

**Міністерство освіти і науки України  
Академія будівництва України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Північно-Західне територіальне відділення АБУ**

**РЕСУРСОЕКОНОМНІ  
МАТЕРІАЛИ, КОНСТРУКЦІЇ,  
БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ**

Збірник наукових праць

Випуск 30

Рівне – 2015

УДК 624.012

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

## ANALYSIS OF RELIABILITY INDICES CALCULATION METHODS OF FERROCONCRETE STRUCTURES' ELEMENTS

**Карпюк В.М., д.т.н., проф., Агаева О.А.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**Karpiuk V.M., д.т.н., проф., Агаева О.А.** (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

**Karpiuk V.M., doctor of technical sciences, professor, Ahaieva O.A.** (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa)

В статье рассмотрены существующие способы расчета показателей надежности строительных конструкций. Описаны их основные достоинства и недостатки.

У статті розглянуто існуючі способи розрахунку показників надійності будівельних конструкцій. Описано їх основні переваги та недоліки.

The article deals with the existing reliability indices calculation methods of building structures. Their main advantages and disadvantages are described.

### Ключевые слова:

Железобетон, показатели, надежность, безопасность, экономичность, вероятность, отказ, неразрушимость, распределение.

Залізобетон, показники, надійність, безпека, економічність, ймовірність, відмова, незруйновність, розподіл.

Ferroconcrete, indices, reliability, safety, economy, probability, failure, indestructibility, distribution.

**Введение.** Строительство является одной из самых материалоемких производственных отраслей. Вопросы надежности сооружений, конструкций и их элементов, равно как и ресурсосбережение, всегда были и остаются проблемными.

Надежность и экономичность – необходимые условия проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Обеспечение этих качеств особенно важно при поиске новых конструктивных решений.

В действующих современных нормативных документах [1, 2] уровень надежности явно не определен и отражается системой частных коэффициентов надежности – по нагрузке, по материалу, по назначению здания или сооружения и по условиям работы. В результате однотипные конструкции, обладают различными уровнями надежности, что сказывается на показателях их эффективности – расходах материалов, энергозатрат на изготовление, стоимости и др. [3].

В последние годы в теорию расчета строительных конструкций стали внедряться вероятностные методы (ВМР). Одновременно с корректировкой существующих методов они предлагают новое содержание критерия качества – вероятность безотказной работы.

Основная цель ВМР – повысить объективность расчетов, что достигается через оценку их надежности. Особенностью ВМР являются следующие направления [4]:

- вариантное проектирование строительных элементов, позволяющее регулировать материалоемкость в зависимости от качества их изготовления;
- оптимизация параметров строительных элементов за счет минимизации приведенных затрат с учетом расходов за период эксплуатации;
- оптимизация нормируемых параметров, таких как коэффициент надежности по назначению, срок эксплуатации и др.;
- распределение заданной (или оптимальной) надежности системы по ее элементам;
- оценка остаточного ресурса прочности и долговечности эксплуатируемых строительных элементов и систем (СЭС);
- расчетное обеспечение безопасности эксплуатации СЭС;
- сравнительная оценка надежности и безопасности уникальных СЭС

Существует множество показателей надежности: вероятность безотказной работы, долговечность, обеспеченность и др., которые необходимо учитывать, как при проектировании, так и при эксплуатации зданий и сооружений.

**Анализ последних исследований.** Вопросы теории расчета и нормирования надежности строительных конструкций нашли отражение во многих отечественных и зарубежных публикациях. Общие принципиальные вопросы применения вероятностных моделей к анализу надежности получили развитие в фундаментальных исследованиях Н.С. Стрелецкого [5], А.Р. Ржаницына [6], В.В. Болотина [7], В.Д. Райзера [8]. Значительный вклад в совершенствование методов расчета внесли: А.П. Кудзис [9], М.М. Застава [10], В.А. Перельмутер [11], А.С. Лычев [4], С.Ф. Пичугин [12, 13] и др. Из зарубежных исследований известны работы А.И. Johnson [14], А.М. Freudenthal [15, 16], Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати [17].

М.Т. Todinov [18], О. Ditlevsen and Н.О. Madsen [19] и др. Наибольшее число исследований было посвящено определению надежности различных типов строительных конструкций с применением вероятностных методов оценки предельных состояний. Также элементы ВМР в той или иной форме включаются в последние редакции норм проектирования некоторых стран [20, 21].

**Постановка целей и задач исследования.** Целью данной работы является рассмотрение методов расчета показателей надежности элементов железобетонных конструкций и определение их достоинств и недостатков.

**Методика исследования.** В настоящее время имеется некоторое число практических способов расчета показателей надежности строительных конструкций. Рассмотрим основные из них.

На рис. 1 приведена схема, предложенная Н.С. Стрелецким. На ней обозначены:  $F$  – обобщенное усилие в элементе конструкции (изгибающий момент, продольная и поперечная сила, главное напряжение, прогиб и т.п.);  $R$  – обобщенная несущая способность элемента (предельное воспринимаемое усилие, жесткость элемента и т.д.). Обе величины,  $F$  и  $R$  – случайные с заданными, предположительно – нормальными, законами распределения.

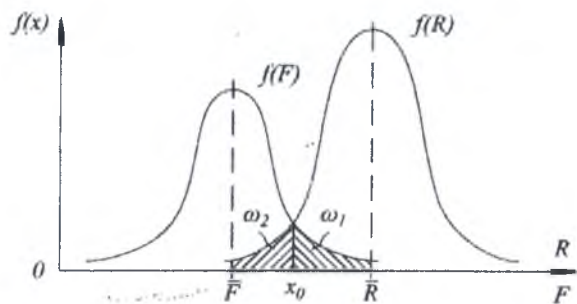


Рис. 1. Схема Н.С. Стрелецкого

Надежность элемента определяется через площади «хвостов» распределения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (рис. 1):

$$P = 1 - (\omega_1 + \omega_2). \quad (1)$$

Вычисление общей ординаты  $x_0$  распределений  $R$  и  $F$  рассмотрено в [22].

Та же схема иллюстрирует подход А.Р. Ржаницына. Очевидно, что надежность элемента пропорциональна разности

$$\psi = \bar{R} - \bar{F}, \quad (2)$$

которую А.Р. Ржаницын назвал функцией неразрушимости, имея в виду, что  $\psi > 0$ . Показателем надежности при таком подходе является характеристика безопасности (гауссовский коэффициент надежности по А.М. Freudenthal [15, 16])

$$\beta = (\bar{R} - \bar{F}) / S(\psi). \quad (3)$$

Где  $S(\psi)$  – среднее квадратическое отклонение функции неразрушимости, которое находится по формулам:

- для независимых величин  $R$  и  $F$

$$S(\psi) = \sqrt{S^2(R) + S^2(F)}; \quad (4)$$

- для взаимозависимых

$$S(\psi) = \sqrt{S^2(R) + S^2(F) - 2K_{RF}}, \quad (5)$$

где  $K_{RF}$  – взаимокорреляционный момент случайных величин  $R$  и  $F$  [23].

Для некоторых предельных состояний второй группы величина  $R$  детерминирована как некоторая заданная величина  $[R]$  (прогиб, ширина раскрытия трещины и т.п.). Тогда схема Н.С. Стрелецкого имеет вид, изображенный на рис. 2. При таком подходе  $R$  трактуется как функция Дирака (при нулевой ширине графика его площадь равна 1).

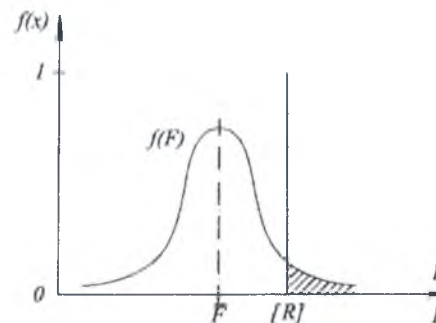


Рис. 2. Модификация схемы Н.С. Стрелецкого

Если закон Гаусса для описания  $F$  и/или  $R$  оказывается мало приемлемым, то можно использовать переход к эквивалентному нормальному распределению [24, 25].

Существуют методы теории надежности, предлагающие подсчитывать обеспеченность работы конструкции на основе теории выбросов (выхода) нагрузки за кривую, описывающую несущую способность элемента, меняющуюся во времени (В.В. Болотин и др.).

Имеются также разработки моделей пуассоновского и кумулятивного типов [7, 26]. Использование теории процессов пуассоновского типа базируется на представлении отказов конструкции как очень редких событий, что в какой-то степени приемлемо только при расчетах по предельным состояниям первой группы. Отказы кумулятивного типа, т.е. постепенно

накапливающиеся, более верно отражают работу элементов в период эксплуатации, в особенности – при переменном режиме нагружения.

На практике также применяется метод статистических испытаний (Монте-Карло) [22, 24]. Существо метода состоит в проведении большого количества численных экспериментов с последующей статистической обработкой полученного массива данных. Этот метод может быть использован также для получения величин изменчивости параметров состояния.

Рассмотрение методов вероятностного расчета конструкций, приведенное в работах [8, 22], показало, что наиболее подходящим показателем для задачи нормирования и регулирования надежности железобетонных конструкций следует считать характеристику безопасности (3). Для различных предельных состояний ее величину подсчитывают по формулам [22]:

- в случае расчета по предельным состояниям первой группы:

$$\beta = \frac{\bar{R}^I - \bar{F}^I}{\sqrt{(\bar{R}^I)^2 C_v^2(R^I) + (\bar{F}^I)^2 C_v^2(F^I) - 2r_{RF} \bar{R}^I \bar{F}^I C_v(R^I) C_v(F^I)}}, \quad (6)$$

где  $F^I$  – численное значение обобщенного силового воздействия;

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

- при расчете по перемещениям или на раскрытие трещин:

$$\beta = \frac{[y] - \bar{F}^{II}}{\bar{F}^{II} C_v(F^{II})}, \quad (7)$$

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

$[y]$  – их допустимые нормами [1, 2] величины;

- при расчете по образованию трещин:

$$\beta = \frac{\bar{R}^{II} - \bar{F}^{II}}{\sqrt{(\bar{R}^{II})^2 C_v^2(R^{II}) + (\bar{F}^{II})^2 C_v^2(F^{II}) - 2r_{RF} \bar{R}^{II} \bar{F}^{II} C_v(R^{II}) C_v(F^{II})}}, \quad (8)$$

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

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

При анализе влияния различных факторов на расчетную надежность необходимо подсчитывать величину  $\beta$  для безразмерных значений  $R$  и  $F$ . В этих целях вводится понятие относительной нагрузки [22]:

$$\eta_{ld} = \bar{F} / \bar{R}. \quad (9)$$

Тогда характеристика безопасности для независимых  $R$  и  $F$

$$\beta = \frac{1 - \eta_{ld}}{\sqrt{C_v^2(R) - \eta_{ld}^2 C_v^2(F)}} \quad (10)$$

существенно зависит от  $\eta_{ld}$ . Так, для бетонного элемента при принятом в нормах  $C_v(f_{cd}) = 0,135$  и  $C_v(F) = 0,1$ , изменение  $\eta_{ld}$  в пределах 0,3...0,6 влечет за собой уменьшение  $\beta$  от 5,06 до 2,71.

Исходя из схемы Н.С. Стрелецкого, для предельного состояния имеем

$$\bar{R} - \bar{F} = t_p C_v(F) \cdot \bar{F} + t_p C_v(R) \cdot \bar{R}, \quad (11)$$

где  $t_p$  – табличный коэффициент, связанный с распределением Стьюдента и зависящий от заданной степени обеспеченности. При принятой в нормах обеспеченности физико-механических свойств материалов  $P = 0,95$ ,  $t_p = 1,64$ .

Из (11) после простейших преобразований получим

$$\eta_{ld} = \frac{1 - t_p C_v(R)}{1 + t_p C_v(F)}. \quad (12)$$

Если рассматривать предельную прочность по нормальным сечениям, то для бетонных и железобетонных элементов величина  $\eta_{ld}$  лежит в интервале от 0,45 до 0,55. Это подтверждает общепринятое мнение, что эксплуатационное усилие в элементе составляет примерно 0,5 от разрушающего. Указанная величина применяется при подсчетах  $\beta$  по формуле (12) для предельных состояний первой группы. Для второй группы предельных состояний величина  $\eta_{ld}$  может быть дифференцирована в зависимости от конкретного вида предельного состояния.

**Результаты исследования.** Положительной стороной метода, предложенного Н.С. Стрелецким, является его простота. Недостатком следует считать необходимость использования «хвостов» распределений, параметры которых не всегда могут быть найдены достоверно. Данная схема успешно применяется для определения вероятности усадочного трещинообразования, а также при подсчете вероятности залечивания трещин в конструкциях [10].

К достоинствам подхода А.Р. Ржаницына относятся сравнительная простота расчета и отсутствие необходимости использовать «хвосты» распределений. Тем не менее, он имеет и отрицательные стороны:

- распределения  $F$  и  $R$  должны быть близкими к нормальному;

- при взаимосвязанных  $R$  и  $F$  (например, при расчете по деформированной схеме) трудно найти достаточно точное описание функции  $K_{RF}$ .

Положительной стороной использования теории выбросов является ее точный математический аппарат. Однако ввиду того, что выход параметра за допустимый уровень считается редким событием и наличия необходимости моделировать автокорреляционную функцию в виде экспоненты, метод не всегда дает приемлемые результаты, особенно при расчете по второй группе предельных состояний.

Близко к теории выбросов, в смысле учета временного фактора, направление, основанное на применении моделей так называемого

пуассоновского и кумулятивного типов. Однако, при корректных предположениях и строгом математическом аппарате, упрощающие гипотезы прикладных методик этих направлений делают их пригодными для бетона и железобетона только в некоторых частных случаях.

Более приемлем в практическом отношении метод статистических испытаний. Его достоинство состоит в возможности учитывать стохастическую природу большого числа факторов, определяющих надежность конструкции. Недостатком является большая трудоемкость. Очевидно также, что обеспеченность метода существенно зависит от точности расчетных формул.

#### Выводы

1. Теория надежности строительных конструкций является логическим продолжением и развитием существующего метода расчета по предельным состояниям. Вероятностное моделирование надежности становится основным экономически эффективным инструментом проектирования.

2. Объективное прогнозирование и регулирование материалоемкости и стоимости строительства возможно только с помощью оценки показателей надежности конструкций на стадиях их изготовления, возведения и эксплуатации.

3. Наиболее подходящим показателем с позиций нормирования и регулирования надежности является характеристика безопасности  $\beta$ .

4. Точность нахождения показателей надежности элементов железобетонных конструкций определяется, наряду с другими факторами, точностью используемых расчетных формул. Поэтому дальнейшее совершенствование методов их расчета является необходимым условием.

1. 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).
2. 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).
3. Байрамуков С.Х. Методы расчета и оценки надежности железобетонных конструкций с напрягаемой и ненапрягаемой арматурой: Дисс. ... доктора техн. наук. – Черкесск, 2001. – 475 с.
4. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. – Москва: АСВ, 2008. – 184 с.
5. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. – М.: Стройиздат, 1947. – 94 с.
6. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 238 с.
7. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 352 с.
8. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 194 с.
9. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. – Вильнюс: Москлас, 1985. – 156 с.
10. Застава М.М., Агасв А.А., Работин Ю.А. Регулирование расчетной надежности железобетонных конструкций. – Одесса, 1996. – 194 с.
11. Перельмутер А.В.

- Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – К.: УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 216 с.
12. Високоєфективні технології та комплексні конструкції в промисловому й цивільному будівництві: монографія / О.Г. (Онищенко, С.Ф. Пичугін, В.О. Онищенко, Л.І. Стороженко, О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, І.А. Ємельянова, О.М. Ландар. – Полтава: ПФ «Форпіка», 2010. – 452 с.
  13. Пичугин, С.Ф. Надежность строительных конструкций. Работа научной школы проф. Пичугина С.Ф. – Полтава: ООО «АСМИ», 2010. – 434 с.
  14. Johnson A.I. Strength, Safety and economical dimensions of structures, Bull. of Div. Struct. Engng, Roy. Inst. Techn. Stockholm, 1953. – № 12. – P. 73 – 78.
  15. Freudenthal A.M. The Safety and the Probability of Structural Failure. – Proc. of ASCE, vol. 80, paper № 468, 1954. – P. 451-469.
  16. Freudenthal A.M. Safety, Reliability and Structural Design. – Journ. Structural Div. (Proc. of ASCE) 87, ST/3/1961. – P. 814-823.
  17. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. (Пер. с англ.) М.: Стройиздат, 1988. – 580 с.
  18. Todinov M.T. Reliability and risk models: setting reliability requirements / M.T. Todinov. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 2005. - 322 p.
  19. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. – Technical University of Denmark, 2007. – 361 p.
  20. 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.
  21. Vrouwenvelder T. JCSS Probabilistic Model Code, Proceedings of the conference on safety, Risk and Reliability Malta, 2001.
  22. Застава М.М. Расчет железобетонных элементов при случайной переменной нагрузке с учетом изменчивости физико-механических характеристик бетона и арматуры: Дисс. ... доктора техн. наук. – Одесса, 1992. – 313 с.
  23. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1965. – 576 с.
  24. Застава М.М. Разработка инженерных методов обеспечения надежности бетонных и железобетонных конструкций // В сб.: Гидромелиорация и гидротехническое строительство. – Львов: Вища школа, 1988. – Вып. 16. – С. 108-112.
  25. Rackwitz R., Friessler B. An Algorithm for the Calculation of Structural Reliability under Combined Loading // Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke. – Munchen. Jab. f. Konstr. Ingb., 1977. – S. 489-494.
  26. Гвоздев А.А., Шубин А.В., Жумагулов Е.М. Об учете накопления повреждений структуры бетона при вычислении деформаций ползучести, включая псевдопластические // В сб.: Новые исследования элементов железобетонных конструкций при различных предельных состояниях. – М.: Стройиздат, 1982. – С. 32-39.