

*The 4th International Scientific Congress  
"Science and Education in the Modern World"*



*(New Zealand, Auckland, 5-7 January 2015)*

*"Auckland University Press"  
2015*



*University of Auckland*

# ***“Science and Education in the Modern World”***

***The 4<sup>th</sup> International Academic Congress***

***(New Zealand, Auckland, 5-7 January 2015)***

***PAPERS AND COMMENTARIES***

***VOLUME II***

***“Auckland University Press”***

***2015***

**Ahaieva Olha,**  
Odessa State Academy of Building and Architecture,  
Graduate Student, Specialty – Building Constructions, Buildings and  
Structures

## **Optimization of reinforced concrete structures on calculated reliability**

**Агаева Ольга,**  
Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, аспирантка, специальность –  
Строительные конструкции, здания и сооружения

## **Оптимизация элементов железобетонных конструкций по расчетной надежности**

**Постановка научной проблемы и ее значение.** Развитие строительного производства требует дальнейшего совершенствования методов расчета и проектирования строительных конструкций, обеспечения их надежности в эксплуатации, снижения материалоемкости и затрат на изготовление.

Хотя термин "теория надежности" появился в середине 50-х годов, расчеты на надежность, в сущности, проводятся инженерами давно. В работах М. Mayer [1], Н.Ф. Хоциалова [2], Н.С. Стрелецкого [3] и W. Wierzbicki [4], написанных в 20 – 30-е годы, можно уже найти некоторые основные понятия теории надежности, например понятие отказа как выхода конструкции из строя, понятие меры надежности как вероятности безотказной работы и понятие резервирования (в связи с оценкой надежности статически неопределимых систем). Это направление было предложено Н.С. Стрелецким [5], А.Р. Ржанициним [6], А.М. Freudenthal [7], А. I Johnson [8] и другими авторами.

Надежность конструкций – комплексное качество, включающее в себя ряд аспектов, в том числе – расчетную надежность. Под последней будем понимать заложенную на стадии расчета сформулированную математически обеспеченность эксплуатационной работы конструкции по предельным состояниям обеих групп.

Регулирование расчетной надежности можно рассматривать как оптимизацию величины характеристики безопасности  $\beta$ . В результате чего повышается надежность элементов конструкций, а в ряде случаев достигается определенная экономия арматурной стали, бетона и энергоресурсов при их изготовлении.

**Анализ исследований этой проблемы.** Регулирование обеспеченности работы конструкции по предельным состояниям осуществляется на стадии ее расчета и проектирования. В рамках существующих нормативных документов [9, 10] это возможно только путем выбора для каждой конкретной конструкции наиболее дешевых сочетаний материалов и способов изготовления при обеспеченности заданной прочности, деформативности и т.п. для каждого элемента. Это позволяет:

- а) получать определенный экономический эффект;
- б) в случае производственной необходимости заменять материалы и варьировать технологические приемы изготовления конструкций.

По мере развития вариантных и вероятностных методов расчета разрабатываются документы по расчету надежности конструкций и сооружений, где характеристики надежности используются при реконструкции, а также для сопоставления вариантов на стадии проектирования.

Однако, оба подхода не учитывают влияния изменчивости физико-механических свойств бетона и арматуры на разброс несущей способности элементов конструкций. Последний, в свою очередь, не используется для регулирования надежности в экономически обоснованных пределах.

Обширное исследование по нахождению характеристик разброса несущей способности обычных и предварительно-напряженных конструкций проведена Ticky M., Vorlites M. [11]. Изменчивость несущей способности оказалась зависящей от прочности бетона, количества и размещения арматуры. Однако надо иметь в виду, что анализ производился на основе зарубежных нормативных документов. На базе норм США [12] получено, что вероятность достижения железобетонной конструкцией предельного состояния зависит от формы поперечного сечения, наличия или отсутствия предварительного напряжения рабочей арматуры, величины расчетного пролета, характера нагрузки.

Наряду с разработкой национальных стандартов в настоящее время решается вопрос введения в действие европейских, в том числе Еврокод 2 с необходимыми изменениями и дополнениями, учитывающими национальные особенности. Так, например, в российских стандартах [13] принципы и расчетные методики уже приближены к европейским нормам по расчету железобетонных конструкций [14].

**Цель и задачи статьи** – разработка практических методов оптимизации расчетной надежности изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов с учетом изменчивости физико-механических свойств материалов при постоянной и переменной нагрузках.

### Общие принципы решения задачи

Анализ методов вероятностного расчета элементов конструкций показывает, что наиболее приемлемым показателем с позиций нормирования и регулирования надежности конструкции является характеристика безопасности  $\beta$  [15, 16]. Эта характеристика, в развитие разработок А.Р. Ржаницына и В.Д. Райзера, подсчитывается по следующим формулам:

- при расчете по предельным состояниям первой группы

$$\beta = \frac{\bar{R}^I - \bar{F}^I}{\sqrt{(\bar{R}^I)^2 C_v^2(R^I) + (\bar{F}^I)^2 C_v^2(F^I) - 2r_{RF} \cdot \bar{R}^I \cdot \bar{F}^I \cdot C_v(R^I) C_v(F^I)}} \quad (1)$$

где:  $F^I$  – расчетное значение обобщенного силового воздействия;

$R^I$  – расчетное значение обобщенной несущей способности;

- при расчете по перемещению или раскрытию трещин

$$\beta = ([y] - \bar{F}^{II}) / \bar{F}^{II} C_v(F^{II}) \quad (2)$$

где:  $F^{II}$  – значение перемещения или ширины раскрытия трещины;

$[y]$  – их допустимые величины;

- при расчете по образованию трещин

$$\beta = \frac{\bar{R}^{II} - \bar{F}^{II}}{\sqrt{(\bar{R}^{II})^2 C_v^2(R^{II}) + (\bar{F}^{II})^2 C_v^2(F^{II}) - 2r_{RF} \cdot \bar{R}^{II} \cdot \bar{F}^{II} \cdot C_v(R^{II}) C_v(F^{II})}} \quad (3)$$

где:  $R^{II}$  – усилие трещинообразования;

$F^{II}$  – усилие от действующей нагрузки.

По сравнению с вероятностью отказа или вероятностью неразрушения  $\beta$  выражена небольшим числом, обычно большим единицы. Эта характеристика нашла широкое применение в мировой практике и является нормированной величиной в Еврокодах (в зарубежной литературе - индекс надежности) [14].

Оптимизация обеспеченности работы элемента конструкции по предельным состояниям определяется как удержание величины  $\beta$  в некоторых



пределах, обоснованных строительной практикой, а также необходимой обеспеченностью по рассматриваемой группе предельных состояний.

Оптимальные величины характеристики безопасности  $\beta_{\text{опт}}$ , ниже которых не желательно иметь рассчитанные по формулам (1) – (3) величины  $\beta$ , можно принять, исходя из обобщений А.П. Кудзиса [17]. При расчете по предельным состояниям первой группы  $\beta_{\text{опт}}$  предлагается считать равным:

- для ненапрягаемых железобетонных элементов гражданских и промышленных зданий и сооружений – 3,5;
- для аналогичных элементов с предварительным напряжением арматуры – 4,0;
- для сооружений типа резервуаров и емкостей – 3,8;
- для элементов пролетных строений мостов – 3,7.

В дальнейшем эти значения могут уточняться и дифференцироваться.

При расчете по предельным состояниям второй группы, исходя из обеспеченности 0,95, рекомендуется  $\beta_{\text{опт}} = 1,46$ .

Задачу управления обеспеченностью работы элемента по предельным состояниям можно трактовать как математическую задачу оптимизации, решаемую методами операционного программирования. В качестве целевой функции принимается положительная величина разности между расчетными и оптимальными значениями характеристики  $\beta$ . Из экономических соображений об отсутствии излишнего запаса обеспеченности эта разность должна быть минимальной

$$(\beta - \beta_{\text{опт}}) \rightarrow \min \quad (4)$$

Регулируемыми переменными в управлении расчетной надежностью служат основные аргументы расчетных формул (размеры поперечного сечения, площадь арматуры, класс бетона и арматуры и т.п.)  $X_k$ . Методом оптимизации предлагается выбрать вариантный метод возможных направлений, итерационный по своей процедуре [18]. Основные ограничения типа

$$F_j \leq R_j \quad (5)$$

определяются нормативными документами. Дополнительные ограничения

$$\beta - \beta_{\text{опт}} \geq 0, \quad X_k \geq 0 \quad (6)$$

Направления изменения регулируемых переменных выбираются в зависимости от возможностей их варьирования с оценкой экономической эффективности. Таковой может быть минимум себестоимости конструкции. Себестоимость  $S$  для ненапрягаемых железобетонных элементов определяется выражением [19]:

- для изгибаемых элементов

$$S = S_0 + a_3 V_c + a_4 C + a_5 P_s + a_9 f_{yd} \quad (7)$$

- для сжатых элементов

$$S = S_0 + a_3 V_c + a_4 C + a_5 P_s \quad (8)$$

Здесь  $V_c$  – расход бетона ( $m^3$ );  $P_s$  – расход арматурной стали (кг);  $C$  – класс бетона;  $f_{yad}$  – расчетное сопротивление арматурной стали.

При выборе направленности оптимизации необходимо также учитывать направленность влияния каждого фактора на параметр состояния и характеристику его разброса. Эта направленность может быть различной.

### Практические рекомендации по регулированию надежности железобетонных элементов при постоянной и переменной нагрузках

Для инженерных целей предлагается следующий алгоритм решения задачи.

1. На основе имеющегося опыта или по аналогии с ранее запроектированными конструкциями принимаются размеры поперечного сечения, класс бетона, содержание и расположение арматуры проектируемого элемента.

2. По нормативным формулам [9] находятся:

- его несущая способность по нормальным или наклонным сечениям;
- прогиб (или другой вид деформации);
- трещиностойкость по нормальным и наклонным сечениям или ширина раскрытия трещины (кратковременная и длительная), нормальной или наклонной к продольной оси элемента – в зависимости от категории трещиностойкости конструкции.

3. Определяются характеристики безопасности  $\beta_t$  для каждого из расчетных предельных состояний.

4. Все полученные  $\beta_t$  сравниваются с оптимальными  $\beta_{опт}$ ; проверяется выполнение первого условия (5). Для практических целей желательно, чтобы

$$0 \leq \beta - \beta_{опт} \leq 0,2\beta_{опт} \quad (9)$$

Величина  $0,2\beta_{опт}$ , естественно, условная и может быть уточнена для конкретных конструкций и видов предельных состояний. Тем более, что при одновременной оптимизации элемента по нескольким предельным состояниям не всегда удается все  $\beta_t$  ввести в границы (9). Но условие левой части неравенства (9) должно выполняться в любом случае.

5. Если не выполняется условие правой части неравенства (9) для каких-либо предельных состояний, то соответствующие величины  $\beta_t$  уменьшаются путем изменения одного или нескольких регулируемых факторов, направленного на экономию затрат. В табл. 1 систематизированы факторы, существенно влияющие на надежность железобетонных элементов по различным предельным состояниям.

Как сказано выше, нужно учитывать направленность влияния изменения фактора не только на изменчивость, но и непосредственно на параметр напряженно-деформированного состояния, которые могут быть противоположными.

При оптимизации величины  $\beta$  в расчетах по деформациям нужно иметь в виду, что один и тот же класс бетона может быть получен при различной подвижности бетонной смеси. Использование более подвижной смеси позволяет экономить энергоресурсы на ее укладку и уплотнение, но в дальнейшем излишнее содержание воды увеличивает деформации усадки и ползучести и, следовательно, длительные деформации элемента. Это обстоятельство также следует учитывать при оптимизации надежности.

В случае действия длительной нагрузки переменного квазистационарного режима расчеты элементов осуществляются с учетом обратной ползучести бетона. Подсчет характеристики  $\beta$  производится последовательно для нескольких моментов времени: момента приложения нагрузки, моментов окончания первых двух-трех полуциклов нагрузки-разгрузки и на срок окончания эксплуатации сооружения ( $t - t_0 \rightarrow \infty$ ) [15, 20].

**Таблица 1**

*Регулируемые факторы и параметры несущей способности железобетонных элементов*

№ п/п	Регулируемые факторы	Прочность			Прогиб	Трещиностойкость		Ширина раскрытия трещин	
		По нормальным сечениям	По наклонным сечениям			По нормальным сечениям	По наклонным сечениям	По нормальным сечениям	По наклонным сечениям
			Q <sup>I</sup>	Q <sup>II</sup>					
1. Изгибаемые элементы									
1	Прочность бетона	+/- <sup>2</sup>	+ <sup>1</sup>	+	+	+	+		
2	Размеры сечения		п. 6.3 [21]			п. 6.5 [21]			
3	Класс продольной арматуры	+/-	+		- <sup>1</sup>			+/-	
4	Коэффициент продольного армирования	+/-	+	+	+				
5	Мера ползучести бетона	+				п. 6.5 [21]			
2. Сжатые элементы									
1	Коэффициент продольного армирования	+							



3. Растянутые элементы									
1	Прочность бетона	+/-					+		

Примечания:

1. Знак «+» означает, что увеличение данного фактора влечет за собой возрастание показателя надежности  $\beta$ , знак «-» – его убывание.
2. Обозначение «+/-» означает сложную зависимость  $\beta$  от указанного фактора, определяемую его взаимосвязью с другими факторами.
3. Отсутствие какого-либо знака в строке соответствует практической независимости показателя надежности от рассматриваемого фактора.
4. Данные таблицы относятся к элементам с ненапрягаемой арматурой.

**Расчет элементов по заданным значениям показателя надежности**

Рассматриваемую задачу обеспечения расчетной надежности можно поставить иначе. Оптимальная величина  $\beta_{\text{опт}}$  для элемента задана. Нужно найти соответствующую ей несущую способность элемента. Иными словами, зная характеристики разброса  $C_v(F)$  и  $C_v(R)$ , следует определить величину  $R$ , для которой выполняется условие

$$\text{Sup } F = \text{Inf } R \quad (10)$$

Естественно, что такая постановка возможна только при расчете элемента по одному предельному состоянию, например, по прочности нормальных сечений. Решение этой задачи можно рассматривать как этап, предшествующий оптимизации расчетной надежности элемента по всей совокупности предельных состояний.

Итак, величина  $\beta$  задана одним из значений, оговоренных в общих принципах решения задачи. Тогда из формулы (3) получим для нахождения требуемой величины квадратно уравнение:

$$(\beta^2 C_v^2(R) - 1)R^2 + 2(\bar{F} - r_{RF} \beta^2 \bar{F} C_v(R) \cdot C_v(F))R + \bar{F}^2 (\beta^2 C_v^2(F) - 1) = 0 \quad (11)$$

Из двух корней уравнения выбирают тот, который удовлетворяет неравенству  $\bar{R} > \bar{F}$ .

**Выводы и перспективы дальнейшего исследования**

1. Таким образом, представлены практические рекомендации по регулированию надежности изгибаемых железобетонных предварительно напряженных элементов при постоянной нагрузке. Обобщен перечень регулируемых факторов, с помощью которых можно изменять показатель надежности в ту или иную сторону.

2. Регулирование расчетной надежности при переменной нагрузке заключается, прежде всего, в подсчете показателя надежности для момента приложения нагрузки, моментов изменения нагрузки в течение первых нескольких полциклов, а также его экстраполяции на конец срока эксплуатации конструкции. Затем осуществляется его корректировка в необходимом направлении.

3. Следствием регулирования надежности предварительно напрягаемых элементов может быть как экономия материалов и энергоресурсов, так и увеличение степени их обеспеченности в стадии эксплуатации по различным предельным состояниям.

Изложенная методика оптимизации элементов железобетонных конструкций по расчетной надежности может быть использована при проектировании различных строительных конструкций и для накопления статистических данных о риске эксплуатации таких конструкций в определенных условиях.

### Список литературы

1. Mayer M. Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. Springer – Verlag, Berlin, 1926. – P. 111 – 126.
2. Хоциалов Н.Ф. Запасы прочности. «Строительная промышленность», 1929. – № 10. – С. 840 – 844.
3. Стрелецкий Н.С. Об исчислении запасов прочности сооружения. Сб. трудов МИСИ, № 1. – Изд. МИСИ, 1938. – С. 4 – 32.
4. Wierzbicki W. Bezpieczenstwo budowli jako zagadnienie prawdopodobienstwo Przegląd Techniczny, 1936.
5. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициентов запаса прочности сооружений. – М.: Стройиздат, 1947. – 94 с.
6. Ржаницин А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. – М.: Стройиздат, 1954. – 278 с.
7. Freudenthal A.M. The safety of structures. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs, 1947. – vol. 112, № 1. – P. 125 – 180.
8. Johnson A.I. Strength, Safety and economical dimensions of structures, Bull. of Div. Struct. Engng, Roy. Inst. Techn. Stockholm, 1953. – № 12. – P. 73 – 78.
9. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2010 – 09 – 01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 97с. – (Державні будівельні норми України).

10. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого залізобетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – [Чинний від 2011 – 06 – 01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118с. – (Національний стандарт України).
11. Ticky M., Vorlitez M. Statistical theory of concrete structures. – Prague: 1972. – 363 p.
12. Nauman A.E., Siriuksorn A. Reliability of particular prestressed beams at serviceability limit states // Journal of PCI . – 1982. – v.27, № 6. – P. 66 – 85.
13. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 25 с.
14. EN 1992-1:2001 (Final draft, April, 2002) Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – Final draft. December, 2004. – 230 p.
15. Застава М.М. Оптимизация расчетной надежности железобетонных элементов при переменной нагрузке // В сб.: Динамические испытания сооружений. – М.: ЦНИИС Минстроя СССР, 1991. – С. 36 – 42.
16. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 193 с.
17. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. – Вильнюс: изд-во Москлас, 1985. – 156 с.
18. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975. – 272 с.
19. Редько Ю.М., Кузнецов С.М., Рогатин Ю.А. Автоматизация технико-экономической оценки эффективности конструкций промышленных зданий // Бетон и железобетон. – 1989. – № 1. – С. 12 – 14.
20. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. – Киев; Будівельник, 1974. – 142 с.
21. Застава М.М., Агаев А.А., Работин Ю.А. Регулирование расчетной надежности железобетонных конструкций. – Одесса, 1996. – 194 с.