование таких характеристик, как нагрузка, усилия, напряжения. Выбор их в нашем случае определен классической схемой получения характеристик рабочего состояния и тем, что на практике они очень часто используются. Что нужно сделать, чтобы получить сравниваемые характеристики в рабочем и предельном состояниях, какую необходимо иметь исходную информацию; что является основанием для сравнения (*опорной базой*); какие практические задачи решаются на основе критериев прочности - вот круг вопросов, который обычно возникает при практическом приложении критериев прочности. В настоящем разделе мы постараемся на них ответить кратко, а в дальнейшем осветим подробнее.

1.3.1. Вычисление характеристик рабочего состояния

Для определения внешних сил (нагрузок) рабочего состояния используются заданные параметры сооружения (внешние его размеры, форма поверхности), параметры воздействий и качества связей среды с сооружением и внутри самой среды. Проблема внешних сил по этим данным решает вопросы, где располагается нагрузка, как она распределена, какие по величине силы передаются на сооружение.

Внутренние усилия (изгибающие и крутящие моменты, поперечные, продольные и сдвигающие силы) рабочего состояния находятся через вычисленную нагрузку и заданные геометрические

размеры элементов сооружения (конфигурация осей стержней, форма срединной поверхности плит и оболочек), характеристики их соединений и опораний, жесткостные параметры элементов.

Величины напряжений рабочего состояния в связях между отдельными частицами, заполняющими все детали сооружения, определяются через вычисленные значения внутренних усилий. Они зависят также от заданных форм и размеров сечений отдельных элементов, физико-механических свойств материала.

В левой части предлагаемой схемы (см. рис.1.2) показан путь получения рабочих характеристик. На ней видно, что чем детальнее характеристика, тем больший объем вычислений и, соответственно, большая исходная информация требуются для ее получения.

1.3.2. Характеристики предельного состояния. Опорная база

Банк предельных характеристик при сравнении по нагрузке должен включать предельные нагрузки (вид, интенсивность, возможные сочетания) для каждой конкретной конструкции. Конструкция должна быть полностью описана. Для нее должны быть заданы все параметры: материал, размеры, конфигурация, соединения, сечения и даже способ изготовления.

Банк внутренних предельных усилий содержит предельные усилия для элемента заданного сечения (толщины). Конфигурация, нагрузка, положение этого элемента в сооружении на значения предельных усилий не влияют. Это дает возможность сократить объем банка данных по сравнению с банком данных по нагрузке.

Банк предельных напряжений включает напряжения (нормальные или касательные) в связях между твердыми материальными частицами тел, расположенных по нормали и в плоскости сечения (площадки). Предельные напряжения зависят только от свойств материала, определяющего качество внутренних связей. Составление банка упрощается не только за счет уменьшения его объема, но и за счет упрощения экспериментов, которые необходимо провести для их получения.

Объем банка предельных характеристик по мере детализации сравниваемых параметров уменьшается (см. правую часть рис.1.2). Причем снижается минимальное количество входных параметров возможного сравнения, которые мы назовем опорной базой. Опорная база - это совокупность геометрических и физико-механических параметров сооружения (конструкции, детали, узла), прочность которого проверяется. Опорной базой для сравнения по нагрузке выступает множество параметров, которые разобьем на три группы с условными названиями:

сооружение (сюда входит полное его описание); сечения (их форма и геометрические характеристики); материал (его физико-механические свойства). При сравнении нагрузок в качестве опорной базы выступают все три группы параметров, при сравнении усилий - только две последние, а при сравнении напряжений - одна (материал) (см. среднюю часть рис. 1.2).

1.3.3. Практические задачи теории сооружений

Проверка прочности по нагрузке дает ответ только на вопрос о возможности (или невозможности) эксплуатации заданного сооружения в заданной среде, но не показывает, как и где может произойти разрушение, какие места сооружения наиболее слабы.

При сравнении по усилиям можно найти опасные сечения, установить, что влияет на величины усилий в этих сечениях и во многих случаях, изучив поведение сооружения при изменении его параметров, найти пути изменения усилий и их распределения, то есть определить способы управления (регулирования) работой конструкции.

Сравнение напряжений позволяет изучить зависимость поведения сооружения не только от внешней нагрузки и внешних связей, но и от формы и размеров сечения, его ориентации в пространстве. Кроме того, это сравнение во многих случаях может служить основой для составления банка предельных характеристик по нагрузке и усилиям.

На основе критериев прочности решается целый ряд важнейших практических задач. Если задано, например, сооружение и воздействие среды, задан материал с известными прочностными характеристиками, то оценить прочность сооружения можно, по выполнению (или невыполнению) критерия (1.1). Если критерий выполняется, то сооружение прочное, если нет - применение этого сооружения опасно.

Можно решить задачи по определению параметров опорной базы. Например, задачу о размерах несущих элементов: задана схема сооружения, воздействие, материал; необходимо найти размеры элементов (поперечное сечение, толщину). При этом определяются нагрузка, возможные внутренние усилия и, исходя из критерия прочности, размеры элементов. Или задачу по определению воздействия, в которой возможна эксплуатация заданного сооружения, и целый ряд других практических задач.