

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.02

А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО\*

\* Кафедра «Мости и туннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, эл. почта albert.lantoukh@gmail.com

### КОНЦЕПЦИЯ НАДЕЖНОСТИ В ЕВРОКОДЕ

**Цель.** Глобальная цель работы заключается в анализе моделей надежности элементов, проектируемых в соответствии с Еврокодом. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Выполнено сравнение моделей **Научная новизна.** Сделаны важные обобщения и получены количественные сравнительные оценки моделей. **Практическая значимость.** Формируется практический аппарат управления надежностью в процессе проектирования.

*Ключевые слова:* Еврокод; модель надежности; характеристика безопасности

#### Ретроспектива

В этом кратком историческом обзоре мы попытаемся привести основные вехи на пути проникновения идей надежности в строительное проектирование.

Для нас становление и развитие основ теории надежности, современная общепринятая трактовка понятий надежности связывается, прежде всего, с революционными, для того времени, работами Н. С. Стрелецкого [20, 21] 1947-48 гг. и А. Р. Ржаницына [14, 15, 16] 1947-1952 гг. В этих работах и был заложен базис современной теории надежности, представляющий собой изложение двух фундаментальных научных идей:

- показана статистическая природа прочностных характеристик конструкции и параметров ее нагрузки и доказана необходимость вероятностной оценки работоспособности сооружения;

- заложены основы метода предельных состояний.

Впервые идеи статистического подхода к оценке прочности конструкций были изложены в работах М. Майера в 1926 г. [40], Н. Ф. Хоциалова в 1929 г. [22] и Н. С. Стрелецкого в 1947 г. [20]. Работы же А. Р. Ржаницына (1947-1952 гг.) были существенным развитием этих идей, их строгой математической формулировкой. (Подробную библиографию работ А. Р. Ржаницына и Н. С. Стрелецкого заинтересованный читатель найдет в монографии В. В. Болотина [4].)

В этом, далеко не полном, списке особое место занимает работа А. Р. Ржаницына 1952 г. [14] в которой изложена концепция безопасности сооружения, представляющая собой фундамент теории надежности.

Здесь принципиальные положения концепции безопасности сооружения А. Р. Ржаницыным формулируются как вероятностное решение проблемы  $G = R - E$  в предположении, что обобщенные сопротивление элемента  $R$  и нагрузка  $E$  суть случайные переменные, имеют нормальное распределение и взаимно не коррелируют:

$$p_f = P(R - E \leq 0) = P(G \leq 0) = \Phi\left[\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right], \quad (1)$$

где  $G$  – резерв прочности;  $p_f$  – вероятность отказа;  $\mu_G$  и  $\sigma_G$  – первые моменты распределения (математическое ожидание и стандарт);  $\Phi$  – нормальная функция распределения.

Вероятностным решением проблемы явилась формула для определения коэффициента запаса, позже названного «характеристикой безопасности»:

$$\beta = \mu_G / \sigma_G \quad (2)$$

и, в соответствии с определением (1), вероятность отказа

$$p_f = \Phi(-\beta). \quad (3)$$

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

(В тексте работы [14] есть замечание, без ссылки на публикацию, о том, что формула (3) была получена автором еще в 1947 г.)

Позже этот подход в западной литературе будет назван «метод второго момента» (*second-moment method*) [27] и станет основой проектирования конструкций заданной надежности.

Работа А. Р. Ржаницына 1952 г. [14] практически осталась неизвестной в мире. Только в 1957 г. один перевод ее на английский язык был опубликован в изданиях Канадского исследовательского института в Оттаве [45]. (Ссылку на эту работу можно видеть в известной монографии Р. Е. Мельчерса [42]). Тем не менее, забегая несколько вперед отметим, что сегодня практическая процедура оценки надежности элементов сооружений в Еврокоде полностью повторяет алгоритм работы [14], включая самоопределение характеристикой безопасности.

Пятидесятые – начало шестидесятых в прошлом веке были годами бурного развития нового направления в прикладной математике и инженерии – теории надежности, использующей фундаментальные принципы теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций. С тех пор исследования надежности развились в мощную прикладную математическую дисциплину, появилось новое понятие – «надежностное проектирование».

Появились новые фундаментальный исследования в теории вероятностей. Выдающийся русский математик Б. В. Гнеденко нашел три класса предельных распределений [34, 6, 7]. Можно полагать, что это и был первый шаг последовавшего развития теории надежности.

К этому времени, по выражению В. В. Болотина [4], проявилось более глубокое понимание принципов теории надежности и переход «от элементарных методов теории вероятностей к методам теории случайных функций». Три взаимосвязанные научные идеи легли в основу нового направления:

– внешние воздействия на конструкцию и ее поведение в процессе эксплуатации суть *случайные процессы*, протекающие во времени;

– надежность отождествляется с вероятностью нахождения параметров в некоторой допустимой области, тогда как выброс параметров с этой области трактуется как отказ;

– отказ конструкции является следствием постепенного накопления повреждений.

Эти принципы в полной мере нашли свое воплощение в фундаментальных исследованиях В.В. Болотина относящиеся к 1960-1970 гг. и опубликованных в монографиях [2, 3, 4, 5].

В 1978 г. публикуется монография А.Р. Ржаницына [17] в которой систематично изложены многолетние исследования автора представляющие теоретический аппарат расчета строительных конструкций на надежность и явившиеся базисом всех строительных норм Советского Союза.

В 1982 г. А. Р. Ржаницыным издан учебник курса строительной механики [18] в котором большой раздел посвящен методологии расчета строительных конструкций на надежность. В строительных вузах вводится обязательный курс теории надежности.

Публикуются исследования по теории случайных процессов [12], [19] открывающие новые пути становления теории надежности.

Что касается прикладных исследований надежности в проектировании строительных конструкций – назовем только наиболее известные монографии В. Райзера [11], Чиркова В. П [21].

Даже краткий перечень работ по теории надежности был бы неполным без украинских авторов. В Украине к восьмидесятым годам сложилась известная национальная школа. Назовем несколько фундаментальных исследований: И. Н. Коваленко [9], А. В. Перельмутер [10], С. Ф. Пичугин [11].

Названные выше монографии В. В. Болотина Б. В. Гнеденко и А. Р. Ржаницына, в семидесятых годах были переведены на английский язык и стали «катализатором» бурного развития теории надежности в Европе и в Америке. Начало этого периода в западной литературе связывают с работой К. А. Корнелла (Cornell, С. А.) [27].

Вот как описывает этот период Р. Е. Мельчерс в своей монографии [42]: «В силу ему присущей простоты, так называемый, «метод второго момента» становится весьма популярным, благодаря ранним работам Маера (1926) [40], Фрейденталя (1956) [33], Ржаницына (1957) [45] и Баслера (Basler, E., 1961) [24]. Однако понадобилось время до конца 1960-х годов чтобы оценить и принять идеи метода, из-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ложенного в обобщенной форме в работе Корнелла 1969 г. [27]».

В западной литературе эта работа считается основополагающей в современной теории надежности строительных конструкций. В ней центральная идея концепция безопасности сооружения А. Р. Ржаницына (1), (2), (3) представлена с широкими обобщениями. Характеристика безопасности получила элегантную геометрическую интерпретацию: в координатной плоскости обобщенных случайных переменных – сопротивления элемента  $R$  и нагрузки  $E$ . В этих координатах характеристика безопасности  $\beta$  представляет собой кратчайшее расстояние от начала координат до проектной точки, лежащей на кривой контура плотности распределения (в данном случае нормального распределения – это окружность).

Здесь же, в координатах  $ROE$ , вводится нормально распределенная линейная функция граничного состояния ( $G$  – резерв прочности в терминологии А. Р. Ржаницына), разделяющую координатную плоскость на две зоны – безопасную и разрушения:

$$G(\mathbf{X}) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n, \quad (4)$$

где  $X_i$  – базовые переменные функции граничного состояния;  $a_{i-1}$  – константы.

Позже эти обобщения послужили базой для дальнейшего развития метода в работах П. Тофт-Кристенсена, М. И. Бейкера [51] и О. Дитлевсена [28, 29], представивших концепцию определения характеристики безопасности в самом общем случае – произвольной функции распределения и нелинейной функции граничного состояния.

В 1974 г. А. М. Хасоифер и Н. К. Линд (А. М. Hasofer, N. C. Lind) в работе [35] ввели безразмерную функцию граничного состояния и, используя уравнения П. Тофт-Кристенсена и М. И. Бейкера [51] для определения расстояния до граничной криволинейной функции, предложили способ линеаризации проблемы.

Позже появляется большое количество работ, в которых характеристика безопасности анализируется с позиций аналитической геометрии, вводятся направляющие косинусы прямой соединяющей начало координат с проектной точкой на граничной функции [28], [39], [53, 54]. В практических приложениях эти па-

раметры получили название «коэффициенты чувствительности».

К 90 годам сложилась четкая математическая трактовка методов оценки надежности. К этому времени относятся работы О. Дитлевсена [28, 29], Д. Венциано [53, 54] обобщающие характеристику безопасности как геометрическую величину при произвольной функции граничного состояния и произвольном законе распределения. Публикуются монографии излагающие систематично исследования в теории надежности последних 20 лет [1, 39, 49].

Существенный вклад в систематизацию, обобщение и практические приложения исследований в теории надежности внесла большая группа ученых, работающих под эгидой Объединённого комитета безопасности конструкций – JCSS (Joint Committee on Structural Safety). Комитет был создан в 1971 г. по инициативе международных научно – исследовательских организаций в сфере строительства. Сегодня JCSS объединяет ученых 67 стран мира.

Ученые возглавлявшие комитет в разное время Дж. Д. Соренсен (J. D. Sørensen) [46, 47], М. Х. Фабер (M. H. Faber) [31], Й. Ферри-Боржес (J. Ferry-Borges) [32], Й. Шнейдер (J. Schneider) [48, 49], Р. Раквитц (R. Rackwitz) [44] опубликовали большое количество монографий, ставших учебниками по надежности, безопасности, долговечности и риску в сфере строительных конструкций.

Среди выдающихся работ комитета назовем фундаментальное теоретическое исследование, названное «Рекомендуемая вероятностная модель» (Probabilistic Model Code) [43] и стандарт ISO 2394-1998 «Общие принципы оценки надежности строительных конструкций» [37].

Большое количество исследований было опубликовано в 80-90 гг. в связи с разработкой EN 1990:2002 [25, 26, 31, 36, 41, 47, 50]. В конечном итоге Еврокод, в своей концепции надежности, впитал многое из перечисленного богатства теоретических исследований.

### Почему Еврокод?

Прежде всего, о понятии «Еврокод». Так принято нынче в русскоязычной, да и украинской литературе называть пакет европейских нормативных документов проектирования объектов строительства.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Мотивов несколько. Во-первых, внедрение этих стандартов является одним из составляющих элементов украинской государственной политики интеграции с Евросоюзом. На государственном уровне приняты законы и постановления о приближении законодательной базы Украины к европейской. Четко сформулированная государственная концепция адаптации национальной нормативной базы с нормативами ЕС, ее интеграции в европейское нормативно-правовое пространство технического регулирования в строительстве.

Во-вторых, сегодня экспертами всего мира признается, что Еврокод является новейшей, наиболее совершенной базой нормативного регулирования в строительстве. И действительно, в течение 30 лет в разработке, введении и научном сопровождении принимают активное участие видные специалисты большинства стран Европы. Благодаря этому Еврокод адсорбировал современные научные достижения в теории сооружений, механике грунтов, механике и физике строительных материалов.

В-третьих, Еврокод – это первая в мире система проектирования, в основу концепции которой, положен принцип управляемой надежности и долговечности. Безусловно, к этому все системы проектирования, имели центральную цель гарантировать безопасность сооружения в течение всего срока эксплуатации, однако только в Еврокоде проектанту предоставлено аппарат управления надежностью объекта строительства в процессе проектирования.

Это означает, что в отличие от всех норм, применявшихся ранее и имевших "скрытую" надежность, об уровне которой мы только догадываемся, Еврокод имеет аппарат "управляемой" надежности. Уровень надежности сооружения проверяется проектантом с помощью количественного показателя и может изменяться по требованию заказчика или иного компетентного органа. В этой концепции безусловная принципиальная новизна европейской системы нормативного регулирования в строительстве.

#### **Концепция надежности в Еврокоде. Определение термина «надежность»**

В одном из первых пунктов Еврокода EN 1990 [8, 30] понятие «надежность» определяется так:

*«Способность конструкции или ее элемента выполнять определенные функции в течение всего проектного срока службы. Надежность обычно выражается в вероятностных показателях.»*

*Примечание. Надежность охватывает безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность конструкции».*

Примечание к определению термина призвано подчеркнуть, что надежность является одновременно мерой безопасности, эксплуатационной пригодности и долговечности конструкции.

Надежность наряду со своим основным назначением – характеризовать уровень безопасности сооружения в течение жизненного цикла эксплуатации имеет и другую функцию – служит инструментом оптимизации качества проекта. Так в EN 1990:2002 [30], находим: *«Следует отметить, что значение параметра надежности является формальным или мнимым показателем вероятности разрушения. Он используется скорее, как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты разрушения конструкции».*

Численным параметром надежности сооружения/элемента есть вероятность того, что не будет превышено предельное состояние, обозначается  $P$ . Вероятность, дополняющая  $P$  до 1 трактуется как отказ и обозначается  $p_f$ .

В EN 1990 задается вероятность отказа, выраженной через характеристику безопасности и нормальную функцию распределения (табл. 1).

#### **Форматы надежности в Еврокоде**

Еврокод предоставляет пользователю несколько процедур оценки надежности на этапе проектирования. Классификация теоретических подходов оценки надежности в [31] выполнена трехуровневой.

Уровень I – это, так называемый, полувероятностный метод, классический подход, в котором частные коэффициенты надежности задаются в рамках нормативного документа и расчеты имеют вид детерминистических. По поводу термина «*полувероятностный*» нужно заметить, что это название не есть общепринятым, и даже, в некоторой степени, некорректно. В действительности все необходимые расчеты в рамках теории вероятностей и математиче-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ской статистики выполнены, но выполнены не проектировщиком а разработчиками норм.

Применение методики уровня I не требует от проектанта выполнения каких-либо вероятностных расчетов. Требования проектной надежности формулируются, как удовлетворения неравенств вида:

$$E(F_k, \gamma_k) \leq R(a_k, f_k, \gamma_k), \quad (6)$$

где  $E$  – обобщенное внешнее усилие;  $R$  – обобщенное сопротивление элемента сооружения;  $F_k$  – внешние усилия и воздействия;  $a_k$  – геометрические параметры;  $f_k$  – механические характеристики материалов;  $\gamma_k$  – коэффициенты надежности (в современной терминологии – «частные коэффициенты надежности»), которые получены из соотношения:

$$\gamma_k = R_k / R_d, \quad (7)$$

где  $R_k$  – характеристическое значение обобщенного сопротивления элемента сооружения;  $R_d$  – проектное значение обобщенного сопротивления элемента сооружения

Уровень II – аналитическая процедура теории надежности, основанная на допущениях А. Р. Ржаницына (1), (2), (3), называемая в Еврокоде метод первого порядка оценки надежности FORM (First Order Reliability Method). Метод FORM является базовым для Еврокода, несмотря на то, что рассматривается в Еврокоде как первое приближение, вполне приемлемое для практических целей. Далее эта процедура будет изложена достаточно подробно.

Уровень III – точная процедура теории надежности, основанная на аналитическом или численном вычислении интеграла вероятности (8) или (8а) при произвольных функциях распределения нагрузки и сопротивления, называемая «метод второго порядка оценки надежности SORM (Second Order Reliability Method)».

$$p_f = P(R - E \leq 0) = \iint_D f_{RE}(r, e) dr de, \quad (8)$$

где  $f_R(r)$  – функция плотности вероятности сопротивления  $f_S(s)$  – функция плотности вероятности нагрузки;  $D$  – область разрушения, для которой функция граничного состояния  $G < 0$ .

Соотношение (8) может быть представлено и в другой форме – в виде интеграла-свертки:

$$p_f = P(R - E \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_E(x) dx, \quad (8a)$$

где  $F_R(x)$  – интегральная функция распределения сопротивления  $R$ ;  $f_E(x)$  – функция плотности вероятности нагрузки  $E$ .

Кроме того, в EN 1990 предусмотрена возможность проектирования на основании лабораторных исследований образцов материалов, их статистических характеристик. Принципы же оценки надежности остаются неизменными – применение методологии уровня II, т.е. метода FORM.

**Оценки надежности по методологии FORM**

Метод II требует от проектанта вероятностных расчетов. Условие безопасности формулируется как решение проблемы:  $G = R - E$ .

Как упоминалось выше, этот подход основан на интегральной вероятности отказа двух переменных: обобщенного сопротивления элемента  $R$  и обобщенной нагрузки  $E$  при предположениях что  $R$  и  $E$ , *суть случайные переменные, имеют нормальное распределение и взаимно не коррелируют*:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

и

$$\beta = \mu_G / \sigma_G, \quad (2)$$

где  $p_f$  – вероятность отказа;  $G$  – функция граничного состояния («резерв прочности» в терминологии А. Р. Ржаницына);  $\mu_G$  и  $\sigma_G$  – первые моменты распределения (математическое ожидание и стандарт) функции граничного состояния  $G$ ;  $\Phi$  – нормальная функция распределения;  $\beta$  – характеристика безопасности («индекс надежности» в терминологии Еврокода).

Учитывая, что обобщенные переменные  $R$  и  $E$  имеют нормальное распределение, функция рабочего состояния  $G$  также будет иметь нормальное распределение. Следовательно, первые моменты распределения функции  $G$  можно выразить через первые моменты обобщенных переменных  $R$  и  $E$ :

$$\mu_G = \mu_R - \mu_E, \quad (9)$$

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\sigma_G = (\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5} \quad (9a)$$

и соответственно характеристику безопасности (2) в классической форме [14,27]:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (10)$$

здесь  $\mu_R$  – среднее значение обобщенного сопротивления элемента сооружения;  $\mu_E$  – среднее значение обобщенной нагрузки элемента сооружения;  $\sigma_R$  – среднее квадратичное отклонение (стандарт) обобщенного сопротивления элемента сооружения;  $\sigma_E$  – среднее квадратичное отклонение обобщенной нагрузки элемента сооружения.

Еврокод предлагает также альтернативную формулу для случая лог-нормального распределения:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\ln(\mu_R / \mu_E)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (10a)$$

Графическая интерпретация характеристики безопасности в пространстве обобщенных переменных  $E$ ,  $R$  и вероятностей отказа  $p_R$ ,  $p_E$  приведена на рис. 1. На рис. 2 еще раз приведена графическая интерпретация характеристики безопасности в плоскости безразмерных переменных  $E/\sigma_E$ ,  $R/\sigma_R$ .

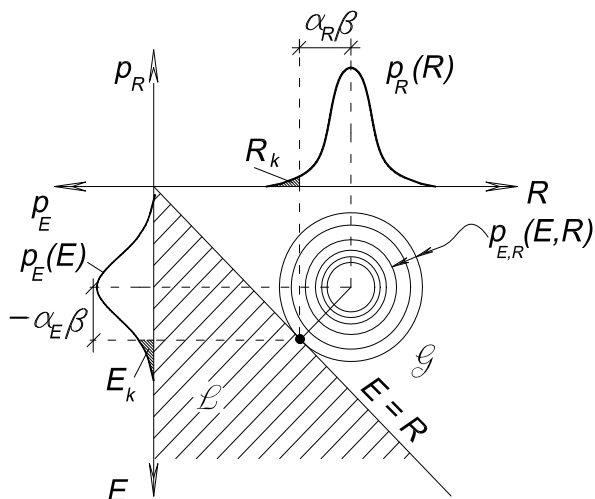


Рис. 1. Характеристика безопасности  $\beta$

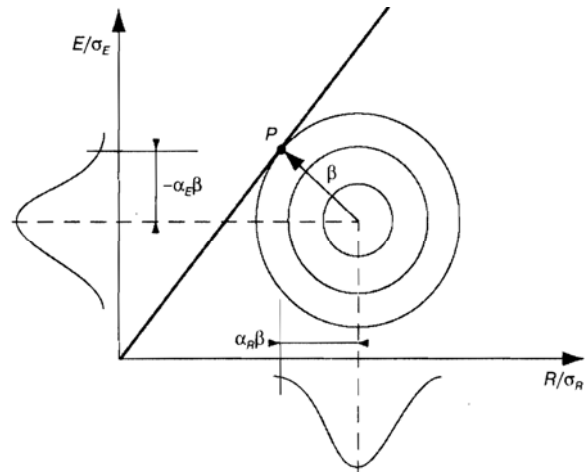


Рис. 2. Характеристика безопасности в плоскости безразмерных переменных  $E/\sigma_E$ ,  $R/\sigma_R$

Надежность сооружения на уровне II достигается проверками значения характеристики безопасности (10) в предельных состояниях первой и второй групп. В необходимых случаях должна быть осуществлена проверка по усталости.

Минимально допустимые уровни характеристики безопасности для трех типов предельных состояний задаются в EN 1990.

Таблица 1

**Минимальные проектные значения характеристики безопасности**

Предельное состояние	Характеристика безопасности	
	1 год	50 лет
Несущая способность	4,7	3,8
Усталость		1,5...3,8
Эксплуатационная пригодность	2,9	1,5

Рекомендованные минимально допустимые значения характеристики безопасности тракуются Еврокодом «как разумный минимум требований, полученный путем статистических расчетов» [30].

Данные табл. 1 приняты в Еврокоде следуя рекомендациям европейского стандарта ISO 2394: 1998 [37], где для базового периода в 1 год характеристика безопасности по несущей способности принята равной  $\beta_1 = 4,7$ . Это значение соответствует приемлемому уровню рис-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ка летальных случаев в обществе  $p_f = 10^{-6}$  в год.

Для периода в  $n$  лет характеристика безопасности вычисляется по приближенной формуле Туркстра (Turkstra C.) [52]:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n, \quad (18)$$

$$P_n = (1 - P_1)^n. \quad (18a)$$

Так по этой формуле, для периода повторения  $n = 50$  лет, характеристика безопасности по несущей способности равна 3,8 (табл. 1).

Расчетные значения внешнего воздействия на сооружение  $E_d$  и сопротивления сооружения  $R_d$  определяются так, чтобы вероятность получения более неблагоприятного значения была следующей

$$P(E > E_d) = \Phi(\alpha_E \beta), \quad (11)$$

$$P(R > R_d) = \Phi(\alpha_R \beta), \quad (11a)$$

где  $\alpha$  – коэффициент чувствительности метода FORM (направляющие косинусы см. рис. 1 и 2):

$$(-1 \leq \alpha \leq +1); \quad (12)$$

$\beta$  – рекомендованное в EN 1990:2002 [30] значение характеристики безопасности (см. табл. 1).

Коэффициенты чувствительности вычисляются через стандарты  $\sigma_E$  и  $\sigma_R$  (см. рис. 1 и 2):

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R / \sigma_E}{\sqrt{1 - (\sigma_R / \sigma_E)^2}}; \quad \alpha_E = \frac{1}{\sqrt{1 - (\sigma_R / \sigma_E)^2}}. \quad (13)$$

С достаточной для практических целей точностью коэффициенты (13) могут быть приняты:

$$\alpha_R = 0,8; \quad \alpha_E = -0,7 \quad (14)$$

при соблюдении условия [30]:

$$0,16 < \sigma_E / \sigma_R < 7,6. \quad (15)$$

В практических расчетах Еврокод рекомендует воспользоваться зависимостью эквивалентной вероятности отказа (3), записанной

через параметры нормального закона распределения  $\mu$  и  $\sigma$ :

$$\mu_E - \alpha_E \beta \sigma_E \leq \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R. \quad (16)$$

Пользуясь соотношением (16) получают значения частных коэффициентов надежности  $\gamma_i$  для переменной  $X_i$ , входящей в выражение обобщенной нагрузки  $E$  или сопротивления  $R$ :

$$\gamma_i = (\mu_i - \alpha_i \beta \sigma_i) / X_{ki}, \quad (17)$$

где  $X_{ki}$  – характеристическое значение  $i$ -той переменной.

Выражения проектных (расчетных) значений  $X_{di}$ , входящих в формулу (17) для частных коэффициентов надежности в случае логнормального распределения и Гумбеля приведены в табл. 2

Таким образом, для оценки надежности проектируемых элементов по Еврокоду на уровне II потребуется иметь параметры распределения всех случайных переменных, которые входят в (17), т.е. материалов, нагрузок и, возможно, топологических данных.

Таблица 2

Проектные значения переменных

Распределение	Проектные (расчетные) значения $X_d$
Нормальное	$\mu - \alpha \beta \sigma$
Логнормальное	$\mu \exp(-\alpha \beta V)$ для $V = \sigma / \mu < 0,2$
Гумбеля	$u - \frac{1}{a} \ln \{-\ln \Phi(-\alpha \beta)\}$ где $u = \mu - \frac{0,577}{a}$ ; $a = \frac{\pi}{\sigma \sqrt{6}}$

Что касается оценки надежности на уровне III (SORM), то Еврокод не дает подробных рекомендаций, ограничиваясь определением: «точные методы». В самом общем виде, выше

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

были изложены форматы точной оценки надежности.

**Выводы**

Как видно из изложенного, основным принципом концепции надежности в Еврокоде есть обеспечение безопасности зданий и сооружений. Для оценки надежности проектируемых элементов Еврокод предлагает проектировщику четыре формата. Наиболее употребительный из них – метод первых двух моментов стал сегодня признанным инструментом управления надежностью проектируемых конструкций не только в странах Европы, но и во всем мире.

Очевидно, что принятая в Еврокоде концепция надежности есть не только мерой безопасности сооружения, но и критерием оптимальности проекта, долговечности сооружения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аугусти, Г., Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] : пер. с англ. / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. – Москва : Стройиздат, 1988.
2. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1984.
3. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1971.
4. Болотин, В. В. Статистические методы в строительной механике [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1965.
5. Болотин, В. В. Статистические методы в строительной механике [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1961.
6. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей [Текст] / Б. В. Гнеденко. – Москва : Гостехиздат, 1954.
7. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965.
8. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 «Еврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT)» [Текст].
9. Коваленко, И. Н. Исследования по анализу надежности сложных систем [Текст] / И. Н. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1975.
10. Пичугин, С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий [Текст] / С. Ф. Пичугин. – Полтава : ООО АСМИ, 2009.
11. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – Киев : Укрниипректстальконструкция, 2000.
12. Пугачев, В. С. Теория случайных функций [Текст] / В. С. Пугачев. – Москва : Гостехиздат, 1957.
13. Райзер, В. Д. Теория надежности в строительном проектировании [Текст] / В. Д. Райзер. – Москва : изд-во АСВ, 1998.
14. Ржаницын, А. Р. Применение статистических методов в расчетах сооружений на прочность и безопасность [Текст] / А. Р. Ржаницын // Строительная промышленность. – Москва : 1952. – № 6.
15. Ржаницын, А. Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала [Текст] / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройвоенмориздат. – 1949.
16. Ржаницын, А. Р. Статистический метод определения допускаемых напряжений при продольном изгибе [Текст] / А. Р. Ржаницын // Научное сообщение ЦНИПС – Вып. 3. – Москва : Стройиздат, 1951.
17. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат. – 1978.
18. Ржаницын, А. Р. Строительная механика [Текст] / А. Р. Ржаницын. – Москва : Высш. школа, 1982.
19. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А. А. Свешников. – Москва : Наука, 1968.
20. Стрелецкий, Н. С. Об исчислении запасов прочности сооружений [Текст] / Н. С. Стрелецкий // Сборник трудов МИСИ. – 1938. – № 1.
21. Стрелецкий, Н. С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений [Текст] / Н. С. Стрелецкий. – Москва : Стройиздат, 1947.
22. Хоциалов, Н. Ф. Запасы прочности [Текст] / Н. Ф. Хоциалов // Строительная промышленность. – 1929. – № 10.
23. Чирков, В. П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций [Текст] / В. П. Чирков. – Москва : Транспорт, 1980. – 133 с.
24. Basler, E. Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken [Text] / E. Basler // Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, 4, 1961.
25. Calgaro, J. A. Introduction aux Eurocodes – Securite des Construction et Bases de la Theorie de



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- la Fiabilite [Text] / J. A. Calgaro // Presses de l'ENPC, Paris, 1996.
26. CIRIA (1977). Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes [Text].
  27. Cornell, C. A. A Probability Based Structural Code [Text] / C. A. Cornell // ACI-Journal No. 12, Vol. 66, 1969. – pp. 974-985.
  28. Ditlevsen, O. Generalized second moment reliability index. Journal of Structural Mechanics, 7, 1979 435-451
  29. Ditlevsen O. Structural Reliability Methods [Text] / O. Ditlevsen, H. O. Madsen. // John & Wiley Sons Ltd, Chichester, 1996/
  30. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. European Committee for Standardization. Brussels: 2003.
  31. Faber, M. H. and Sørensen, J.D. (2003). Reliability based code calibration – The JCSS: 2003 Інтернет ресурс: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>
  32. Ferry-Borges, J. Structural Safety [Text] / J. Ferry-Borges, M. Castanheta // Laqboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lissabon, 1971.
  33. Freudenthal, F. M. Safety, reliability and structural design J. of Structural [Text] / F. M. Freudenthal // Div. Proc. ASCE, 87 ST3, 1961.
  34. Gnedenko, B. V. (1943) Sur la distribution limit du terme maximum d'une serie aleatoire [Text] / B. V. Gnedenko. – Ann. Math. – № 44.
  35. Hasofer, A. M. An Exact and Invariant First Order Reliability Format [Text] / A. M. Hasofer, N. C. Lind // Proc. ASCE, J. Eng.Mech. Div., 1974. – pp. 111-121.
  36. Holicky, M. Partial factors for assessment of existing reinforced concrete bridges [Text] / M. Holicky, J. Markova, M. Sykora // Proceedings of the 6th International Probabilistic Workshop, Darmstadt 2008.
  37. ISO 2394: 1998. General principles on reliability for structures [Text] : 2nd ed. Geneve, Switzerland: ISO, 1998.
  38. JCSS, Probabilistic Model Code [Text] // The Joint Committee on Structural Safety, Geneve: 2001.
  39. Madsen, H.O. Methods of Structural Safety [Text] / H. O. Madsen, S. Krenk, N. C. Lind // Prentice Hal, Inc. Englewood Cliffs, NJ 07632, 1986.
  40. Mayer, M. Die Sicherheit der Bauwerte und ihre Berechnung nach Granz kräften statt nach zulässigen Spannungen [Text] / M. Mayer // Springer Verlag, Berlin, 1926
  41. Melchers, R. E. Reliability of parallel structural systems [Text] / R. E. Melchers // J. Structural Div., ASCE, 109 (11) 1983. – P. 2651-2665.
  42. Melchers, R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction [Text] / R. E. Melchers // Second Edition. John Wiley & Sons. – New York, 1999.
  43. Probabilistic Model Code ISBN 978-3-909386-79-6. Інтернет ресурс: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>
  44. Rackwitz, R. Static properties of reinforcing steel. Working notes, JCSS Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance model, 1996 <http://www.jcss.byg.dtu.dk>
  45. Rzhantyn, R. (1957) It is Necessary to Improve the Standards of Building Structures [Text], A Statistical Method of Design of Building Structures, Allan, D. E. (transl.), Technical Translation No. 1368, National Research Council of Canada, Ottawa
  46. Sørensen, J. D. Reliability Based Optimization of Structural Systems [Text] / J. D. Sørensen // Proceedings of the 13th IFIP conference. V. 113: 1987.
  47. Sørensen, J. D. Optimal Reliability – Based Code Calibration [Text] / J. D. Sørensen, I. B. Kroon and M. H. Faber // Structural Safety, Vol. 14, 1994/ – pp. 197-208.
  48. Schneider, J. Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Grundwissen für Ingenieure [Text] / J. Schneider // VDF, Hochschulverlag AG and der EH Zürich, 1994
  49. Schneider, J. Introduction to Safety and Reliability of Structures IABSE [Text] / J. Schneider. – Zurich, 1997.
  50. Stewart, M. Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems [Text] / M. Stewart, R. E. Melchers // Chapman & Hall, 1997.
  51. Thoft-Christensen, P. Structural Reliability Theory and Its Applications [Text] / P. Thoft-Christensen, M. J. Baker/ – Springer Verlag, 1982.
  52. Turkstra C. Theory and Structural Design [Text] : Study No. 2 / C. Turkstra // University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Canada, 1972.
  53. Veneziano, D. Contributions to Second Moment Reliability Theory [Text] / D. Veneziano. Res. Rept. R74-33, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, USA, 1974.
  54. Veneziano, D. New index of reliability [Text] / D. Veneziano // J. Engrg. Mech. Div., Proc. ASCE, N 105, 1979. – pp. 277-296.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО\*

\* Кафедра «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, ел. пошта albert.lantoukh@gmail.com

## КОНЦЕПЦІЯ НАДІЙНОСТІ В ЄВРОКОДІ

**Мета.** Глобальною метою роботи є аналіз моделей надійності елементів, що проектуються у відповідності до Єврокоду. **Методика.** Теоретичне вишукування. **Результати.** Виконано порівняння моделей **Наукова новизна.** Зроблені важливі узагальнення і отримані порівняльні кількісні оцінки моделей. **Практична значимість.** Формулюється практичний апарат управління надійністю на етапі проектування.

*Ключові слова:* Єврокод; модель надійності; характеристика безпеки

ALBERT I. LANTOUKH-LIACHTCHENKO\*

\* Dep. of «Bridges and Tunnels», National Transport University, 1 Suvorova, Str., Kiev, Ukraine, 01010, tel/fax +38 (044) 280 79 78, e-mail albert.lantoukh@gmail.com

## CONCEPT OF RELIABILITY IN EUROCODES

**Purpose.** The global objective of the work is to analyze models of reliability elements, designing in accordance with Eurocode. **Methodology.** Theoretical study. **Findings.** A comparison of model. **Originality.** Made important synthesis and the quantitative comparative evaluation models. **Practical value.** Formed a practical apparatus reliability management in the design process.

*Keywords:* Eurocode; reliability model; reliability factor

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. В. Кулябко (Украина), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина).*

Поступила в редколлегию 20.09.2014.

Принята к печати 28.09.2014.