

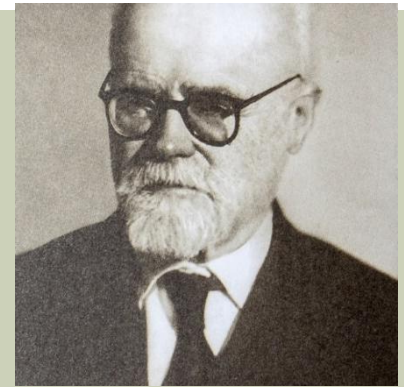
ОСНОВЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Лекция 3.2

ПОНЯТИЕ О ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

В истории развития методов расчета строительных конструкций отмечены два основных подхода: **расчет по прочности (стадия разрушения)** и **расчет по рабочему состоянию (стадия нормальной эксплуатации)**. Оба подхода одинаково важны и их следует рассматривать совместно, только так можно правильно запроектировать здание или сооружение. Вместе с тем в настоящее время изменилась и трактовка самого понятия **предельного состояния**. Ранее этот термин означал только разрушение конструкции. Теперь же пришли к выводу, что наступление предельного состояния - это **не только разрушение**. Возможны и другие случаи выхода конструкции из строя. Предельное состояние может быть связано как с разрушением конструкции, так и с ее местными повреждениями или с недопустимыми **перемещениями**.

Как только была осмыслена бесплодность выбора между указанными выше двумя подходами, сразу же появилась идея, получившая наименование расчета по предельным состояниям. Этот расчет включает в себя оба предшествующих подхода и представляет дальнейшее развитие теории расчета. Один из основоположников методики расчета по предельным состояниям **Н. С. Стрелецкий** дал такое определение предельному состоянию: «Предельным является такое состояние конструкции (сооружения), при котором ее эксплуатация должна быть прекращена»,
В настоящее время его формулируют следующим образом: «**Предельное состояние конструкции - такое состояние, при достижении которого конструкция перестает удовлетворять требованиям, предъявляемым к ней в процессе эксплуатации или введения (изготовления)**».



**СТРЕЛЕЦКИЙ Николай
Станиславович
(1885-1967)**

ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Основные документы, регламентирующие требования к расчету строительных конструкций:

- Федеральный закон № 185-ФЗ от 02.07.2013 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»
- ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»
- СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Основные понятия, используемые при расчете строительных конструкций:

- **Строительный объект:** Строительное сооружение, здание, помещение, строительная конструкция, строительное изделие или основание
- **Сооружение:** Результат строительства, представляющий собой объемную, плоскостную или линейную строительную систему, имеющую наземную, надземную и (или) подземную части, состоящую из несущих, а в отдельных случаях, и ограждающих строительных конструкций и предназначенную для выполнения производственных процессов различного вида, хранения продукции, временного пребывания людей, перемещения людей и грузов

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Здание:** Результат строительства, представляющий собой объемную строительную систему, имеющую надземную и (или) подземную части, включающую в себя помещения, сети инженерно-технического обеспечения и системы инженерно-технического обеспечения и предназначенную для проживания и (или) деятельности людей, размещения производства, хранения продукции или содержания животных
- **Строительная конструкция:** Часть здания или сооружения, выполняющая определенные несущие, ограждающие и (или) эстетические функции

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Основание здания или сооружения** (далее также - основание): Массив грунта, воспринимающий нагрузки и воздействия от здания или сооружения и передающий на здание или сооружение воздействия от природных и техногенных процессов, происходящих в массиве грунта
- **Конструктивная система:** Совокупность взаимосвязанных строительных конструкций и основания

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Надежность строительного объекта:** Способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации
- **Отказ:** Состояние строительного объекта, при котором не выполняются одно или несколько условий предельных состояний
- **Предельное состояние строительных конструкций:** Состояние строительных конструкций здания или сооружения, за пределами которого дальнейшая эксплуатация здания или сооружения опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния здания или сооружения невозможно или нецелесообразно

ОСНОВНЫЕ
ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА
ПРЕДЕЛЬНЫХ
СОСТОЯНИЙ

СУТЬ МЕТОДА

Метод расчетных предельных состояний был введен в нашей стране в качестве руководящего принципа расчета строительных конструкций с 1 января 1955 года. В дальнейшем расчет по предельным состояниям завоевал широкое признание во всем мире, и в настоящее время он положен в основу стандарта ИСО-2394 и системы Еврокодов, где получил название «метод частных коэффициентов надежности». Два названия – «метод предельных состояний» и «метод частных коэффициентов надежности» – отражают наиболее существенные стороны метода.

СУТЬ МЕТОДА

■ Используемый в настоящее время вариант методики расчета по предельным состояниям требует выполнения проверок, представляемых в виде неравенства:

$$g(F_d, R_d, A_d, C, \gamma_n, \gamma_d) \geq 0,$$

где: g – некоторая функция параметров системы, такая, что $g < 0$ означает реализацию запредельного состояния.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Нормальная эксплуатация:** Эксплуатация строительного объекта в соответствии с условиями, предусмотренными в строительных нормах или задании на проектирование, включая соответствующее техническое обслуживание, капитальный ремонт и реконструкцию
- **Несущая способность:** Максимальный эффект воздействия, реализуемый в строительном объекте без превышения предельных состояний
- **Уровень ответственности:** Характеристика здания или сооружения, определяемая в соответствии с объемом экономических, социальных и экологических последствий его разрушения

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Нагрузка:** Механическая сила, прилагаемая к строительным конструкциям и (или) основанию здания или сооружения и определяющая их напряженно-деформированное состояние
- **Воздействия:** Изменение температуры, влияние на строительный объект окружающей среды, действие ветра, осадка оснований, смещение опор, деградация свойств материалов во времени и другие эффекты, вызывающие изменение напряженно-деформированного состояния строительных конструкций

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Нормативные характеристики физических свойств материалов:** Значения физико-механических характеристик материалов, устанавливаемые в нормативных документах или технических условиях и контролируемые при их изготовлении, при строительстве и эксплуатации строительного объекта
- **Коэффициенты надежности:** Коэффициенты, учитывающие возможные неблагоприятные отклонения значений нагрузок, характеристик материалов и расчетной схемы строительного объекта от реальных условий его эксплуатации, а также уровень ответственности строительных объектов

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Расчетная схема (модель):** Модель конструктивной системы, используемая при проведении расчетов
- **Расчетная ситуация:** Учитываемый в расчете комплекс возможных условий, определяющих расчетные требования к строительным конструкциям, системам инженерно-технического обеспечения и частям указанных конструкций и систем

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Обеспеченность:** Вероятность благоприятной реализации значения переменной случайной величины. Например, для нагрузок "обеспеченность" - вероятность непревышения заданного значения; для характеристик материалов "обеспеченность" - вероятность значений, меньших или равных заданным
- **Результат (эффект) воздействия:** Реакция (внутренние усилия, напряжения, перемещения, деформации) строительных конструкций на внешние воздействия

ГРУППЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

- **Первая группа** предельных состояний - состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной расчетной ситуации
- **Вторая группа** предельных состояний - состояния, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация строительных конструкций, исчерпывается ресурс их долговечности или нарушаются условия комфортности
- **Особые предельные состояния** - состояния, возникающие при особых воздействиях и ситуациях, и превышение которых приводит к разрушению сооружений с катастрофическими последствиями

ПЕРВОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

- *К первой группе* предельных состояний следует относить:
 - разрушение любого характера (например, пластическое, хрупкое, усталостное);
 - потерю устойчивости отдельных конструктивных элементов или сооружения в целом.

Первая группа наиболее опасна – она определяется непригодностью конструкции к эксплуатации, *потерей несущей способности*. Этого не происходит, пока нормальные σ или касательные τ напряжения в конструкциях не превосходят расчетных (минимальных) сопротивлений материалов, из которых они изготовлены. Это условие записывается общей формулой:

$$\sigma, \tau \leq R$$

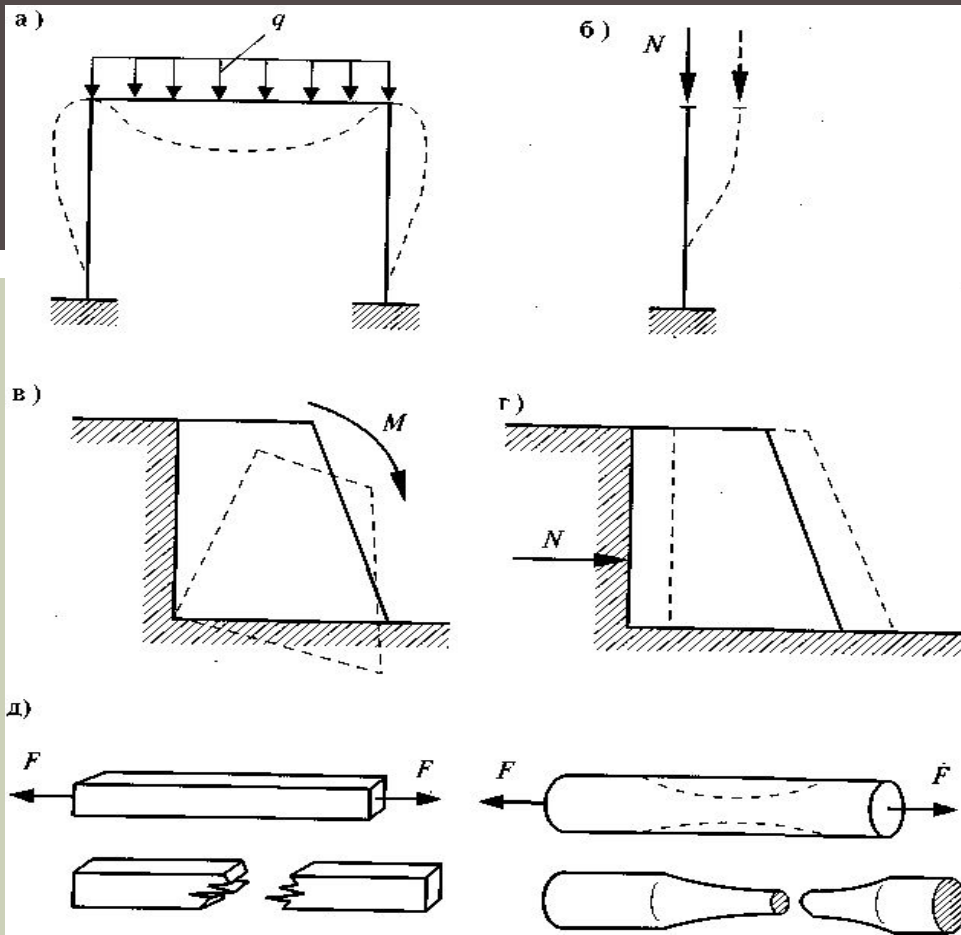


Рис. Предельные состояния первой группы:

а), б) потеря общей устойчивости; в), г) потеря устойчивости положения;

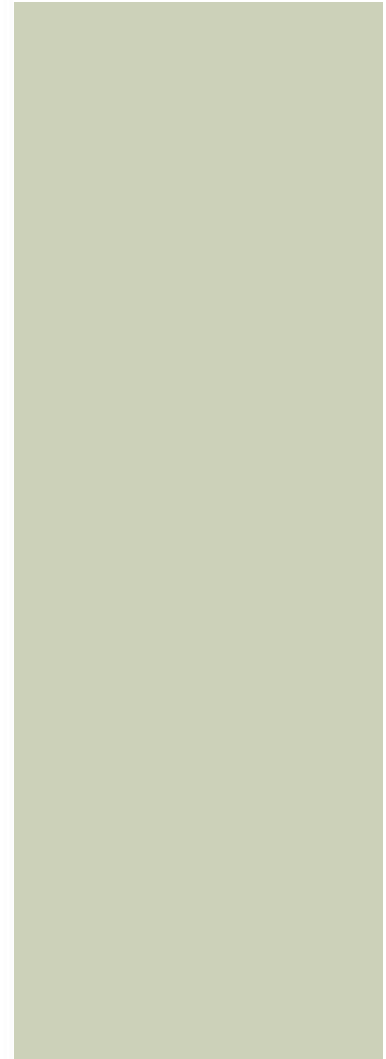
д) хрупкое, вязкое или иного характера разрушение

Наступление того или иного предельного состояния зависит от следующих **основных факторов**:

- величины внешних нагрузок и воздействий,
- механических характеристик материалов,
- условий работы конструкций и материалов.

ПЕРВАЯ ГРУППА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Потеря устойчивости



ВТОРОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

Ко *второй группе* предельных состояний следует относить:

- достижение предельных деформаций конструкций (например, предельных прогибов, углов поворота) или предельных деформаций оснований, устанавливаемых исходя из технологических, конструктивных или эстетико-психологических требований;
- достижение предельных уровней колебаний конструкций или оснований, нарушающих нормальную работу оборудования или вызывающих вредные для здоровья людей физиологические воздействия;
- образование трещин, не нарушающих нормальную эксплуатацию строительного объекта;
- достижение предельной ширины раскрытия трещин.

ВТОРОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

■ Вторая группа менее опасна – она определяется непригодностью конструкции к *нормальной эксплуатации*. Этого не происходит, пока относительный прогиб (как главная характеристика работоспособности конструкции по второй группе предельных состояний) f/l не превышает предельно допускаемых значений. Это условие записывается общей формулой:

$$f/l \leq [f/l]$$

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТЫ
ПО ПЕРВОЙ ГРУППЕ
ПРЕДЕЛЬНЫХ
СОСТОЯНИЙ

ПОНЯТИЕ О НАПРЯЖЕНИЯХ

Между частицами тела существуют связи, соединяющие части тела и обеспечивающие его целостность. В ненагруженном теле эти связи себя не проявляют. Приложенные **внешние силы** пытаются **нарушить эти связи**, а **материал сопротивляется** этому, в результате чего внутри тела возникают **внутренние силы**.

Внутренние силы увеличиваются с увеличением внешней нагрузки. При достижении внутренними силами достаточно большой величины (для каждого материала – своей), связи начинают рваться и тело разрушается.

Чтобы оценить прочность тела, надо научиться определять величину внутренних сил. Делается это с помощью **метода сечений**.

ПОНЯТИЕ О НАПРЯЖЕНИЯХ

С помощью сечения тело рассекается на две части. Одна часть тела отбрасывается, а действие отброшенной части заменяется внутренними силами. Поскольку внутренние силы связывают между собой частицы одной части тела (оставшейся) и другой (отброшенной), то очевидно, что они распределены по всему сечению и, как правило, неравномерно (в разных точках сечения они различны по величине и направлению). Чтобы охарактеризовать закон распределения внутренних сил по сечению, вводится **числовая мера**. За такую меру принимается интенсивность внутренних сил или **напряжение в точке тела**.

ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Внутренние силы, действующие в поперечном сечении элемента и распределенные по нему, могут быть двух видов. В первом случае сила представляет собой единственный вектор, а действие силы имеет **линейное направление**. Если просуммировать все линейные силы, то получится **главный вектор**.

Во втором случае сила представляет собой пару противоположно направленных векторов, расположенных на некотором удалении друг от друга, а действие силы имеет **угловое направление**. Если просуммировать все угловые силы, то получится **главный момент**.

ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

■ Если сориентировать конструктивный элемент в пространстве, то главный вектор R и главный момент M можно разложить на проекции по координатным осям. Ось Z совмещается с осью элемента, а оси X и Y располагаются в плоскости поперечного сечения элемента. В результате такого разложения можно получить шесть составляющих: три силы (N, Q_x, Q_y) и три момента (M_z, M_x, M_y). Эти составляющие называются **внутренними силовыми факторами** или **внутренними усилиями** в сечении элемента.

ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

- Каждая составляющая имеет свое название:
 - N – **продольная (нормальная) сила**, проекция главного вектора на ось Z
 - Q_x, Q_y – **поперечные (перерезывающие) силы**, проекции главного вектора на оси X, Y
 - M_z – **крутящий момент**, проекция главного момента на ось ось Z
 - M_x, M_y – **изгибающие моменты**, проекции главного момента на оси X, Y

Внутренние усилия являются равнодействующими напряжений.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

■ Напряженно-деформированное состояние элемента зависит не только от внешней нагрузки (а соответственно – от внутренних усилий в его сечении), но и от формы и размеров его поперечного сечения. Эту зависимость можно учесть, вводя *геометрические характеристики поперечного сечения*. Все необходимые для расчетов геометрические характеристики можно выразить через площадь всей фигуры A и элемент площади dA , вырезанный вокруг производной точки с координатами x, y .

■ **Статические моменты:**

$$S_x = \int_A y dA, S_y = \int_A x dA$$

Размерность статических моментов – м^3 .

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

■ **Осевые моменты инерции:**

$$I_x = \int_A y^2 dA, \quad I_y = \int_A x^2 dA$$

Размерность осевых моментов инерции – м⁴.

■ **Осевые моменты сопротивления:**

$$W_x = \frac{I_x}{|y_{max}|}, \quad W_y = \frac{I_y}{|x_{max}|}$$

Здесь $|y_{max}|$, $|x_{max}|$ – расстояния от осей X, Y до наиболее удаленных точек сечения.

Размерность осевых моментов сопротивления – м³.

■ **Осевые радиусы инерции:**

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}, \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

Размерность радиусов инерции – м.

ПРОЧНОСТЬ ПО НОРМАЛЬНЫМ И КАСАТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

В зависимости от того, какая из составляющих вызывает напряжение, *нормальные напряжения* могут определены одним из способов:

■ $\sigma = \frac{N}{A}$ – нормальное напряжение от действия продольной силы

■ $\sigma = \frac{M}{W}$ – нормальное напряжение от действия изгибающего момента

Касательные напряжения вызываются только поперечными силами, в общем виде определяются по формуле Журавского:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot b}$$

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТА

■ Если продольная сила вызывает в сечении элемента напряжение сжатия, то при достаточно большой длине элемента он может потерять несущую способность, не достигнув предельных значений сопротивления материала. Произойдет *потеря устойчивости* элемента. А величина разрушающего напряжения уменьшится:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A}$$

Здесь φ – коэффициент продольного изгиба.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТЫ
ПО ВТОРОЙ ГРУППЕ
ПРЕДЕЛЬНЫХ
СОСТОЯНИЙ

ФАКТИЧЕСКИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПРОГИБ

■ Общий вид условия обеспечения жесткости:

$$f/l \leq [f/l]$$

Величина деформации конструкции (в том числе, *относительный прогиб*) зависит от многих факторов:

- *действующей нагрузки* (в ее нормативном значении, поскольку вторая группа ПС менее требовательна к конструкциям);
- *пролета конструкции* (в значительной степени);
- жесткости конструкции, которая включает в себя *модуль упругости E* как деформативную характеристику материала и *осевой момент инерции сечения Y* как геометрическую характеристику сечения.

Формула, выражающая зависимость относительного прогиба от перечисленных выше факторов, зависит от *расчетной схемы* конструкции. Например, для однопролетной балки на двух шарнирных опорах, загруженной равномерно распределенной нагрузкой, зависимость выглядит следующим образом:

ДОПУСТИМЫЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПРОГИБ

К предельным деформациям конструкции (перемещение, угол поворота) относятся: прогиб – для изгибаемых элементов, укорочение или удлинение стержней – для стержневых систем, величина осадки – для оснований. Предельные прогибы можно определять по СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» в соответствии с требованиями Приложения Е. Например, для балок, ригелей и прогонов покрытий и перекрытий, открытых для обзора, при пролете конструкций, равном 3 м, предельный прогиб равен:

$$f_u = \frac{l}{150}$$

Для того, чтобы определить допустимое значение относительного прогиба, необходимо обе части равенства отнести к пролету:

$$\left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{250}$$