

УДК 69.07 + 624.01

## ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЁТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*А.А. Могильников, Е.А. Казакова*

Приведены методы расчёта строительных конструкций в порядке их появления. Рассмотрены новые методы расчёта строительных конструкций. Сделаны выводы о подходе к оценке безопасности строительного объекта по риску аварии.

Ключевые слова: методы расчетов, расчет строительных конструкций, вероятностный метод.

Задача расчета безопасности строительных конструкций в рамках существующей методологии имеет три аспекта: **статический, геометрический и физический.**

**Статическая** сторона задачи заключается в установлении связи между внешними нагрузками, действующими на конструкцию, и внутренними усилиями в любом ее сечении, которая определяется условиями статического равновесия. Поскольку внутренние усилия заранее неизвестны, приходится привлекать геометрические и физические соотношения. **Геометрические** соотношения связывают между собой перемещения и деформации конструкции. **Физические** соотношения определяют закон, по которому напряжения зависят от деформаций.

Особенность расчетов строительных конструкций на безопасность заключается в необходимости учета изменчивости внешних воздействий и разброса прочностных характеристик материала. Внешние воздействия здесь понимаются в широком смысле. Это могут быть силовые воздействия технологического и атмосферного происхождения, химическое воздействие, температурное воздействие, смещения опор и т.д. В зависимости от способа учета изменчивости указанных параметров развивались методы расчета строительных конструкций.

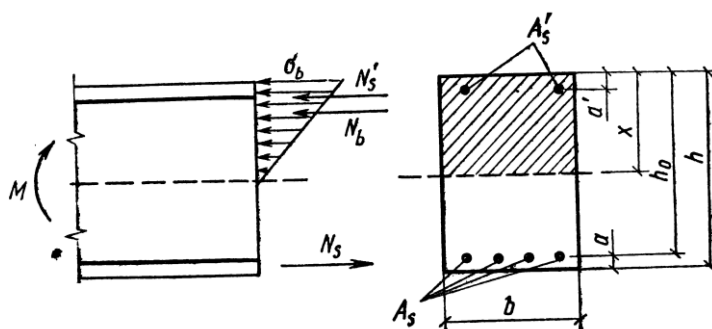
Метод допускаемых напряжений. Допускаемое напряжение – это пороговое значение напряжения, которое считается предельно приемлемым при вычислении размеров поперечного сечения элемента, рассчитываемого на заданную нагрузку.

В основу расчетных зависимостей была взята 2 стадия напряженно-деформированного состояния и приняты следующие допущения: бетон растянутой зоны не работает, растягивающее напряжение воспринимается арматурой; зависимость между напряжениями и деформациями – линейная согласно закону Гука, бетон сжатой зоны работает упруго; нормальные к продольной оси сечения, плоские до изгиба остаются плоскими после изгиба (гипотеза плоских сечений).

Исходя из всего этого, в бетоне принимается треугольная эпюра напряжений и постоянное отношение модулей упругости материалов  $\alpha = E_s/E_b$ . Рассматривают приведённое однородное сечение, в котором площадь сечения растянутой арматуры  $A_s$  заменяют площадью сечения бетона, равной  $\alpha \cdot A_s$ , а площадь сечения сжатой арматуры  $A'_s$  – площадью сечения бетона  $\alpha \cdot A'_s$ . Исходя из равенства бетона и арматуры:

$$\varepsilon_s = \sigma_s/E_s = \varepsilon_b = \sigma_b/E_b, \quad (1)$$

а также используя отношение  $\alpha$ , устанавливают зависимость между напряжениями в арматуре и бетоне  $\sigma_s = \alpha \cdot \sigma_b$ .



где  $h_0 = h - a$  — рабочая (полезная) высота сечения;  $h$  — полная высота сечения;  $a$  — расстояние от оси, нормальной к плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечения растянутой арматуры, до внешнего растянутого края сечения,  $a'$  — расстояние от оси, нормальной к плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечений сжатой арматуры, до внешнего сжатого края сечения.

Рис. 1. К расчёту балки прямоугольного сечения по допускаемым напряжениям

Главный недостаток метода по допускаемым напряжениям заключается в том, что бетон рассматривается как упругий материал. Действительное же распределение напряжений в бетоне по сечению в стадии 2 не отвечает треугольной эпюре напряжений

Особенно ярко проявились недостатки метода по допускаемым напряжениям при внедрении в практику новых видов бетона (тяжелых бетонов высоких классов и легких бетонов на пористых заполнителях) и арматурных сталей высокой прочности. Это побудило советских учёных к выполнению специальных исследований и разработке метода расчёта, который лучше отвечал бы упругопластическим свойствам железобетона [1].

Метод расчета по разрушающим нагрузкам в нормы расчета железобетонных конструкций (далее – ЖБК) еще в 1938 г. трудами таких советских ученых, как А.Ф. Лолейт и А.А. Гвоздев. С тех пор нормы стали значительно лучше отвечать упругопластическим свойствам железобетона. Данный метод исходит из напряженно-деформированного состояния бруса при

изгибе. Работа бетона растянутой зоны не учитывается. В расчётные формулы вместо допускаемых напряжений вводятся предел прочности бетона при сжатии и предел текучести арматуры. Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны вначале принималась криволинейной, а затем была принята прямоугольной. Усилие, допускаемое при эксплуатации конструкции, определяется делением разрушающего усилия на общий коэффициент запаса прочности  $k$ . Для изгибаемых и сжатых элементов:

$$M = \frac{M_u}{k}, \quad N = \frac{N_u}{k}. \quad (2)$$

При определении усилий элементов, разрушение которых начинается в растянутой зоне, вместо гипотезы плоских сечений, применен принцип пластического разрушения, согласно которому и в арматуре, и в бетоне напряжения достигают предельных значений одновременно.

На основании принципа пластических разрушений, впервые обоснованного А.Ф. Лолейтом, были получены расчетные формулы разрушающих усилий изгибаемых и центрально-загруженных элементов. Для изгибаемого элемента любой симметричной формы сечения высоту сжатой зоны определяют из уравнения равновесия внутренних усилий в стадии разрушения:

$$R_u A_b + R_s A_s' = R_s A_s, \quad (3)$$

где  $R_u$  – временное сопротивление бетона сжатию при изгибе, которое принималось равным  $1,25 R_b$ ;  $R_s$  – предел текучести арматуры;  $A_b$  – площадь бетона сжатой зоны сечения.

Разрушающий момент определяют как момент внутренних усилий относительно оси, проходящей через центр тяжести растянутой арматуры:

$$M_u = R_u S_b + R_s A_s' (h_0 - a'), \quad (4)$$

где  $S_b = A_b z_b$  – статический момент площади бетона сжатой зоны относительно оси, проходящей через центр тяжести растянутой арматуры;  $z_b$  – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до центра тяжести площади бетона сжатой зоны.

Граница между случаем 1 и случаем 2 устанавливается на основе опытных данных: при  $S_b/S_o \leq 0,8$  – случай 1, где  $S_o$  – статический момент всей рабочей площади бетона относительно оси, проходящей через центр тяжести растянутой арматуры. Для прямоугольных и тавровых сечений с полкой в сжатой зоне граничное значение высоты сжатой зоны  $x = 0,55h_0$ .

В расчетных формулах участвует единый запас прочности  $k$ . Он был установлен нормами в зависимости от причины разрушения конструкции, сочетания силовых воздействий и отношения усилий  $T_v$  от временных нагрузок к усилиям  $T_g$  от постоянных нагрузок. В случае преобладания временной нагрузки перегрузка конструкции более вероятна и коэффициент запаса должен быть больше [1].

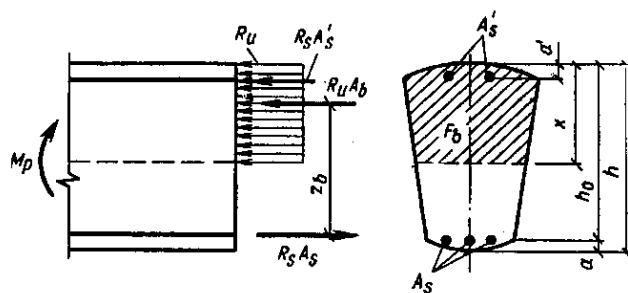


Рис. 2. К расчету ЖБК методом разрушающих нагрузок

Расчет строительных конструкций по предельным состояниям основан на исследованиях профессора Н.С. Стрелецкого и введен строительными нормами и правилами в 1955 году. В Российской Федерации сейчас он является пока основным методом расчета строительных конструкций на безопасность.

Предельными считаются состояния, при которых конструкции перестают удовлетворять предъявляемым к ним в процессе эксплуатации требованиям, т.е. если они теряют способность сопротивляться внешним нагрузкам и воздействиям или получают недопустимые перемещения, в т.ч. местного характера. Первая группа предельных состояний включает:

- потерю несущей способности;
- полную непригодность конструкции к эксплуатации вследствие потери устойчивости, разрушения материала, превращения конструкции в геометрически изменяемую систему элементов (механизм), качественное изменение конфигурации, чрезмерное развитие пластических деформаций.

Расчетные формулы для подбора сечений и проверки несущей способности конструкций по первому предельному состоянию получаются из основного неравенства:

$$N \leq S, \quad (5)$$

где  $N$  – предельное наибольшее усилие в конструкции, вызываемое внешними воздействиями;  $S$  – предельная наименьшая несущая способность конструкции, зависящая от прочности материала, размеров поперечного сечения и условий ее работы.

Окончательно неравенство первого предельного состояния (5) может быть записано в следующем виде:

$$N = \gamma_n \sum_{i=1}^m F_{ni} \cdot \gamma_{fi} \cdot \psi_i \cdot \alpha_i \leq \frac{A \cdot R_n \cdot \gamma_c}{\gamma_n} = S,$$

где  $A$  – геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (площадь, момент сопротивления и т.д.).

Второе предельное состояние ограничивает максимальные перемещения конструкций в условиях нормальной эксплуатации, т.е. перемещения определяются от нормативных нагрузок. Неравенство второго предельного состояния имеет вид:

$$\gamma_n \sum_{i=1}^m F_{ni} \cdot \gamma_{fi} \cdot \psi_i \cdot \delta_i \leq \Delta,$$

где  $\delta_i$  – число влияния, т.е. перемещение конструкции от единичного воздействия;

$\Delta$  – предельная величина перемещения, определяющая возможность нормальной эксплуатации, устанавливается нормами, либо проектным заданием [2].

Вероятностный метод расчета безопасности строительных конструкций. В данном методе наиболее важные параметры (нагрузки, сопротивление материала, геометрические характеристики и т.п.) являются случайными величинами и представляются статистическими законами их распределения. По этим законам можно вычислить их статистические характеристики: среднее значение, дисперсию, стандарт и др.

Для решения задачи используется основное неравенство, гарантирующее заданную обеспеченность  $\omega$  превышения несущей способности  $S$  над усилием  $N$  в элементе от внешних нагрузок:

$$P(N \leq S) \geq \omega, \quad (6)$$

где  $P$  – знак вероятности, а усилие  $N$  и несущая способность  $S$  не являются детерминированными величинами, как в методике предельных состояний, а представляются их статистическими законами распределения.

Из всех рассмотренных выше методов, вероятностный метод является наиболее совершенным. Приведем основные сведения из теории вероятности и математической статистики.

При конечном числе интервалов, на которые разбивается диапазон случайной величины  $X$ , результаты измерения могут быть представлены гистограммой (рис. 3).

На ней  $x_i$  – интервал случайной величины;  $n_i$  – число попаданий случайной величины в интервал  $x_i$ ;  $N$  – число испытаний.

Теорема сложения вероятностей. Вероятность суммы несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий. Следствия этой теоремы:

1. Если события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна 1.
2. Если события  $A$  и  $B$  противоположны, то сумма их вероятностей равна 1.
3. В случае, когда события  $A$  и  $B$  совместны, вероятность суммы этих событий определится формулой  $P(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB)$ .

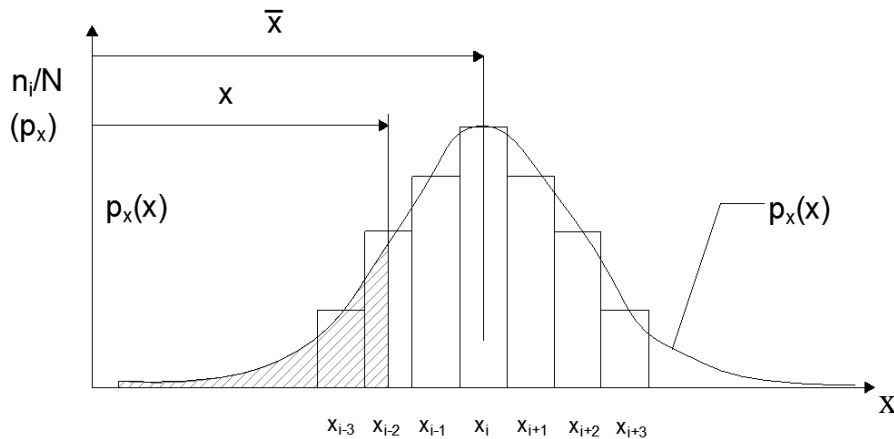


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности вероятностей

Теорема умножения вероятностей. Вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие имели место. При двух событиях  $P(AB)=P(A)P(B/A)$ . Если события  $A$  и  $B$  независимые, то  $P(AB)=P(A)P(B)$ .

Центральная предельная теорема. Плотность распределения случайной величины  $\eta=\xi_1+\xi_2+\dots+\xi_N$  приближается к нормальной плотности при  $N\rightarrow\infty$ .

Подход к оценке безопасности строительного объекта по риску аварии. Значимость Федерального закона № 184 «О техническом регулировании» заключается в том, что он в хозяйственную жизнь страны, в том числе и в строительство, ввел понятие «риск». В нашем случае – это риск аварии. Возникает естественный вопрос: какова связь риска аварии с прочностью, жесткостью и устойчивостью конструкций строительных объектов? Как мы видим, риск аварии напрямую связан с коэффициентом запаса, т.е. насколько близка приложенная нагрузка к предельному значению, которое может выдержать конструкция. Поэтому подход к созданию и расчету строительных конструкций с позиций методов теории риска в принципе возможен, и это, по сути, новый подход к созданию строительных объектов. Принципиальные возможности для их создания следующие:

1. В России существует богатый опыт создания строительных объектов различного конструктивного типа и вместе с этим имеется достаточный перечень случившихся в стране строительных аварий. Опыт и упомянутый перечень аварий (уроков) позволяет не только создавать конструктивные схемы новых строительных объектов, но и назначать для элементов этих схем вполне достоверные геометрические параметры

2. Нужна методика оценки риска аварии строительного объекта и нормативная база этого риска. То и другое имеется в этой монографии. Роль

нормативной базы, например, может играть модель деградации несущего каркаса строительного объекта; модель деградации по величине фактического риска аварии строительного объекта позволяет оценить его конструкционный износ и безопасный ресурс.

3. Чтобы отрегулировать физическое состояние созданного без традиционных расчетов строительного объекта достаточно осуществить процедуру менеджмента риска аварии его несущего каркаса. Она также представлена в данной монографии.

**Заключение.** Таким образом, накопленный в России опыт и методики оценки риска аварии – это основа для создания новых, без использования традиционных методов расчета, строительных объектов.

**Примечание.** Чтобы обеспечить безопасность строительного объекта, необходимо, прежде всего, произвести процедуру оценки безопасности для первоначального состояния его несущих конструкций. Она производится на основе норматива на величину риска аварии, и только после этого следует приступить к обеспечению безопасности объекта в целом, включая в процедуру обеспечения безопасности другие конструкции: ограждающие или имеющие декоративный характер.

#### Библиографический список

1. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: учебник / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991. – С. 81–85.
2. Москалёв, Н.С. Металлические конструкции: учебник / Н.С. Москалёв, Я.А. Пронозин. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – С. 54–58.

[К содержанию](#)