

**А.С. Залесов**

**Расчет железобетонных  
конструкций по прочности,  
трещиностойкости и  
деформациям**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 528  
ББК 38.2  
А11

A11      **А.С. Залесов**  
Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А.С. Залесов – М.: Книга по Требованию, 2012. – 320 с.

**ISBN 978-5-458-36020-3**

В книге обобщен материал по расчету железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. Даны рекомендации по расчету. Основное внимание удалено раскрытию физического смысла основных методов расчета, а также объяснению практических методов расчета.

**ISBN 978-5-458-36020-3**

© 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, кляксы, 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.



биями, поэтому в книге опущены многие вспомогательные материалы (графики, таблицы, примеры расчета и т. п.). Книга не может заменить эти пособия при расчете конструкций, но она, полагаем, поможет лучше их освоить.

Предисловие, гл. 2 и 5 написаны канд. техн. наук Э. Н. Кодышем, пп. 3.2.10, 3.2.12, 3.2.13, 3.2.15, 3.3.4—3.3.6 и 3.4.2 гл. 3—И. К. Никитиным, остальные пункты гл. 3, пп. 1.1 и 1.3 гл. 1 и п. 4.2.3 гл. 4 — д-ром техн. наук А. С. Залесовым, гл. 4 (кроме п. 4.2.3) и п. 1.2 гл. 1 — канд. техн. наук Л. Л. Лемышем.

## ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

В соответствии с Государственным стандартом СССР СТ СЭВ 1052—78 значения физических величин в этой книге, так же как и в СНиП 2.03.01—84 и пособиях, даны в Международной системе единиц СИ. В частности, силы в этой системе принимаются в ньютонах (Н) или килоилютонах (кН), где  $1\text{ Н} = 0,102\text{ кгс}$ , сопротивления, напряжения, модули упругости и т. п. — мегапаскалях (МПа), где  $1\text{ МПа} = 10,2\text{ кгс}/\text{см}^2$ . Поскольку  $1\text{ МПа} = \text{Н}/\text{мм}^2$ , при использовании в какой-либо формуле величины в МПа остальные величины в этой формуле рекомендуется принимать в Н и мм ( $\text{мм}^2$ ).

Для облегчения пользования материалом в переходный период в таблицах СНиП 2.03.01—84 нормативные и расчетные сопротивления материалов приведены как в МПа, так и в кгс/ $\text{м}^2$ .

Одновременно с введением в СНиП 2.03.01—84 новой системы единиц измерения СИ в нем была использована новая система буквенных обозначений. Эта система была принята в Государственном стандарте СССР СТ СЭВ 1565—79 «Нормативно-техническая документация в строительстве. Буквенные обозначения», разработанном на основе стандарта № 3898 «Обозначения и основные символы» Международной организации стандартизации (ИСО). Этот стандарт введен в действие с января 1984 г. Особенность этой системы состоит в том, что в соответствии с ГОСТ для индексов используются буквы латинского алфавита, а соответствующие индексам слова, как правило, взяты из английского языка. Обозначение состоит из одного знака и одного или нескольких индексов. Основной знак может изображаться прописной буквой или строчной буквой латинского алфавита. Все безразмерные величины обозначаются греческими буквами. Индексы используются буквенные или цифровые. Буквенные индексы обозначают, как правило, сокращенное английское слово-термин и бывают одно-, двух- и трехбуквенные. Цифровой индекс обозначается арабскими цифрами. Двух- и трехбуквенные индексы отделяют от однобуквенных запятой. Далее приведены применяемые индексы и соответствующие им русские слова.

Прописными латинскими буквами обозначаются не содержащиеся в стандарте показатели качества бетона: класс по прочности на сжатие В (франц. béton) и марки по средней плотности D (англ. density), морозостойкости F (англ. frost), водонепроницаемости W (англ. water), а также ряд характеристик и усилий.

#### Однобуквенные индексы

- d* — случайный (accidental)
- b* — бетон, сжатый бетон (béton, франц.)
- c* — сжатие (compressing)
- f* — полка балки (flange)
- f* — нагрузка, сила (force)
- l* — длительный (long)
- l* — левый (left)
- m* — средний (moment)
- m* — момент (moment)
- m* — главный (main)
- n* — нормативный (normative)
- n* — продольная (нормативная) сила (normal)
- p* — усилие обжатия, предварительное напряжение (prestress)
- R* — расчетное сопротивление
- r* — правый (right)
- r* — ядерная точка (расположенная на расстоянии *r* от центра тяжести)
- s* — сталь, арматура (steel)
- t* — растяжение (tension)
- t* — кручение (torsion)
- u* — предельный (ultimate)
- w* — ребро или стенка балки (web)

#### Двух- и трехбуквенные индексы

- an* — анкеровка (anchoring)
- cr* — критический (critical)
- crc* — трещинообразование (cracking), трещина (crack)
- el* — упругий (elastic)
- ext* — внешний, наружный (external)
- inc* — наклонный, отогнутый (inclined)
- int* — внутренний (internal)
- ov* — свес полки (overhang)
- pl* — пластичный, неупругий (plastic)
- red* — приведенный (reduced)
- ser* — эксплуатационный (service)
- sh* — кратковременный (short)
- sup* — опора (support)
- tot* — суммарный, полный (total)
- web* — ребро или стенка балки

# **Глава 1**

## **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

### **1.1. Группы и виды предельных состояний**

При расчете железобетонных конструкций рассматриваются две группы предельных состояний: первая группа — по несущей способности и вторая группа — по пригодности к нормальной эксплуатации. Расчеты по предельным состояниям первой группы включают в себя: расчет по прочности, обеспечивающий конструкции от разрушения; расчет на устойчивость, обеспечивающий устойчивость формы или положения конструкций. Расчеты по предельным состояниям второй группы включают в себя: расчет по образованию, раскрытию и закрытию трещин для предотвращения недопустимого образования трещин или их раскрытия в конструкции; расчет по деформациям для предотвращения недопустимых перемещений конструкции (прогибов, углов поворота, углов перекоса, колебаний).

Наиболее важной и ответственной является первая группа предельных состояний, поскольку она предопределяет само существование конструкции. Как уже указывалось, для этой группы выполняются два основных вида расчета — расчет по прочности и расчет на устойчивость. При расчете конструкций по прочности усилия от расчетных значений нагрузки не должны превышать усилий, которые могут быть восприняты сечениями железобетонных элементов при расчетных сопротивлениях материалов (бетона и арматуры) с учетом соответствующих коэффициентов условий работы. При расчете конструкций на устойчивость формы расчетное значение нагрузки не должно превышать значения одноковой по схеме распределения нагрузки, вызывающей достижение данного вида предельного состояния и деленной на коэффициент, больший единицы. Этим обеспечивается запас при расчете на устойчивость не меньший, чем при расчете на прочность.

При расчете конструкций на устойчивость положения отношение расчетных значений нагрузок и вычисленных по ним усилий, благоприятных с точки зрения

устойчивости положения конструкций к нагрузкам или усилиям, неблагоприятных с той же точки зрения, должно быть больше единицы. Предельные значения указанного отношения принимаются в зависимости от точности предпосылок расчета и ответственности конструкций.

Важным элементом в системе расчета железобетонных конструкций является расчет по второй группе предельных состояний. Эта группа включает в себя две основные подгруппы предельных состояний — проверку трещиностойкости железобетонных конструкций и проверку их перемещений (деформаций).

Образование и раскрытие трещин представляет опасность для нормальной эксплуатации конструкций: в определенных условиях возникает коррозия арматуры, ухудшается внешний вид элементов, они становятся более проницаемыми под давлением жидкостей или газов. В зависимости от назначения и условий эксплуатации устанавливаются различные требования к трещиностойкости конструкций, которые должны обеспечиваться расчетом по образованию, закрытию и раскрытию трещин.

Необходимость ограничения деформаций связана с рядом причин: отрицательным психологическим воздействием на людей больших видимых прогибов, неприятными ощущениями людей при колебании конструкций, нарушением условий для нормальной эксплуатации технологического оборудования и возможным повреждением смежных конструкций при деформациях элементов и др. С учетом условий работы и назначения конструкций устанавливаются предельные значения деформаций, которые должны обеспечиваться расчетом.

## 1.2. Основные положения по расчету железобетонных элементов

При расчете железобетонных элементов по предельным состояниям в первую очередь вычисляются усилия от внешней нагрузки (изгибающие и крутящие моменты, продольные и поперечные силы), действующие в сечениях элемента. Далее определяются внутренние предельные силы, которые может воспринять элемент в рассматриваемых сечениях исходя из его прочности и трещинообразования, которые сравниваются с соответствующими усилиями от внешней нагрузки. Кроме того, по усилиям от внешней нагрузки находятся шири-

ца раскрытия трещин и деформации железобетонного элемента, которые также сравниваются с их предельно допустимыми значениями.

Первая часть задачи — определение усилий в сечениях элементов, решается на основе статического расчета конструкции в целом. Для статически определимых железобетонных конструкций нахождение усилий в сечениях от внешней нагрузки не вызывает затруднений, они вычисляются из равновесия всех сил, действующих по одну сторону от рассматриваемого сечения.

Вычисление усилий в статически неопределеных конструкциях (рамах, неразрезных балках и др.) необходимо производить, как правило, с учетом действительных жесткостей, т. е. влияния трещин и неупругих деформаций бетона и арматуры, а также с учетом влияния искривления геометрических осей сжатых элементов на усилия в них (расчет по деформированной схеме). Для конструкций, методика расчета которых с учетом неупругих свойств железобетона еще не разработана, допускается вычисление усилий производить как для сплошного упругого тела. Расчеты статически неопределенных конструкций рекомендуется производить с использованием ЭВМ, современных математических методов расчета, например метода конечных элементов. Для упрощения расчетов могут использоваться достаточно обоснованные приближенные методы.

При определении усилий, действующих в сечениях железобетонных элементов, инженер должен также считаться с возможными отклонениями этих усилий от значений, получаемых из статического расчета. Наиболее реальными и существенными являются отклонения эксцентрикитета продольной силы, вызванные случайными причинами, которые не могут быть оценены расчетом. К ним относятся: неоднородность свойств бетона по сечению; начальное искривление сжатого элемента или его отклонение от вертикали; неучтенные горизонтальные силы и др.

Для учета этих отклонений в расчет вводится величина так называемого случайного эксцентрикитета, которая принимается большей из двух величин —  $1/600$  длины сжатого элемента или расстояния между сечениями, закрепленными от смещения и  $1/30$  высоты сечения элемента. Кроме того, для конструкций, образуемых из сборных элементов, следует учитывать возможное

взаимное смещение элементов при возведении здания, зависящее от вида конструкций, способа монтажа и т. п. При отсутствии соответствующих данных в пособии к СНиП рекомендуется случайный эксцентрикитет принимать не менее 1 см. Для статически определимых конструкций случайный эксцентрикитет суммируется с эксцентрикитетом, полученным из статического расчета. Что же касается элементов статически неопределеных конструкций, то здесь расчетный эксцентрикитет принимается как наибольшее значение эксцентрикитетов из статического расчета и случайного. Менее жесткое отношение к случайному эксцентрикитету в статически неопределеных конструкциях объясняется тем, что наличие связей сжатых элементов с другими элементами конструкции смягчает влияние случайного эксцентрикитета.

Наиболее существенное влияние случайный эксцентрикитет оказывает в том случае, когда эксцентрикитет, получаемый из статического расчета, мал или равен нулю. В результате введения случайного эксцентрикитета все сжатые элементы, по существу, рассматриваются и рассчитываются как внецентренно сжатые, и такое понятие, как центрально-сжатые элементы, исключается.

В общем случае наряду с внешними усилиями при расчете конструкций необходимо учитывать усилия от вынужденных деформаций, например от температурных воздействий. С этим вопросом связано определение длин температурных блоков, при которых можно не учитывать усилия от температурных воздействий. В Пособии к СНиП 2.03.01—84 приведены расстояния между температурно-усадочными швами, которые в ряде случаев существенно превышают значения, ранее принятые в СНиП II-21-75.

Опыт эксплуатации зданий и сооружений свидетельствует, что длины блоков по СНиП II-21-75 во многих случаях были приняты с неоправданно большим запасом. Наблюдения за зданиями, в которых эти длины превышали рекомендации указанных норм (в том числе и в случаях, когда швы были пропущены по невнимательности строителей или проектировщиков), показали в основном нормальные эксплуатационные качества этих зданий. В то же время расчеты, в которых усилия в колоннах определялись в предположении их упругой работы, не подтверждали принятые в СНиП II-21-75 рас-

стояния между температурно-усадочными швами. Как показал анализ, основные причины этого несоответствия следующие: 1) в связи с неупругой работой железобетона, особенно в стадии, близкой к разрушению, жесткости колонн существенно ниже вычисленных как для сплошного упругого тела; соответственно и ниже усилия, возникающие в колоннах при их перемещениях от температурных деформаций перекрытий (покрытий); 2) при длительных температурных воздействиях (длительных смещениях) усилия в колоннах снижаются, релаксируют; 3) вследствие податливости узлов сопряжения сборных элементов общие удлинения (укорочения) дисков перекрытия (покрытия) меньше обычно принимаемых в расчете.

Учет этих факторов и позволил обосновать расчетом приемлемость рекомендаций СНиП II-21-75 по длинам температурных блоков для колонн с гибкостью  $l/h=9$  при расчетном температурном перепаде  $\Delta t=40^{\circ}\text{C}$ . Для более гибких колонн ( $l/h>9$ ) и при меньшем температурном перепаде ( $\Delta t<40^{\circ}\text{C}$ ) длины температурных блоков могут быть увеличены. Для этого в указанном Пособии приведены соответствующие поправочные коэффициенты. Если длина температурно-усадочного блока не превышает допускаемого Пособием значения, то усилия в колоннах и элементах перекрытия (покрытия) допускается определять без учета температурно-усадочных воздействий. Но при необходимости длины блоков могут быть еще больше увеличены; при этом потребуется расчет указанных конструкций на совместное действие внешних нагрузок и вынужденных деформаций с учетом приведенных выше факторов.

### 1.3. Нагрузки и воздействия

Расчетные значения нагрузок, используемые для первой и второй групп предельных состояний, определяются по их нормативным значениям с учетом коэффициентов надежности по нагрузкам и коэффициентов сочетаний нагрузок. Кроме того, в расчет вводятся коэффициенты надежности по назначению конструкций, учитывающие степень ответственности и капитальности зданий и сооружений, которые принимаются равными или меньшими единицы (табл. 1.1).

При расчете элементов сборных конструкций на воз-

Таблица 1.1

Класс ответственности зданий и сооружений	Коэффициент надежности по назначению
I. Основные здания и сооружения объектов, имеющих особо важное и (или) социальное значение (корпуса ТЭС, АЭС, телевизионные башни, конструкции ЛЭП, конструкции магистральных трубопроводов, спортивные сооружения, театры и т. п.)	1
II. Здания и сооружения объектов, имеющих важное народнохозяйственное и (или) социальное значение (объекты промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского строительства)	0,95
III. Здания и сооружения, имеющие ограниченное народнохозяйственное и (или) социальное значение (склады, теплицы, одноэтажные жилые дома, временные здания и сооружения)	0,9

действия усилий, возникающих при их подъеме, транспортировании, монтаже, нагрузку от веса элемента следует вводить в расчет с коэффициентом динамичности. Коэффициент динамичности, определенный на основании исследований и опыта строительства, принимается: при транспортировании 1,6, при подъеме и монтаже 1,4. При этом одновременно учитывается и коэффициент надежности по нагрузке. Допускается применять и более низкие значения коэффициентов динамичности, если они подтверждены специальными исследованиями и практикой применения, но не менее 1,25. При расчете предварительно напряженных элементов следует принимать во внимание величину обжимающего усилия с учетом потерь предварительного напряжения, соответствующих рассматриваемой стадии работы, и неблагоприятного значения коэффициента точности предварительного напряжения.

Самонапряженные железобетонные конструкции следует рассчитывать с учетом предварительного напряжения, создаваемого расширением бетона и в результате этого натяжением находящейся в конструкции арматуры, а также при иных видах стеснения деформаций бетона.

Сборно-монолитные конструкции рассчитываются до приобретения монолитным бетоном (дополнительно уложенным) заданной прочности — на нагрузки, действующие на данном этапе возведения конструкций (в том числе на нагрузку от веса монолитного бетона), и после приобретения монолитным бетоном заданной прочности — на нагрузки, действующие на этом этапе возведения и при эксплуатации конструкции.

При расчете бетонных и железобетонных конструкций должно учитываться влияние особого характера нагрузления — длительного, повторного, динамического. Бетонные и железобетонные конструкции, находящиеся под действием длительной нагрузки, рассчитываются с учетом снижения прочности бетона в результате накопления повреждений в бетоне (микро- и макроразрушений), а также с учетом повышения его деформативности в результате ползучести бетона в процессе длительного нагружения.

Повторные нагрузления разделяются на две группы — немногократно повторяющиеся (малоцикловые) при повторении нагрузений, измеряемых десятками циклов, и многократно повторяющиеся при повторении нагрузений, измеряемых миллионами циклов. В первом случае расчет производится с учетом снижения несущей способности железобетонных элементов в результате накопления в них повреждений (развитие трещин и т. д.) при повторных нагрузлениях. Особенно это проявляется при знакопеременном действии повторных нагрузений. Влияние немногократно повторных нагрузений учитывается при расчете на сейсмические воздействия. Во втором случае расчет выполняется с учетом усталостной прочности бетона и арматуры и характеризуется как расчет на выносливость. Влияние повторных нагрузений учитывается также и при расчете по второй группе предельных состояний, поскольку повторные нагрузления увеличивают раскрытие трещин и деформативность конструкций.

Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для восприятия кратковременных интенсивных динамических нагрузок, рассчитываются с учетом динамического упрочнения бетона и арматуры.

При расчете бетонных и железобетонных конструкций следует также учитывать неблагоприятное воздействие окружающей среды. К ним относятся воздействия

технологических повышенных температур от 50° до 200 °C, технологических высоких температур выше 200 °C, технологических отрицательных температур от минуса 40 °C и ниже, сухого и жаркого климата, холодного климата, пожара, агрессивных сред (газовых, при высокой влажности, жидких и твердых) и т. д. В общем случае расчет производится на совместное действие внешней нагрузки и внешней среды, при этом учитывается изменение физико-механических и упругопластических свойств бетона и арматуры и зависимость от характера внешнего воздействия.

## Глава 2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1. Бетон

В настоящее время для железобетонных конструкций применяется множество различных видов бетона, отличающихся своим составом и свойствами, поэтому для их упорядочения потребовалась классификация, согласно которой бетоны разделяются по структуре, назначению, виду вяжущих, виду заполнителей, зерновому составу заполнителей, условиям твердения.

По структуре бетоны разделяются на бетоны плотные, крупнопористые, поризованные и ячеистые. В плотных бетонах до 94 % пространства между зернами заполнителей занято затвердевшим вяжущим. В крупнопористом малопесчаном или беспесчаном бетоне пространство между зернами крупного заполнителя не полностью занято мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим. В поризованном бетоне пространство между зернами крупного заполнителя занято поризованным затвердевшим вяжущим. Ячеистый бетон весь состоит из поризованного затвердевшего вяжущего кремнеземистого компонента.

По виду вяжущих бетоны разделяются на цементные, силикатные (на известковом вяжущем), на шлаковом вяжущем, на гипсовом вяжущем, на смешанных вяжущих, например, известково-цементных, на специальных вяжущих. Бетоны могут быть на плотных заполнителях, на пористых и специальных заполнителях. По зерновому составу заполнителей бетоны разделяются на круп-