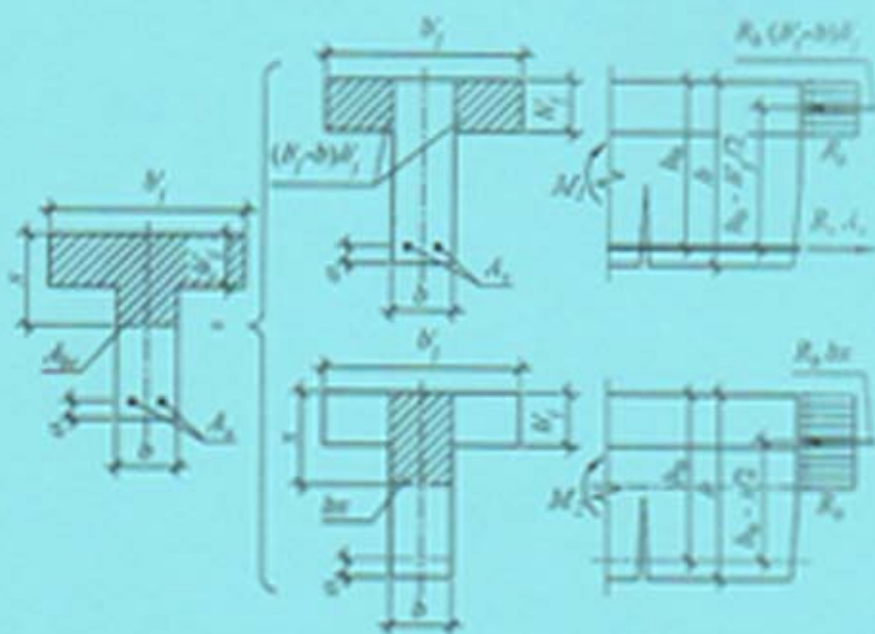


Н. К. Ананьева, В. Н. Околичный

# РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

**Н.К. Ананьева, В.Н. Околичный**

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Учебное пособие

Томск  
Издательство ТГАСУ  
2020

УДК 624.012.45(075.8)

ББК 38.53я7

**Ананьева, Н.К.** Расчет сечений железобетонных элементов : учебное пособие / Н.К. Ананьева, В.Н. Околичный. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. – 116 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 9-785-93057-916-1

В учебном пособии приводятся теоретические предпосылки расчета прочности сечений, а также основные сведения о предварительном напряжении железобетонных конструкций. Даны алгоритмы расчета и числовые примеры расчета прочности различных сечений, определение потерь предварительного напряжения и необходимых для этого геометрических характеристик приведенных сечений.

Настоящее учебное пособие представляет собой переиздание пособия «Расчет прочности сечений железобетонных элементов», выпущенного в 2013 г., с исправлениями и дополнениями.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 08.03.01.01 «Промышленное и гражданское строительство» направления 08.03.01 «Строительство», при изучении учебной дисциплины «Железобетонные конструкции». Может быть использовано студентами очной и заочной форм обучения.

**УДК 624.012.45(075.8)**

**ББК 38.53я7**

**Рецензенты:**

канд. техн. наук, директор, с. н. с. ООО «Инженерно-строительный центр „Стройпроект“» **С.Л. Капарулин;**

канд. техн. наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ **О.Р. Пахмурин.**

ISBN 9-785-93057-916-1

© Томский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2020

© Ананьева Н.К.,  
Околичный В.Н., 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для развития у студентов практических навыков расчета и конструирования наиболее распространенных сечений железобетонных элементов, а именно прямоугольного и таврового профиля. К конструкциям, имеющим такую форму поперечного сечения, относятся плиты покрытий и перекрытий, ригели, колонны и многие другие конструкции, рассчитываемые как изгибаемые и сжатые.

Решая подобные задачи, студент уясняет для себя исходные предпосылки расчета железобетонных конструкций, знакомится с материалами, из которых состоит железобетон, овладевает навыками пользования нормативной, технической и учебной литературой.

Научившись решать простейшие задачи по расчету прочности сечений элементов, студент успешнее осваивает курс железобетонных конструкций и выполняет курсовые проекты.

Контроль освоения материала студентами осуществляется на основе решения индивидуальных контрольных заданий (ИКЗ), составленных ЭВМ.

В учебном пособии приведены алгоритмы решения задач и примеры расчета ИКЗ. В конце разделов приведены контрольные вопросы, на которые должны ответить студенты при подготовке к практическим занятиям и при защите ИКЗ.

Учебное пособие представляет собой переиздание пособия «Расчет прочности сечений железобетонных элементов», выпущенного в 2013 г., с исправлениями и дополнениями. Пособие дополнено разделом 2 «Определение усилия предварительного обжатия для расчетов по второй группе предельных состояний» с контрольными вопросами, индивидуальными заданиями (ИКЗ 6, ИКЗ 7) и приложением 3.

# 1. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## 1.1. Расчет прочности сечений изгибаемых железобетонных элементов. Общие положения расчета

Экспериментальными исследованиями установлено, что предельное состояние балки по несущей способности характеризуется разрушением в сечении, нормальном или наклонном к продольной оси элемента (рис. 1). Разрушение по нормальному сечению вызывается действием изгибающего момента, а по наклонному сечению – действием поперечных сил и, реже, моментов. Прочность по нормальным и наклонным сечениям согласно первой группе предельных состояний рассчитывают по стадии III напряженно-деформированного состояния, при этом рассматриваются сечения с максимальными действующими расчетными усилиями (рис. 1). Для вывода основных расчетных уравнений используется метод сквозных сечений, при этом правая часть балки условно убирается и ее действие заменяется действием внутренних усилий.

При расчете прочности нормальных и наклонных сечений должны учитываться условия работы бетона.

При длительном действии нагрузки разрушение происходит раньше, чем при кратковременном действии нагрузки из-за появления микротрещин в бетоне, обусловленных развитием неупругих деформаций. Это явление учитывается при расчетах конструкций по первой группе предельных состояний коэффициентом условия работы бетона  $\gamma_{b1}$  (гамма  $b1$ ), на который умножаются расчетные сопротивления бетона  $R_b$  и  $R_{bt}$ .

При непродолжительном (кратковременном) действии нагрузки  $\gamma_{b1} = 1,0$ . При продолжительном (длительном) действии нагрузки  $\gamma_{b1} = 0,9$ . Таким образом, в расчет вводятся расчетные сопротивления  $R_b \cdot \gamma_{b1}$  и  $R_{bt} \cdot \gamma_{b1}$ .

## 1.2. Расчет прочности нормальных сечений

В железобетонных, экономично по расходу стали армированных, изгибаемых элементах разрушение нормальных сечений начинается с растянутой арматуры. В переармированных элементах разрушение происходит по сжатой зоне бетона. При этом напряжения в растянутой арматуре будут ниже предельных, что экономически невыгодно.

В соответствии с этим различают два расчетных случая:

1 – когда напряжения в растянутой арматуре достигают расчетных сопротивлений  $\sigma_s = R_s$ , а затем происходит разрушение сжатой зоны бетона, т. е. в бетоне достигаются предельные напряжения  $R_b$ ;

2 – когда напряжения в сжатом бетоне достигают предельных значений  $R_b$ , а напряжения в растянутой арматуре  $\sigma_s < R_s$ .

При расчете прочности, чтобы не наступило предельное состояние конструкции, изгибающий момент от расчетной нагрузки ( $M_{\max}$ ) должен быть меньше или равен несущей способности сечения  $M_{ult}$ :

$$M_{\max} \leq M_{ult}.$$

Мысленно разрежем элемент по сечению с трещиной в зоне действия максимального момента, правую часть удалим, а для соблюдения равновесия заменим действие удаленной части внутренними усилиями. Таким образом, получим расчетную схему, для которой можно записать условия равновесия для суммы моментов всех усилий относительно какой-либо характерной точки и для суммы проекций всех усилий на продольную ось  $X$ :

$$\begin{aligned} \sum M &= 0, \\ \sum X &= 0. \end{aligned} \tag{1.1}$$

Исходя из уравнений равновесия определяются внутренние усилия в элементе или необходимое армирование.

Выведем расчетные формулы для элементов с сечением любой формы, симметричной относительно вертикальной оси,

исходя из условий равновесия в предельном состоянии. Рассмотрим элемент прямоугольной формы. В общем случае элемент армируется предварительно напряженной ( $A_{sp}$  и  $A'_{sp}$ ) и ненапрягаемой ( $A_s$  и  $A'_s$ ) арматурой в растянутой ( $A_{sp}$ ,  $A_s$ ) и в сжатой зонах ( $A'_{sp}$ ,  $A'_s$ ) (рис. 2).

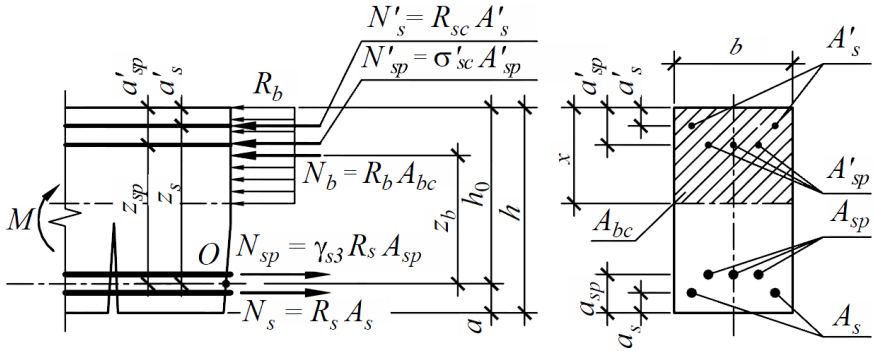


Рис. 2. Расчетная схема прочности нормальных сечений изгибаемых элементов (общий случай армирования):

$N_{sp} = R_s \cdot \gamma_{s3} \cdot A_{sp}$  – усилие в предварительно напряженной растянутой арматуре;  $N_s = R_s \cdot A_s$  – усилие в ненапрягаемой растянутой арматуре;  $N'_{sp} = R_{sc} \cdot \gamma_{s3} \cdot A'_{sp}$  – усилие в предварительно напряженной сжатой арматуре;  $N'_s = R_{sc} \cdot A'_s$  – усилие в ненапрягаемой сжатой арматуре;  $N_b = R_b \cdot A_{bc}$  – равнодействующая усилий в сжатой зоне бетона, где  $A_{bc}$  – площадь сжатой зоны бетона

Согласно расчетной схеме (рис. 2) условия равновесия записываются следующим образом: изгибающий момент от расчетных нагрузок, определяемый методами строительной механики, должен быть меньше или равен сумме моментов внутренних усилий, взятых относительно линии центра тяжести всей растянутой арматуры:

$$M_{\max} \leq \sum M_0 = N_b \cdot z_b + N'_{sp} \cdot z_{sp} + N_s \cdot z_s = R_b \cdot A_b \cdot z_b + R_{sc} \cdot \gamma_{s3} \cdot A'_{sp} \cdot z_{sp} + R_{sc} \cdot A'_s \cdot z_s, \quad (1.2)$$

где  $z_b = h_0 - 0,5x$  – плечо внутренней пары сил;  $z_s = h_0 - a'_s$  – расстояние между равнодействующими усилий в сжатой и растянутой ненапряженной арматуре;  $z_{sp} = h_0 - a'_{sp}$  – расстояние между равнодействующими усилий в сжатой и растянутой напряженной арматуре;  $h_0 = h - a$  – рабочая высота сечения (расстояние от центра тяжести всей растянутой арматуры до сжатой грани сечения).

Высота сжатой зоны бетона  $x$  определяется из суммы проекций всех усилий на продольную ось элемента:

$$R_b \cdot b \cdot x + R_{sc} \cdot A'_s - R_s \cdot \gamma_{s3} \cdot A_{sp} - R_s \cdot A_s = 0. \quad (1.3)$$

Прочностные характеристики материалов, из которых проектируется конструкция, определяются по нормативной литературе (Приложение 1).

Напряжения в растянутой арматуре достигают своих предельных значений (т. е. арматура используется полностью) только тогда, когда высота сжатой зоны  $x$  не превышает ее граничного значения  $x_R$ . Следовательно, формулы (1.2) и (1.3) применимы в случае соблюдения условия  $x \leq x_R$ . Граничное значение высоты сжатой зоны при расчетах определяется через относительную граничную высоту сжатой зоны  $\xi_R$  (кси  $R$ ). Этот коэффициент учитывает физико-механические свойства бетона и арматуры проектируемой конструкции.

Значение  $\xi_R$  определяется по эмпирической формуле согласно [8, п. 8.1.6]:

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{0,8}{1 + \varepsilon_{s,el} / \varepsilon_{b2}}, \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon_{s,el}$  – относительная деформация растянутой арматуры при напряжениях, равных  $R_s$ ;  $\varepsilon_{s,el} = R_s / E_s$ ;  $\varepsilon_{b2}$  – относительная деформация сжатого бетона при напряжениях, равных  $R_b$ ;  $\varepsilon_{b2} =$



= 0,0035 – при кратковременном действии нагрузки; при длительном действии нагрузки  $\varepsilon_{b2}$  зависит от влажности бетона:

- при влажности  $w > 75\%$   $\varepsilon_{b2} = 0,0042$ ;
- при влажности  $w = 40\text{--}75\%$   $\varepsilon_{b2} = 0,0048$ ;
- при влажности  $w < 40\%$   $\varepsilon_{b2} = 0,0056$ .

При проектировании изгибаемых элементов проверяется соблюдение условия  $\xi \leq \xi_R$ , где  $\xi = x/h_0$  – относительная высота сжатой зоны бетона. Если при расчете окажется, что  $\xi > \xi_R$ , то в расчетные формулы вместо  $R_s$  подставляется напряжение в растянутой арматуре  $\sigma_s < R_s$ , значение которого определяется по формулам, представленным в [2, 4], а  $x = \xi_R \cdot h_0$ .

Если соблюдается условие  $\xi \leq \xi_R$ , расчетное сопротивление напрягаемой арматуры  $R_s$  допускается умножить на коэффициент условий работы  $\gamma_{s3}$  [6, п. 3.9], определяемый по формуле:

$$\gamma_{s3} = 1,25 - 0,25\xi/\xi_R \leq 1,1; \quad (1.5)$$

если  $\xi/\xi_R < 0,6$ , можно, не пользуясь формулой (1.5), принимать  $\gamma_{s3} = 1,1$ . Для элементов без предварительного напряжения арматуры  $\gamma_{s3} = 1,0$ .

### 1.2.1. Расчет элементов прямоугольного профиля с одиночной арматурой

К элементам с одиночной арматурой относятся элементы, у которых рабочая (расчетная) арматура располагается только в растянутой зоне (рис. 3).

Элемент может армироваться предварительно напряженной  $A_{sp}$  или обычной  $A_s$  арматурой, а также при смешанном армировании той и другой арматурой ( $A_{sp} + A_s$ ).

Рассмотрим случай армирования элемента обычной арматурой  $A_s$ . Основные расчетные уравнения (1.2, 1.3) для этого частного случая запишутся следующим образом:

$$M \leq \Sigma M_0 = R_b \cdot b \cdot x(h_0 - 0,5x), \quad (1.6)$$

$$R_b \cdot b \cdot x - R_s \cdot A_{sp} = 0. \quad (1.7)$$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Расчет прочности сечений железобетонных элементов</b> .....	4
1.1. Расчет прочности сечений изгибаемых железобетонных элементов. Общие положения расчета.....	4
1.2. Расчет прочности нормальных сечений.....	6
1.2.1. Расчет элементов прямоугольного профиля с одиночной арматурой.....	9
1.2.2. Расчет элементов прямоугольного профиля с двойной арматурой.....	16
1.2.3. Расчет прочности нормальных сечений элементов таврового профиля.....	22
1.2.3.1. Определение положения нейтральной оси.....	22
1.2.3.2. Нейтральная ось проходит в полке.....	23
1.2.3.3. Нейтральная ось пересекает ребро.....	24
Контрольные вопросы к расчету прочности нормальных сечений изгибаемых элементов.....	29
1.3. Расчет прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов.....	30
1.3.1. Общие положения расчета.....	30
1.3.2. Расчет по полосе между наклонными сечениями.....	32
1.3.3. Расчет по наклонным сечениям при действии поперечных сил.....	33
1.3.3.1. Определение поперечной силы, воспринимаемой бетоном.....	34
1.3.3.2. Определение поперечной силы, воспринимаемой арматурой.....	35
1.3.3.3. Несущая способность элемента по поперечной силе.....	37
1.3.3.4. Расчетная длина пролета среза $c$ и проекции наклонной трещины $c_0$ .....	37
1.3.3.5. Минимальное поперечное армирование.....	39
1.3.3.6. Задачи по расчету прочности наклонных сечений.....	42
Контрольные вопросы к расчету прочности наклонных сечений.....	47
1.4. Расчет и конструирование сжатых элементов со случайными эксцентриситетами.....	48

1.4.1. Общие сведения о сжатых элементах со случайными эксцентриситетами .....	48
1.4.2. Конструктивные особенности сжатых элементов .....	49
1.4.3. Расчет сжатых элементов со случайными эксцентриситетами .....	50
Контрольные вопросы к расчету прочности сжатых железобетонных элементов .....	56
1.5. Примеры решения индивидуальных контрольных заданий	
По расчету прочности сечений железобетонных элементов .....	57
1.5.1. Индивидуальное контрольное задание 1 (ИКЗ 1) .....	57
1.5.2. Индивидуальное контрольное задание 2 (ИКЗ 2) .....	60
1.5.3. Индивидуальное контрольное задание 3 (ИКЗ 3) .....	62
1.5.4. Индивидуальное контрольное задание 4 (ИКЗ 4) .....	67
1.5.5. Индивидуальное контрольное задание 5 (ИКЗ 5) .....	69
<b>2. Определение усилия предварительного обжатия для расчетов по второй группе предельных состояний .....</b>	<b>73</b>
2.1. Определение геометрических характеристик приведенного сечения .....	73
Контрольные вопросы к определению геометрических характеристик приведенного сечения .....	76
2.1.1. Индивидуальное контрольное задание 6 (ИКЗ 6) .....	76
2.2. Определение потерь предварительного напряжения .....	80
2.2.1. Предварительно напряженный железобетон и особенности расчета предварительно напряженных конструкций .....	80
2.2.2. Формулы для определения потерь предварительного напряжения .....	83
2.2.3. Определение напряжения в бетоне и усилий обжатия .....	86
Контрольные вопросы при определении усилия предварительного обжатия .....	87
2.2.4. Индивидуальное контрольное задание 7 (ИКЗ 7) .....	88
<b>Библиографический список .....</b>	<b>98</b>
<b>Приложение 1. Основные сведения о тяжелом бетоне .....</b>	<b>99</b>
<b>Приложение 2. Основные сведения об арматурных сваях .....</b>	<b>101</b>
<b>Приложение 3. К расчету изгибаемых элементов .....</b>	<b>103</b>
<b>Приложение 4. Значения коэффициентов <math>\varphi_b</math> и <math>\varphi_{sb}</math> для расчета сжатых элементов из бетона классов В15–В35 на действие продольной силы со случайным эксцентриситетом .....</b>	<b>106</b>

<b>Приложение 5.</b> Сортамент стержневой арматуры и арматурной проволоки .....	107
<b>Приложение 6.</b> Сортамент арматурных канатов класса К-7 .....	108
<b>Приложение 7.</b> Соотношение между диаметрами свариваемых стержней и минимальные расстояния между стержнями в сварных сетках и каркасах, изготавливаемых с помощью контактной точечной сварки ..	109
<b>Приложение 8.</b> Защитный слой бетона .....	110
<b>Приложение 9.</b> Размещение арматуры в сечениях железобетонных изгибаемых элементов .....	111

*Учебное издание*

*Ананьева Нина Кузьминична  
Околичный Василий Николаевич*

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Редактор Т.А. Титоренко  
Оригинал-макет подготовлен Т.А. Титоренко

Подписано в печать 14.02.2020.  
Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 6,7. Уч.-изд. л. 6,05. Тираж 150 экз. Зак. № 26.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.