

## О НАЗНАЧЕНИИ ТРЕБУЕМЫХ МЕР НАДЕЖНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. В. Тур<sup>1</sup>, А. В. Тур<sup>2</sup>, С. С. Дереченник<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь, profurvic@gmail.com

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

<sup>3</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

### Реферат

В соответствии с действующим ТКП EN1990 [5] конструкции следует проектировать таким образом, чтобы в течение проектного срока службы, с соответствующим уровнем надежности и оптимальными экологическими затратами, они: (1) воспринимали все воздействия и влияния, появления которых следует ожидать в процессе эксплуатации; (2) удовлетворяли требованиям пригодности к нормальной эксплуатации и (3) долговечности.

Перечисленные требования являются взаимосвязанными и совместно формулируют целевые значения мер надежности, вносимые в нормы. Принятая в настоящее время классификация конструкций (классы СС), включенная в актуальный EN1990 [8], не нашла широкого применения при реальном проектировании, основана на неясной качественной дифференциации и описании последствий отказа конструкции или конструктивной системы. Результаты анализа различных подходов к назначению требуемых мер надежности (анализ рисков с "F-N" кривыми, монетарная оптимизация, принцип предельных затрат на спасение жизни, LQI), приведенные в статье, позволили сделать вывод о том, что целевые уровни надежности следует устанавливать, рассматривая экономическую (стоимостную) оптимизацию совместно с принципом предельной стоимости спасения жизни (LQI-принцип), оба эти подхода учитывают последствия отказа и стоимость мер обеспечения безопасности.

**Ключевые слова:** риск, оптимизация, надежность, вероятность отказа.

### ABOUT TARGET RELIABILITY LEVELS ESTABLISHING IN NATIONAL CODES FOR STRUCTURAL DESIGN

V. V. Tur, A. V. Tur, S. S. Derechennik

### Abstract

According to EN1990 [8] a structure shall be designed and executed in such way that it will, "during its intended life, with appropriate degrees of reliability and in an economical way: (1) sustain all actions and influences that are likely occur during its execution and use; (2) meet the specified serviceability requirements for the structure; (2) meet the specified reliability requirements".

For the purpose of reliability differentiation, consequences classes (CC) was established in EN1990 [8] by considering the consequences of failure or malfunction of structure. Depending on the structural form and expected failure mode particular members may be designed in the same, higher or lower consequences class than for the entire structure. As was shown in [7], structural codes, such as Eurocodes, aim to delivering structures with an appropriate degree of reliability, while taking into account economic criteria. Procedures and current codified criteria for risk and reliability differentiation inherent in actual standards, and especially in the currently valid and proposed new versions of the EN1990 are reviewed in this paper.

It is shown that the classification of structures in EN1990 based on consequences of failure is an approach that has not yet been widely implemented in everyday design [7]. As was shown in [7], a major reason is that the description of the consequences in the proposed classes is rather vague and unclear. Moreover, the target reliability levels recommended in current documents are inconsistent in terms of criteria and their parameters. Therefore, practical rules for classification of structures and for implementation are still need. Based on the results of analysis it is recommended to specify the target reliability parameters considering economic (monetary) optimization and the marginal life-sawing costs principle (LQI-index), as both these approaches take into account the failure consequences and the costs of safety measures.

**Keywords:** risk, optimization, reliability, probability of failure.

### Введение

Проверки надежности конструкций (конструктивных систем) в рамках действующего в настоящее время метода проектирования по предельным состояниям основаны на сравнении некоторых условных мер надежности (в рамках действующих норм – вероятностей отказа и связанных с ними индексами надежности) с их допустимыми или целевыми значениями, содержащимися в нормативных документах [5, 8, 10, 12, 25]. Процедуру оценивания надежности конструктивной системы, очевидно, можно считать полной, если адекватно определены сравниваемые условные меры надежности как в левой, так и в правой частях базового неравенства:

$$P_f \leq P_{tag} \quad (1)$$

или

$$\beta_f \geq \beta_{tag}, \quad (2)$$

где  $P_f$ ,  $\beta_f$  – вероятность отказа и связанный с ней функцией Лапласа индекс надежности, соответственно (в предположении нормального или логнормального распределения базисных переменных);

$P_{tag}$ ,  $\beta_{tag}$  – целевые значения вероятности отказа и индекса надежности, соответственно.

Следовательно, при проверке надежности конструкции следует ответить, как минимум, на следующие вопросы:

1. Какова допустимая или целевая вероятность отказа, которая может быть принята в качестве нормируемой меры надежности в неравенствах (1) и (2)?
2. Для какого уровня оценивания (отдельный элемент конструкции, конструкция, конструктивная система в целом) следует выполнять нормирование мер надежности? Определять ли вероятности отказа элемента конструкции или конструктивной системы в целом? Как соотносятся эти вероятности?
3. Следует ли постоянно прибегать к вычислению вероятностей отказа конструкции или возможно использовать упрощенные полувероятностные методы, обеспечивающие достижения требуемого (нормируемого) уровня надежности (например, как это принято в рамках метода частных коэффициентов), в том числе для конструктивной системы в целом при выполнении нелинейных расчетов.

Ответы на поставленные вопросы должны быть даны с учетом особенностей, присущих оцениванию надежности строительных конструкций, которые, в общем случае, могут быть представлены следующим образом:

- строительные конструкции обладают сравнительно большой надежностью (например, по сравнению с элементами электроники), и их отказ является довольно редким событием, в силу чего вероятность отказа чрезвычайно мала. Для прямого статистического оценивания традиционными методами потребовался бы очень большой объем выборки, что реализовать практически невозможно;
- надежность необходимо оценивать не только для однотипных конструкций (например, изготавливаемых и возводимых по типовым сериям), но и единичных объектов;
- и, наконец, согласно ([2], с. 64), “сроки службы сооружений очень высоки, даже если можно сделать приемлемые выводы на основе статистики повреждений, эти выводы появятся только тогда, когда они, в лучшем случае, будут иметь исторический интерес”.

Несмотря на то, что европейские нормы, а в частности EN1990 [5, 8], применяются уже более 10 лет в практике проектирования в странах Европы и примерно столько же в Республике Беларусь, ряд положений, в частности, касающиеся дифференциации надежности, не получили широкого применения в практике проектирования. Основной причиной того, что концепция дифференциации надежности для конструкций, согласно EN1990 [8], не получила практического применения можно считать следующее обстоятельство. Принятая классификация (классы по последствиям отказа (CC) по ISO 2394:1998 [25] с переходом к классам надежности (RC) по EN1990 [8]) является довольно расплывчатой, т. к. не опирается на ясные количественные или качественные показатели. Кроме того, как утверждается в [7], рассуждая о дифференциации надежности для конструкции (или конструктивной системы здания), речь, по существу, идет о надежности отдельных сечений, т. к. меры надежности в EN1990 [8] относятся к отдельному конструктивному элементу.

Вычисление вероятностей отказа сопряжено с целым рядом проблем (и не только вычислительного характера), начиная от выбора адекватных функций распределения для базисных переменных и нормируемых параметров, заканчивая выбором продолжительности оценочного или базисного (реферативного) периода, для которого следует выполнять прямое оценивание надежности, либо калибровать частные коэффициенты полувероятностного метода [8] для целевых мер надежности. Получение адекватного решения усложняется тем, что при формулировании функций состояния для вычисления вероятностей отказа принят ряд упрощений, допущений, неточностей и т. д., повышающих неопределенность такого оценивания.

Конечно, можно сослаться на то, что согласно ISO 2394:1998 [25] и EN1990 [8], вычисляемые вероятности отказа “следует рассматривать как некоторые формальные числа, предназначенные для разработки согласованных правил и норм проектирования как внутри системы нормирования одной страны, так и различных стран”. Но тогда нужно согласиться и с тем, что в настоящее время мы проектируем конструкции с неизвестным уровнем надежности (“Существующие методы проектирования не позволяют оценивать надежность конструкций и, тем более, проектировать их с заданным уровнем надежности” В. Д. Райзер [1], с. 27).

В данной статье детально проанализированы общепринятые подходы к назначению допустимых целевых мер надежности, введенных в действующие EN1990 [8], проект нового rEN1990 [9], а так же ISO 2394:2015 [12], критически рассмотрены методы определения вероятностей отказа и вычисления индексов надежности, сформулированы некоторые собственные предложения, касающиеся расчета вероятностей отказа как для отдельных конструктивных элементов, так и для конструктивных систем в целом.

Интерес к вопросу нормирования целевых мер надежности обусловлен ещё и тем, что в Республике Беларусь вступила в действие новая национальная система нормирования, в рамках которой осуществляется переработка действующих нормативных документов, основным из которых является новый СН 2.01.01-19, рассматриваемый, по сути, в качестве аналога ТКП EN1990 [5]. Ситуация несколько усложняется тем обстоятельством, что декларированное введение к

2020 году Еврокодов второго поколения (G-2) не состоится, скорее всего, и к 2025. В этой ситуации принятие национальных требований к мерам надежности может войти в противоречие с единой унифицированной системой надежности, принятой для стран Европы.

Согласно [8], целевые требования к надежности конструкций следует устанавливать на национальном уровне. При этом требования надежности устанавливаются, опираясь на анализ рисков с учетом следующих аспектов:

- минимальные требования надежности зависят от социально-экономического потенциала общества и его готовности инвестировать в безопасность жизнедеятельности;
- целевые требования надежности зависят от ожидаемых последствий отказа, включая расходы, связанные с обеспечением мер безопасности, включая проектирование, возведение, обслуживание, ремонт в течение некоторого реферативного периода времени, для которого она проектируется.

При этом требования надежности должны быть выполнены для всех возможных сценариев отказа, включая отказ отдельного элемента, разрушение значительной части или всей конструктивной системы в целом.

В нормах [5, 8] подчеркивается, что установленные требования надежности, относящиеся к проверкам предельных состояний несущей способности (ULS) и эксплуатационной пригодности (SLS), не учитывают грубых человеческих ошибок, а, в ряде случаев, эффектов, связанных с деградацией материалов. Следовательно, вероятности отказа, приведенные в нормах, не связаны напрямую с фактически наблюдаемой частотой отказов, которые в значительной степени зависят от эффектов, обусловленных человеческими ошибками.

В соответствии с [15], известные методы, применяемые при установлении целевых мер надежности, можно условно подразделить на две группы:

А. Неэкономические методы оптимизации, основанные:

- на статистике аварий;
- сравнении с другими (подобными) катастрофами;
- сравнении с детерминистическим проектным методом.

Б. Методы экономической оптимизации, основанные:

- на анализе инвестиций, требуемых для исключения причин, вызывающих отказ;
- минимизации полных экономических затрат;
- анализе соответствий выгод и затрат.

Применительно к строительной практике, первая группа методов, как было показано ранее, является довольно приближенной, содержит ряд неопределенностей и трудно применима на практике.

## 1 Подходы, применяемые при дифференциации целевых мер надежности в рамках действующих норм

### 1.1 Анализ рисков. “F-N”-кривые

В последние десятилетия расчетная процедура для оценивания риска достаточно хорошо разработана и успешно применяется в различных областях техники. В общем случае для расчета рисков на практике используют простую функцию, включающую произведение двух составляющих риска: вероятности отказа ( $P_F$ ) и последствий отказа ( $C_F$ ):

$$R = P_F \cdot C_F. \quad (3)$$

Процедура определения вероятности отказа, являющаяся базовой характеристикой при оценивании риска, требует отдельного рассмотрения, поэтому сейчас подробнее остановимся на подходах к оцениванию последствий отказа.

При т. н. монетарном оценивании рисков последствия отказа выражают, как правило, в монетарных единицах, в том числе и в терминах травмированных или утративших жизнь людей в результате реализации одного события отказа. При этом могут применяться и другие индикаторы риска [20]. Таким образом, одним из главных этапов при анализе рисков является количественное выражение последствий отказа в терминах “стоимости отказа” или “затрат, связанных с отказом”. Как показано в основополагающих работах, относящихся к оцениванию рисков [11, 14-18], последствия

отказа гражданских зданий подразделяют на следующие основные группы: (1) гуманитарные потери, связанные с человеческими жертвами (травмированные и утратившие жизнь); (2) экономические потери, выраженные прямым ущербом и непрямыми (косвенными) потерями при отказе конструктивной системы или значительной её части; (3) экономический ущерб для окружающей среды; (4) утрата культурного наследия. Для общего совместного оценивания всех видов потерь используют процедуру монетаризации.

Согласно [16–18] экономическая целесообразность возведения здания оценивается исходя из совместного рассмотрения стоимости последствий отказа (прямой и косвенный ущерб), начальной стоимости возведения и обслуживания здания, включая стоимость принятых мер для обеспечения безопасности. В работах [7, 20, 22] подчеркивается, что в реальной практике вычисления рисков для зданий и сооружений имеют место следующие сложности:

- вычисление вероятностей отказа очень низкого уровня (зачастую на уровне не более  $10^{-5}$ /год) выполняют, опираясь на довольно ограниченную базу исходных данных (сложности, связанные с оцениванием “хвостов” распределений функции состояния);
- вычисление в монетарных единицах последствий для рассматриваемых сценариев отказа базируется на моделях сопротивления, включающих базисные переменные и входные параметры, часто получаемые из предшествующего опыта. При этом неопределенность в реализации наиболее опасного сценария разрушения при оценивании отказа системы традиционными методами создает неопределенности в ожидаемых величинах как потенциальных жертв, так и других видов потерь.

Во многих практических рекомендациях и указаниях, относящихся к анализу рисков [15, 16], социально-гуманитарный риск проекта представляют в форме т. н. функции “F-N”, показывающей зависимость между годовой частотой F особых событий (отказов) и потенциальным числом жертв N (см. рисунок 1). Такие кривые разработаны для различных отраслей промышленности.

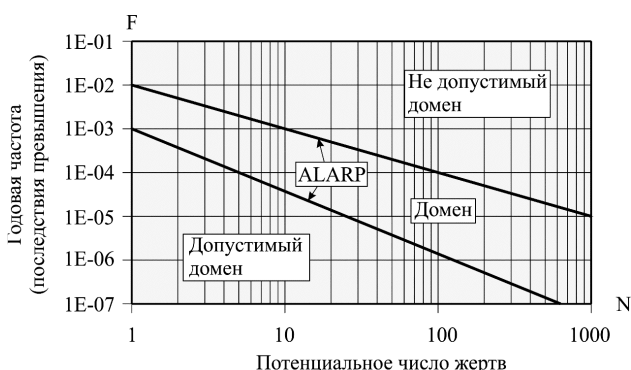


Рисунок 1 – Характерная диаграмма “F-N” [15]

Так, например, в соответствии с диаграммой “F-N”, показанной на рисунке 1, риск утраты жизни группы из 10 человек в каждые 100 лет является недопустимым и должен быть снижен любой ценой. В то же время результат гибели 100 человек в каждые 10000 лет находится в области ALARP, и эффективность обеспечения мер безопасности должна рассматриваться наряду с другими экономическими критериями. На рисунке 2 показаны характерные “F-N” кривые для ряда стран Европы.

Кривая “F-N” показывает вероятность превышения числа потенциальных летальных исходов (жертв) N при реализации отказа в двойной логарифмической шкале [20]:

$$1 - F_N(x) = P[N_F > x] = \int_0^{\infty} f_N(x) dx, \quad (4)$$

где  $f_N(x)$  – функция плотности распределения вероятностей (pdf) числа N летальных исходов в год;

$F_N(x)$  – функция распределения числа летальных исходов в год при реализации отказа (вероятность того, что число летальных исходов составит не менее чем X-летальных исходов в год).

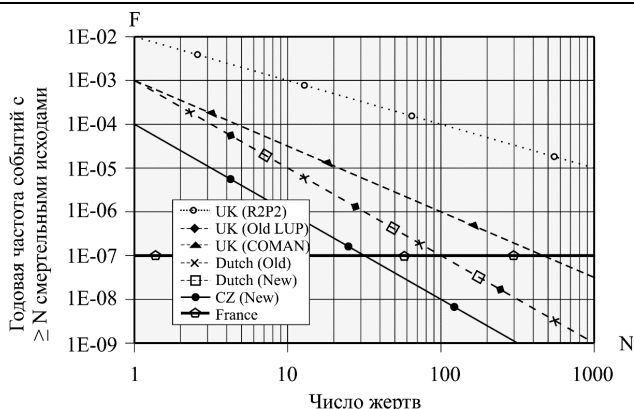


Рисунок 2 – “F-N”-кривые, связывающие прогнозируемое число жертв N в результате реализации особого события и годовую частоту (F) появления событий с не менее чем N смертельными исходами

Типовые кривые “F-N” являются различными как для разных отраслей промышленности, так и для разных стран. Основываясь на “F-N” кривых, т. н. область ALARP\* (англ. As Low as Reasonably Possible) может быть определена двумя пределами. “Ширина” области ALARP между верхним и нижним пределами является важной с точки зрения оценивания допустимого риска.

Принцип ALARP является, в общем случае, частью философии безопасности, основанной на концепции, что риск достаточно низок (допустим) только в том случае, если затраты на его дальнейшее снижение не превысят затрат (ущерба), которые могут возникнуть в результате реализации отказа.

Согласно ISO 2394:1998 [25] максимальная допустимая годовая вероятность отказа здания или сооружения основанная на обеспечении безопасности людей (нижний предел при вероятностной оптимизации), зависит от условной вероятности гибели человека при отказе конструкции:

$$P(f / год) \times P(d / f) \leq 10^{-6} \text{ год}^{-1}, \quad (5)$$

где  $P(d / f)$  – условная вероятность утраты жизни человека при отказе здания или сооружения;

$P(f / год)$  – годовая частота появления события отказа.

В ISO 2394:1998 [25] отмечается, что ограничение в виде неравенства (5) основывается на годовой вероятности отказа, рассматриваемой как некоторое среднее значение за некоторый базовый (реферативный) период.

Вообще говоря, допускается иметь большую частоту отказов в один временной интервал из периода повторяемости и меньшую частоту в другом временном интервале. При этом отмечается, что период повторяемости (реферативный период) не обязательно должен быть проектным сроком службы здания или сооружения (иногда считают, что рациональным периодом повторяемости следует считать 10..20 лет). Допускается принимать отклонения от ежегодного среднего значения вероятности отказа, но исключительно рассматривая ряд коротких промежутков времени. Неравенство (5) задает минимальное требование к безопасности отдельного человека (оценка с индивидуальной точки зрения). Критерий социальной (групповой) безопасности согласно [25] имеет вид:

$$P_F(f / год) \leq AN_F^{\alpha}, \quad (6)$$

где  $N_F$  – число летальных исходов при наступлении отказа.

A и  $\alpha$  являются константами, определяемыми обычно из статистических наблюдений и анализа природных и искусственных (техногенных) угроз. Согласно статистическим наблюдениям [25], константы A и  $\alpha$  в неравенстве (6) изменяются в довольно широком интервале пределов в зависимости от вида угрозы и области техники. В общем случае предлагается применять такой набор констант, чтобы огибающая охватывала большинство природных угроз и некоторые из наиболее общих искусственных (техногенных) угроз.

**1.2 Монетарная оптимизация (оптимизация на основе экономических затрат)**

При выполнении монетарной оптимизации Rackwitz [14] предложил использовать следующую целевую функцию:

$$\max_p \{z_p = B - C(p) - A(p) - D(p) - U(p)\}, \quad (7)$$

где  $B$  – выгода, получаемая от существования объекта;

$C(p)$  – затраты, связанные с возведением;

$A(p)$  – затраты, обусловленные моральным износом;

$D(p)$  – затраты (ущерб) в результате наступления отказа (предельные состояния несущей способности);

$U(p)$  – затраты, связанные с поддержанием эксплуатационной пригодности конструкции.

Так как составляющая  $B$  в уравнении (7) не зависит от параметра принятия решения  $p$ , уравнение (7) эквивалентно минимизации полных затрат. Согласно [12, 14] влиянием затрат, направленных на эксплуатацию и обслуживание здания, можно пренебречь. Тогда уравнение (7) принимает вид:

$$\min_p \{T(p) = C(p) + A(p) + D(p)\}. \quad (8)$$

Затраты, связанные с моральным износом и ущерб в результате отказа рассматривают как ожидаемые значения.

При оценке затрат на моральный износ принимают [16–18], что конструктивная система систематически обновляется с учетом годового морального износа  $\omega$  так, что:

$$A(p) = C(p) \frac{\omega}{\gamma}. \quad (9)$$

Затраты на снос конструктивной системы принимают независимо от параметра принятия решения  $p$  и могут не учитываться. Расходы, связанные с отказом конструкции, определяют:

$$D(p) = (C(p) + H) \cdot \lambda P_f(p) \frac{1}{\gamma}, \quad (10)$$

где  $H$  – расходы, которые начисляют в случае отказа в дополнение к затратам на реконструкцию;

$\lambda$  – интенсивность процесса случайного возмущения, которое может привести к отказу с (условной) вероятностью  $P_f(p)$ , обозначающей годовую вероятность отказа или (безусловную) годовую частоту отказов. Для простоты записи принимают  $\lambda = 1,0$ .

Rackwitz [14] предлагает оценивать вероятность отказа  $P_f(p)$ , используя простую функцию состояния с параметром принятия решения в виде т. н. глобального коэффициента безопасности:

$$P_f(p) = P_{rob} [(R - E) < 0], \quad (11)$$

$$p = \gamma_G = \frac{\mu_R}{\mu_E}.$$

Согласно [6, 14, 16, 17] зависимость вероятности отказа от параметра принятия решения  $p$  (глобального коэффициента безопасности

$\gamma_G = p = \frac{\mu_R}{\mu_E}$ ) определяется в предположении логнормального распределения сопротивления и эффектов воздействий по формуле:

$$P_f(p) = p[g = R - E < 0] = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{1}{p} \sqrt{\frac{V_R^2 + 1}{V_E^2 + 1}} \right)}{\sqrt{\ln((V_R^2 + 1)(V_E^2 + 1))}} \right], \quad (12)$$

где  $V_R, V_E$  – коэффициенты вариации для моделей сопротивления и эффекта воздействия соответственно.

Затраты на возведение  $C(p)$  моделируют линейной функцией глобального коэффициента безопасности:

$$C(p) = C_0 + C_1 p. \quad (13)$$

Тогда целевая функция (7) может быть переформулирована следующим образом:

$$\max_p \left\{ T(p) = [C_0 + C_1 p] + \left[ (C_0 + C_1 p) \frac{\omega}{\gamma} \right] + [C_0 + C_1 p + H] \frac{P_f(p)}{\gamma} \right\}. \quad (14)$$

Связывая все компоненты затрат с некоторой “фиксированной” стоимостью возведения  $C_0$ , оптимальный уровень надежности может быть определен как функция затрат на обеспечение безопасности и ущерба от отказа. Классы по последствиям отказа в EN1990 [8] и ISO 2394:1998 [25] определены с учетом относительной стоимости мер безопасности  $C_1 / C_0$ , коэффициента морального износа  $\omega$  и коэффициентов вариации  $V_R$  и  $V_E$ .

Дифференциация классов последствий согласно PMC JCSS [13] и EN1990 [8] основана на соотношении между полной стоимостью отказа  $(C_0 + C_1 p + H)$  и фиксированной стоимостью возведения  $C_0$ .

**2 Целевые критерии надежности, внесенные в международные и национальные стандарты**

ISO 2394:1998 [25] содержит список целевых мер надежности в зависимости от последствий отказа и относительной стоимости мер обеспечения безопасности. По формулировке ISO 2394:1998 [25], эти значения были установлены на основе монетарной (экономической) оптимизации и калиброваны на результатах из существующей практики.

В стандартах ISO 2394 [25] и EN1990 [8] в качестве меры надежности используют так называемый индекс надежности  $\beta$ , связанный с вероятностью отказа  $P_f$  функцией Лапласа. При этом в EN1990 [8], как и в ISO 2394 [25], отмечено, что внесение в данные нормы целевых значений индексов надежности  $\beta_{tag}$  обеспечивает выполнение требований (критериев) при проектировании по предельным состояниям без учета больших человеческих ошибок (в разделе 3 Предпосылки в EN1990 .. EN1999 оговорено условие, что расчеты по данным нормам должны выполняться квалифицированным персоналом). При этом подчеркивается, что целевые уровни надежности являются некоторыми условными индикаторами надежности, предназначенными для нормирования равных требований в различных нормах (в т. ч. в нормах различных стран). Целевые уровни надежности дифференцируют, принимая во внимание следующие показатели:

(а) *стоимость мер*, направленных на обеспечение безопасности, включая меры, связанные с повышением качества, эксплуатационных характеристик материалов и изделий, уровня проектирования, совершенствования расчетных моделей сопротивления, резервирования альтернативных путей передачи нагрузки и т. д. Такие меры следует характеризовать как меры конструкционного характера. Кроме этих мер, применяют ряд неконструкционных мер, включая устройство защитных барьеров, турникетов и т. д. Относительная стоимость мер безопасности существенно зависит от изменчивости эффектов воздействий и сопротивлений, участвующих в функции предельного состояния [7, 15];

(б) *последствия отказа*, которые, в общем случае, подразделяют на прямые и косвенные (непрямые) последствия, связанные с отказом конструктивной системы, включая человеческие жертвы, экономический ущерб, экологические потери, связанные с ущербом для окружающей среды, потери культурно-исторического наследия, связанные с утратой исторического наследия. При классификации последствий для конструктивной системы учитывают различия в форме отказа системы (пластический или хрупкий), резервирование альтернативных путей передачи нагрузки и возможность наступления прогрессирующего обрушения в случае отказа отдельных ключевых элементов;

(в) *временные параметры*. Целевые уровни надежности связывают с некоторым *реферативным периодом* (или базовым периодом отнесения) или проектным сроком службы. При этом под реферативным периодом понимают некоторый заранее выбранный (назначенный) период времени, являющийся основой для статисти-

ческого оценивания базисных переменных, зависящих от времени и вычисления соответствующей вероятности отказа.

В то же время под проектным (расчетным) сроком службы понимают период времени, в течение которого конструкция будет использоваться по назначению без необходимости проведения значительных капитальных ремонтов. Концепция реферативного периода (или базового периода отнесения) фундаментально отличается от концепции проектного срока службы.

Очевидно, что целевой уровень надежности следует всегда указывать во взаимосвязи с реферативным периодом, для которого анализируется (оценивается) надежность.

При оценивании экономических последствий отказа вероятность наступления отказа следует относить к проектному сроку службы, тогда как безопасность людей в группе риска следует оценивать для других, более коротких, реферативных периодов, таких как, например, 1 год.

В EN1990 [5, 8] приведены целевые значения индексов надежности  $\beta_{tag}$  для двух реферативных периодов (1 год и 50 лет). Эти значения целевых индексов надежности  $\beta_{tag}$  (см. таблицу 2) используют при проектировании элементов новых конструкций. Согласно концепции EN1990 [5, 8] два различных значения целевых индексов надежности в таблицах 1 и 2 должны обеспечивать примерно равный уровень надежности как для реферативного периода 1 год, так и 50 лет:

- индекс  $\beta_{50} = 3,8$  следует использовать при условии, что вероятностные модели базисных переменных в функции состояния определены для реферативного периода  $T_{ref} = 50$  лет;
- индекс  $\beta_1 = 4,7$  обеспечивает примерно такой же уровень надежности в тех случаях, когда в функции состояния использованы базисные переменные, определенные для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год.

Таблица 1 – Определение классов последствий СС согласно [5, 8]

Классы СС	Описание	Примеры зданий и инженерных сооружений
СС1	Низкие последствия для потери человеческой жизни, низкие экономические, социальные последствия и последствия для окружающей среды	Сельскохозяйственные здания, где обычно не находятся люди, например, складские здания, теплицы
СС2	Умеренные последствия для потери человеческой жизни; значительные экономические, социальные, экологические последствия	Жилые и офисные здания, общественные здания, для которых последствия отказа являются умеренными (например, офисные здания)
СС3	Большие последствия, связанные с утратой человеческих жизней; очень большие экономические, социальные, экологические потери (последствия)	Трибуны, общественные здания, для которых последствия отказа являются высокими (например, концертный зал)

Таблица 2 – Рекомендуемые минимальные значения индексов надежности (предельные состояния несущей способности) согласно EN1990 [5, 8]

Классы надежности	Минимальное значение $\beta$	
	Реферативный период	
	1 год	50 лет
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Примечание: Для калибровки частных коэффициентов для EN1991-EN1999 в общем случае рассматривается  $\beta = 3,8$  для  $T_{ref} = 50$  лет. Классы надежности выше RC3 в данных нормах не рассматриваются

При этом принимается допущение о том, что вероятности отказа для каждого отдельного года – независимы. Согласно концепции, принятой в EN1990 [8] для произвольного реферативного периода  $T_{ref}$ , индекс надежности  $\beta_{ref}$  рассчитывают из годового значения  $\beta_{tag,1}$ :

$$\beta_{ref} = \Phi^{-1} \left\{ \left[ \Phi(\beta_{tag,1}) \right]^{T_{ref}} \right\}, \quad (15)$$

где  $\Phi(\bullet)$  – функция Лапласа;

$\beta_{tag,1}$  – целевой индекс надежности для реферативного периода  $T_{ref} = 1,0$  год.

Следует отметить, что выражение (15) надо применять с большой осторожностью. Во-первых, потому что концепция полной независимости событий отказа в отдельные последовательные годы (рассматриваемые как реферативные периоды  $T_{ref} = 1,0$  год) чаще всего не является реалистичной. Во-вторых, принятое нормальное (или логнормальное) распределение, позволяющее использовать связь вероятности отказа и индекса надежности с применением функции Лапласа, является большой условностью.

Подобные рекомендации содержатся в JCSS PC [13] и ISO 2394:1998 [25]. В EN1990 рекомендуемые целевые значения индексов надежности  $\beta_{tag}$  связаны как с прогнозируемыми последствиями отказа, так и с относительной стоимостью мер обеспечения безопасности. Однако ISO 2394:2015 [12] содержит целевые уровни надежности (см. таблицу 3), установленные на основе экономической (монетарной) оптимизации и критериев, получаемых с применением индекса LQI (Life Quality Index [26]).

Таблица 3 – Ориентировочные минимальные целевые меры надежности (ULS,  $T_{ref} = 1$  год), основанные на LQI-критерии согласно ISO 2394:2015 [12]

Относительные стоимости спасения жизни	$k_1 = \frac{C_1(\gamma_s + \omega)}{G_\Delta \cdot N_F}$	LQI-целевая мера надежности
Большая	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$\beta = 3,1, (P_f \approx 10^{-3})$
Средняя	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	$\beta = 3,7, (P_f \approx 10^{-4})$
Малая	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$\beta = 4,2, (P_f \approx 10^{-5})$

Примечание: значения в таблице получены при  $0,1 \leq V \leq 0,3$ . При более высоких коэффициентах вариаций к мерам надежности применяют повышающий коэффициент 5, а при меньших – понижающий коэффициент 2,  $\gamma_s = 0,04$ ;  $\omega = 0,02$

В соответствии с EN1990 [8] установлены три класса (категории) (СС) по последствиям отказа (см. таблицу 1). Следует отметить, что классификация выполнена на уровне конструктивного элемента. При этом таблица 1 включает некоторые характерные примеры зданий и сооружений. Однако, как подчеркивается в [7], в процессе проектирования в зависимости от принятого конструктивного решения здания и значимой формы разрушения (режима отказа) для отдельных конструктивных элементов могут быть назначены одинаковые, более высокие или более низкие классы по последствиям отказа, чем для всей конструкции (конструктивной системы) в целом.

На первый взгляд, отнесение всей конструктивной системы здания к одному классу по последствиям отказа в соответствии с таблицей 1 выглядит простым и разумным. Однако более глубокий анализ показывает, что отсутствие количественных индикаторов делает предложенную классификацию довольно расплывчатой и неясной, что ограничивает её практическое применение.

В ряде Национальных приложений к EN1991-1-7, например, в [27], приводятся более детальные указания, относящиеся к классификации зданий по последствиям отказа (классам риска), включающие число этажей, площадь и категорию использования перекрытий, числа людей в группе риска и т. д.

В соответствии с концепцией, принятой в EN1990 [5, 8], классы последствий (CC), содержащие описательные характеристики, связаны с классами надежности (RC), для которых и заданы целевые значения индексов надежности  $\beta_{tag}$ , как показано в таблице 2. Если, например, последствия отказа, выраженные в терминах числа смертельных исходов при реализации отказа составят для класса CC1,  $N_F = 1$  чел.; для класса CC2,  $N_F = 10$  чел.; класса CC3,  $N_F = 100$  чел., то при назначенных целевых значениях вероятностей отказа (индексов надежности) для всех трех классов (CC) допустимый (ожидаемый) риск (выраженный в последствиях отказа) будет одинаковым и составит  $10^{-5}$  жертв/год.

Кроме того, дифференциация надежности согласно действующему EN1990 [5, 8], реализуется в т. н. полувероятностном подходе в рамках метода частных коэффициентов путем умножения воздействий (эффектов воздействий) на коэффициент  $K_F$ , принимаемый по таблице 4 (как некоторый аналог  $\gamma_n$  – коэффициента надежности здания по назначению в старых СНиП 2.01.07). Здесь следует подчеркнуть, что значения этих коэффициентов приведены в Приложении С к EN1990, которое является справочным (informative), а не обязательным (нормативным (normative)). Для класса RC1 при расчете неблагоприятных воздействий (эффектов воздействий) допускается понижение коэффициента  $K_F$  на 10%, тогда как в случае конструктивного элемента класса RC3 – повышение на ту же величину (10%) по сравнению с коэффициентом  $K_F = 1,0$  для класса RC2, независимо от вида воздействия.

Таблица 4 – Значения коэффициента  $K_F$  согласно [5, 8]

Коэффициент $K_F$ для воздействий	Классы надежности		
	RC1	RC2	RC3
$K_F$	0,9	1,0	1,1

В отличие от действующего документа, проект нового prEN1990 устанавливает 5 классов по последствиям отказа (см. таблицу 5). При этом в таблице 5 представлены определения классов последствий в зависимости от комбинации угроз для человеческой жизни и экономических, социальных последствий и ущерба для окружающей среды, что подчеркивает его связь с ISO 2394:2015 [12]. Представленные описания опять же довольно неконкретны и не имеют четких критериев назначения лингвистических переменных (“малый”, “умеренный”, “большой”, “значительный” ...).

Таблица 5 – Определение классов последствий согласно prEN1990 [9]

Классы последствий	Описание последствий	Утрата человеческой жизни <sup>1)</sup>	Экономические, социальные затраты, ущерб для окружающей среды <sup>1)</sup>
CC4	наивысшие <sup>2)</sup>	экстремальные	огромные
CC3	очень высокие <sup>3)</sup>	высокие	очень большие
CC2	нормальные <sup>3)</sup>	средние	значительные
CC1	низкие <sup>3)</sup>	низкие	малые
CC0	очень низкие <sup>3)</sup>	очень низкие	незначительные

Примечание:  
<sup>1)</sup> классы последствия выбирается по наиболее неблагоприятному последствию из двух колонок;  
<sup>2)</sup> классы CC0 и CC4 не выходят в область применения данных норм;  
<sup>3)</sup> классы CC1-CC3 могут быть разделены на субклассы

В рамках проекта prEN1990 [9] не рассматриваются связанные с классами последствий (CC) классы надежности (RC), а целевые меры надежности ( $P_f$ ,  $\beta$ ), как и значения коэффициента  $K_F$ , представлены непосредственно в зависимости от классов RC (см. таблицу 4).

Таблица 6 – Ориентировочные целевые значения мер надежности для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год согласно prEN1990 [9] (ULS)

Меры надежности	Классы последствий		
	CC1	CC2	CC3
$P_{f,a}^{tg}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta_a^{tg}$	4,26	4,75	5,20

Таблица 7 – Значения коэффициента  $K_F$  согласно prEN1990 [9]

Классы последствий (CC)	Описание последствий	Коэффициент $K_F$
CC3	высокие	1,10
CC2	нормальные	1,0
CC1	низкие	0,90

В соответствии с требованиями американских норм ASCE [10], здания и сооружения подразделяют на IV категории, основываясь, главным образом, на риске для жизни и здоровья людей, находящихся в рассматриваемой расчетной ситуации в группе риска. Таким образом, основным классификационным параметром, рассматриваемым при дифференциации надежности, является число людей, входящих в группу риска. При этом подчеркивается, что к группе риска причисляют не только людей, напрямую подвергающихся угрозе в случае отказа (разрушения) конструкции, но и людей, находящихся вне конструктивной системы здания, но подвергающихся опасности утраты жизни или получения травм.

В работе [7] показано, что ASCE [10], как и EN1990 [5, 8], не содержат количественных пределов для числа людей в группе риска или предполагаемого числа (количества) смертельных исходов. Целевые значения вероятности отказа и соответствующие индексы надежности  $\beta_{tag,1}$ , согласно [10], для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Целевые значения годовой вероятности отказа  $P_f$  и индексов надежности  $\beta_{tag}$  (за исключением особых воздействий) согласно [10]

Категории риска	I	II	III	IV
Форма разрушения не является внезапной, без широкого распространения повреждений	$1,25 \times 10^{-4}$ (3,66)	$3,0 \times 10^{-5}$ (4,01)	$1,5 \times 10^{-5}$ (4,21)	$5,0 \times 10^{-6}$ (4,42)
Форма разрушения является внезапной, но без широкого распространения повреждений	$3,0 \times 10^{-5}$ (4,01)	$5,0 \times 10^{-6}$ (4,42)	$2,0 \times 10^{-6}$ (4,61)	$7,0 \times 10^{-7}$ (4,83)
Форма разрушения является внезапной и характеризуется широким распространением повреждения	$5,0 \times 10^{-6}$ (4,42)	$7,0 \times 10^{-7}$ (4,83)	$2,5 \times 10^{-7}$ (5,03)	$1,0 \times 10^{-7}$ (5,20)

Как видно, показатели надежности изменяются в зависимости от категории риска и формы (режима) отказа. Как утверждается в [7], эти значения предложены рядом экспертных групп и подтверждены профессиональной практикой. При этом ASCE [10] не содержит нормируемых значений вероятностей отказа (индексов надежности) для проверок конструктивных систем в особых расчетных ситуациях.

Дифференциация категории риска в расчетах реализуется через т. н. коэффициенты влияния (англ. Importance Factor) для воздействий подобно тому, как это сделано в EN1990 [5, 8]. Однако эти коэффициенты применяют только к климатическим воздействиям и влияниям окружающей среды. Они различаются в зависимости от статистических характеристик климатических воздействий и способа, посредством которого конструкция воспринимает эти воздействия.

Классификация конструкций, применяемая в JCSS [13], связана с нормируемыми (целевыми) уровнями надежности, установленными для конструктивного элемента (см. таблицу 9). Значения вероятностей отказа (индексов надежности), внесенные в JCSS [13], базируются на результатах исследований Rackwitz [14] и соответствуют вероятности отказа отдельного конструктивного элемента для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год. Эти значения следует рассматривать при анализе надежности в сочетании со стохастическими моделями для базисных переменных, как это указано в JCSS PMC [13]. Следует отметить, что эти же значения приведены и в ISO 2394:2015 [12], где, однако, предлагается применять 5 классов по последствиям отказа. Как и в документах [5, 8, 10], так и в JCSS [13], целевые значения вероятностей отказа зависят не только от последствий отказа, но также и от относительной стоимости мер, направленных на обеспечение безопасности, для которых трудно сформулировать заранее количественные показатели.

**Таблица 9** – Целевые значения индексов надежности  $\beta_{tag}$  (вероятностей отказа) для  $T_{ref} = 1$  год и ULS согласно [13]

Относительная стоимость мер безопасности	Незначительные последствия $\rho < 2$	Средние последствия $2 < \rho \leq 5$	Большие (значительные) последствия $5 < \rho \leq 10$
Большая (А)	$3,1 (P_{tag} \approx 10^{-3})$	$3,3 (P_{tag} \approx 5 \times 10^{-4})$	$3,7 (P_{tag} \approx 10^{-4})$
Нормальная (В)	$3,7 (P_{tag} \approx 10^{-4})$	$4,2 (P_{tag} \approx 10^{-5})$	$4,4 (P_{tag} \approx 5 \times 10^{-6})$
Малая (С)	$4,2 (P_{tag} \approx 10^{-5})$	$4,4 (P_{tag} \approx 5 \times 10^{-5})$	$4,7 (P_{tag} \approx 10^{-6})$

Вместе с тем JCSS [13] предлагает при дифференциации надежности и составлении классификации конструкции учитывать следующие дополнительные аспекты:

- (а) квалифицировать последствия отказа с использованием соответствующего коэффициента  $\rho$ , представляющего собой отношение полной стоимости ущерба, связанного с отказом  $C_0 + C_1(\rho) + H$ , к стоимости возведения  $C_0 + C_1(\rho)$ . При этом стоимость возведения включает фиксированную часть  $C_0$  и стоимость  $C_1(\rho)$ , зависящую от параметра  $\rho = \mu_R / \mu_Z$ , отвечающего за дополнительные меры по обеспечению безопасности (защиты) конструкции. Стоимость  $H$  обозначает прямой ущерб, связанный с отказом, включая собственно стоимость повреждений и последующего демонтажа конструктивной системы в целом или её части, экологические последствия, повреждения инфраструктуры, коммуникации и т. д., а также человеческие жертвы, выраженные в монетарных единицах. В работах [15, 20, 24] показано, что при  $\rho > 10$  целевые значения мер надежности (вероятности отказа и индекса надежности) следует устанавливать, опираясь на результаты систематического анализа рисков для проектируемого объекта;
- (б) приведенные в таблице 9 значения целевых показателей надежности относятся к конструктивной системе или с некоторым допущением к доминирующей форме отказа системы. Но, при этом, такие же значения применяют и к отдельному конструктивному элементу, доминирующему в отказе системы (ключевому элементу). Исходя из этого, предполагается, что конструктивные системы с несколькими одинаково значимыми формами (режимами) отказа следует проектировать с более высоким уровнем надежности (например, каркасные системы с плоскими дисками перекрытий).

Учитывая то обстоятельство, что классификация конструкций по последствиям отказа, принятая в EN1990 [8], является довольно расплывчатой и неконкретной, она не нашла широкого применения в практике проектирования для дифференциации надежности.

Напротив, классификация, основанная на количественных параметрах, которые могут быть определены на стадии проектирования (например, прогнозируемое число людей в группе риска), облегчает

практическую дифференциацию надежности. Даже в тех случаях, когда число людей в группе риска не может быть определено напрямую, оно может быть получено косвенно, принимая, например, общую площадь перекрытия с учетом категории использования согласно EN1991-1-1. Так, число людей, входящих в группу риска, может быть рассчитано, основываясь на средней норме площади ( $m^2$ ), приходящейся на одного пользователя (так, например, в Минске средняя норма площади для одного человека в жилом здании – 10  $m^2$ /чел; в офисном – 4,5  $m^2$ /чел; общежитии – 6  $m^2$ /чел).

В работе [7] предлагается применять классификацию, основанную на количественных параметрах, связанных с рисками. Последствия отказа предполагается учитывать косвенным образом, что не требует количественной расчетной оценки на стадии проектирования (см. таблицу 10). В таблице 10 число людей в группе риска рекомендовано определять с учетом возможных жертв из числа людей, находящихся вне здания (до 10%). После того, как конструктивная система квалифицируется к определенному классу по последствиям отказа, её элементы проектируют для того же уровня надежности, что и конструктивной системы в целом, основываясь на модифицированных частных коэффициентах для нагрузок. Такая процедура может быть легко реализована и обеспечивает для ряда стран требования единого (равного) риска.

**Таблица 10** – Классы последствий для зданий и других конструкций [7]

Классы последствий	Число людей в группе риска	Описание
CC1	$N < 10$	индивидуальные жилые дома, сельскохозяйственные здания
CC2	$10 \leq N < 1000$	все другие здания/конструкции
CC3	$N \geq 1000$	конструктивные системы с $N \geq 1000$ , трибуны стадионов с более чем 500 зрителей, ответственные промышленные здания, обеспечение жизнедеятельности

Таким образом, опираясь на представленный выше анализ, можно выделить две группы (набора) целевых мер надежности: (1) нормируемые целевые вероятности отказа и индексы надежности согласно EN1990 [5, 8], принятые в соответствии с ISO 2394:1998 [25], и (2) целевые значения, внесенные в PMC JCSS [13] и ISO 2394:2015 [12], основываясь на результатах исследований Rackwitz [14]. Годовые значения целевых мер надежности, рекомендованные в EN1990 [8], превышают значения, рекомендованные JCSS [13] и ISO 2394:2015 [12]. Однако Vrouwenvelder [23] подчеркивает, что принятое в Еврокодах допущение о независимости годовых вероятностей отказа не является реалистичным. При этом значению индекса надежности, внесенному в EN1990, для реферативного периода  $T_{ref} = 50$  лет ( $\beta_{50} = 3,8$ ), на основе которого выполнены калибровки частных коэффициентов во всех конструктивных Еврокодах, в большей степени соответствует годовому индексу надежности  $\beta_1 = 4,5$ . Кроме того, целевые значения индексов надежности, согласно EN1990 применимы на практике к конструктивному элементу, тогда как JCSS [13] устанавливают целевые индексы применительно к конструктивной системе.

Vrouwenvelder [23] поясняет, что в общем случае целевой индекс надежности конструктивного элемента должен быть выше, чем целевой индекс надежности для конструктивной системы, кроме конструктивных систем с высокой степенью статической неопределимости. В случае высокого уровня статической неопределимости (избыточности) система a-priori имеет более высокий индекс надежности. Однако для последовательных систем применяют целевой индекс надежности как для отдельного элемента, что приводит к снижению общего индекса надежности конструктивной системы в целом (если отдельные элементы в определенной степени независимы).

В целом, из выполненного анализа можно заключить, что меры надежности для двух выделенных групп (EN1990 и JCSS) являются сравнимыми (компатебельными).

### 3 Вероятностная оптимизация целевых мер надежности. Применение LQI-критерия

Выбор целевых значений мер надежности является первым и, по-видимому, одним из наиболее важных шагов, как при калибровке системы частных коэффициентов, включенных в современные нормы проектирования конструкций, так и при выполнении прямых вероятностных расчетов.

Как показано ранее, практически все нормы, содержащие требования к основам проектирования [5, 8], включая и Probabilistic Model Code [13], изданный JCSS, устанавливают ориентировочные значения целевых мер надежности (вероятностей отказа и связанных с ними индексов надежности), связывая их с отказом на уровне конструктивной системы (PMC JCSS [13]) либо на уровне отдельного конструктивного элемента (EN1990 [5, 8], ISO 2394 [25] и т. д.) при доминирующей форме отказа системы и основываясь, главным образом, на монетарной оптимизации (англ. Monetary optimization) или оптимизации затрат.

Вместе с тем ISO 2394:2015 [12] (Приложение G) содержит указания по выполнению оптимизации, основанной на критерии обеспечения безопасности жизнедеятельности (т. н. LQI-критерий). На рисунке 3 показано взаимодействие между параметрами безопасности, устанавливаемыми на положениях монетарной оптимизации  $p^*$ , и граничными (пороговыми) значениями  $p_{acc}$ , установленными из критерия обеспечения безопасности жизни людей (критерия допустимого риска для жизни).

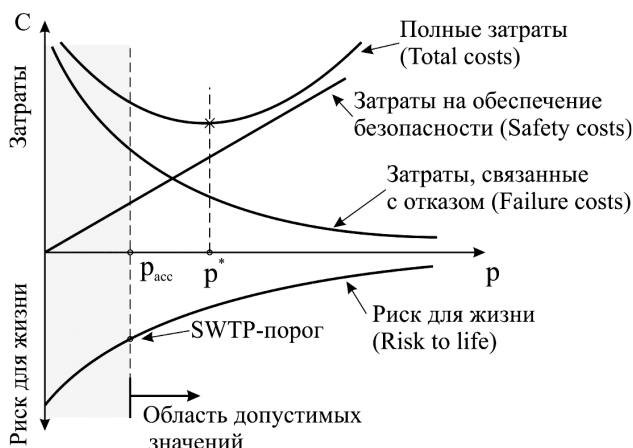


Рисунок 3 – Взаимодействие критериев монетарной оптимизации  $p^*$  и социального критерия  $p_{acc}$ , связанного с инвестированием общества в безопасность жизнедеятельности [16]

Допустимое предельное (пороговое) значением  $p_{acc}$  (см. рисунок 3) определяют согласно [12] на основе принципа предельных затрат на спасение жизни MLSC (англ. Marginal Lifesaving Costs Principle), в соответствии с которым принимаемые решения, оказывающие влияние на безопасность жизнедеятельности, считаются приемлемыми, если расходы, связанные с возможными мерами по спасению одной дополнительной анонимной жизни, находятся в балансе (уравновешены) с затратами, которые общество готово нести ради спасения одного статистического индивида.

Проблема принятия решения при установлении целевых значений мер надежности конструктивных систем может быть сформулирована следующим образом:

*Инвестирование в конструкционную безопасность снижает вероятность появления нежелательного события (обозначаемого как "отказ" – англ. "failure"), которое может приводить к монетарным (экономическим) и гуманитарным (человеческим) потерям (последствиям).*

Целью анализа при установлении целевых значений мер надежности является установление как некоторого оптимального значения  $p^*$  параметра принятия решения (уровня обеспечения безопасности конструкции) на основе монетарной оптимизации, так и минимального (порогового) значения этого параметра  $p_{acc}$  из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности (сохранение жизни людей) с использованием LQI-критерия), определяющего границу допустимой области для  $p$ , в пределах которой следует выполнять монетарную оптимизацию.

Методика оценивания последствий, связанных с утратой жизни человека, предложена в работах Lind и затем получила развитие в работах Nathwani, Lind, Pandey [26]. Оценка предельных затрат на спасение жизни (MLSC) базируется на т. н. комплексном социальном индикаторе – индексе качества жизни LQI (англ. Life Quality Index). Этот комплексный индикатор включает в себя три важных социальных параметра: величину валового внутреннего продукта на душу населения  $g$ ; среднюю продолжительность жизни  $e$ ; долю активной фазы жизни, связанную с трудовой деятельностью  $\omega$ . Используя данную концепцию, ISO 2394:2015 [12] определяет базовое требование, в соответствии с которым целевая вероятность отказа может быть установлена на основе монетарной оптимизации только тогда, когда минимизирован риск утраты человеческой жизни в результате отказа (определено предельное или пороговое значение меры надежности). В противном случае LQI-критерий используется для определения предельных целевых значений вероятности отказа. Skjong и Roland [4, 17, 19] основываясь на LQI-критерии вывели т. н. показатель предполагаемых затрат на предотвращение смертельных исходов ICAF (Implied Costs to Avert a Fatality), который был использован Rackwitz [14] для вероятностной оптимизации строительных конструкций.

Для формулирования т. н. LQI-критерия предельные затраты на сохранение жизни должны быть выделены из целевой функции (7, 14). Очевидно, что можно сформулировать следующее правило:

*При установлении критерия, основанного на LQI достаточно количественно определить предельный прирост затрат на возведение и моральный износ при соответствующем изменении (снижении) риска для жизни (см. рисунок 3) как функцию от пара-*

*метра принятия решения ( $p = \frac{\mu_R}{\mu_E}$ ):*

$$\frac{d[C(p) + A(p)]}{dp} \geq - \frac{d\mu(p) \cdot N_p}{dp} \cdot \frac{g}{q} \cdot C_x \quad (16)$$

В критерии (16) риск для жизни людей определяется ожидаемым числом жертв  $\mu(p) \cdot N_p$  (здесь,  $\mu(p)$  – показатель смертности;  $N_p$  – число людей в группе риска). Показатель SWTP сохранения жизни согласно [12]  $\frac{g}{q} \cdot C_x$  определяют из показателя LQI (Life Quality Index).

Критерий (16) может быть преобразован к виду:

$$C_i \left(1 + \frac{\omega}{\gamma_s}\right) \geq - \frac{1}{\gamma_s} \cdot \frac{g}{q} \cdot C_x \cdot N_F \frac{dP_f(p)}{dp} \quad (17)$$

В критерии (17) риск для жизни выражен в терминах вероятности отказа  $P_f(p)$  и предполагаемого (ожидаемого) числа жертв  $N_F$  в результате отказа. Поскольку LQI-критерий является граничным условием, определяемым (устанавливаемым) обществом, в критерии (17) применяют социальную ставку дисконтирования.

Критерии, подобные (16) и (17), уже предлагались в работах Rackwitz и Steicher [14] с некоторыми отличиями, относящимися к ставке дисконтирования и компенсации затрат на моральное старение (износ).



Для комбинации LQI-критерия с функциями, используемыми при монетарной оптимизации, Rackwitz [14] связывает LQI-критерий с "относительной стоимостью мер безопасности",  $C_1 / C_0$ , принимая допущение об абсолютной (фиксированной) величине затрат на возведение  $C_0$ . В результате применения такого допущения критерий становится зависимым от масштаба.

В работах [16–18] были развиты наиболее общие подходы, опирающиеся на показатель SWTP. В рамках этих подходов критерий (17) получает вид:

$$-\frac{dP_f(p)}{dp} \leq \frac{C_1(\gamma_s + \omega)}{\frac{g}{q} C_x \cdot N_F} = k_1. \quad (18)$$

Числитель правой части неравенства  $C_1(\gamma_s + \omega)$  показывает, на сколько возрастают годовые затраты, связанные с обеспечением мер безопасности при повышении на единицу величины параметра принятия решения  $p$  (глобального коэффициента безопасности  $\gamma_G$ ). В знаменателе правой части неравенства (18) приведены в монетарных единицах последствия утраты  $N_F$  человеческих жизней в результате отказа. Таким образом, коэффициент  $k_1$  содержит информацию о соотношении затрат на обеспечение мер безопасности конструкции к расходам, связанным с предельными затратами на сохранение человеческой жизни (SWTP). Рисунок 3 иллюстрирует проблему количественной оценки порогового значения  $p_{f,acc}$ , которая включает определение стоимости мер безопасности, последствий обрушения и формулирование функции предельного состояния. Пороговое (граничное) значение  $p_{f,acc}$  (см. рисунок 3), установленное с применением LQI-критерия, определяет некоторую область допустимых значений, внутри которой следует выполнять монетарную оптимизацию.

Оптимальное решение определяют таким образом, что первая производная целевой функции (18) в точке ( $p^*$ ) равна нулю

$$\left(\frac{dT(p^*)}{dp} = 0\right):$$

$$\begin{aligned} \frac{dC(p^*)}{dp} \left(1 + \frac{\omega}{\gamma}\right) + \frac{dC(p^*)}{dp} P_f(p^*) \frac{1}{\gamma} + \\ + \frac{dP_f(p^*)}{dp} [C(p^*) + H] \frac{1}{\gamma} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая, что  $P_f(p^*) \ll \gamma$ , вторым членом в (19) можно пренебречь:

$$\frac{dC(p^*)}{dp} = \frac{C(p^*) + H}{(\gamma + \omega)} \frac{dP_f(p^*)}{dp}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в критерий (18) и принимая во внимание, что  $\frac{dP_f(p)}{dp} < 0$  для всех  $p$ , получаем:

$$\frac{g/q \cdot C_x \cdot N_F}{(C(p^*) + H)} \leq \frac{\gamma_s + \omega}{\gamma + \omega}. \quad (21)$$

Затраты, связанные с отказом  $H$ , в критерии (21) могут включать компенсационные выплаты за утрату человеческих жизней  $H_c N_F$  в результате отказа ( $H_c > 0$ , компенсацию за одну человеческую жертву, величину которой определяет лицо, принимающее решение, например, собственник здания). Критерий (21) с учетом компенсационных выплат  $H_c N_F$  можно записать в следующем виде:

$$\frac{N_F \cdot H_c}{C(p^*) + H} \leq \frac{(\gamma_s + \omega)}{(\gamma + \omega)} \cdot \frac{H_c}{(g/q) \cdot C_x}. \quad (22)$$

В критерий (22) входят три составляющие. Первая составляющая представляет собой отношение компенсационных выплат  $H_c N_F$  в случае смертельных исходов в результате отказа к полной стоимости затрат, связанных с отказом  $C(p^*) + H$ . Очевидно, что это отношение всегда меньше единицы. Вторая составляющая является, по сути, отношением социальной ставки дисконтирования  $\gamma_s$  к ставке дисконтирования  $\gamma$ , устанавливаемой частным лицом, принимающим решение и выполняющим монетарную оптимизацию. В случае применения LQI-критерия оценка выполняется с общественной точки зрения, и поэтому  $\gamma_s = \gamma$  и  $\frac{\gamma_s + \omega}{\gamma + \omega} = 1,0$ . При монетарной оптимизации,

когда решение принимает частное лицо, обычно  $\gamma > \gamma_s$ . Наконец, третья составляющая выражает отношение, показывающее, как потеря жизни трансформируется в монетарную оптимизацию (компенсационные выплаты  $H_c$ ) и LQI-критерий для порогового значения (SWTP

для сохранения одной жизни  $\frac{g}{q} \cdot C_x$ ) соответственно.

Величина компенсационных выплат  $H_c$  при этом зависит от целого ряда различных факторов. Для частного лица, принимающего решение, величина компенсационных выплат на одну жертву обычно определяется в судебном заседании или на основании переговоров с родственниками потерпевшего. Следовательно, компенсационные выплаты в таких случаях могут изменяться в широких пределах. Кроме того, размер выплат будет зависеть от правовой системы, действующей в конкретной стране.

Некоторые авторы [18, 19] предлагают оценивать количественно компенсационные выплаты  $H_c$ , основываясь на критерии LQI, используя при этом различную терминологию. Из сформулированных предложений [18, 19] даже не ясно, должны ли компенсационные выплаты  $H_c$  быть меньше, равными или большими, чем SWTP

( $\frac{g}{q} \cdot C_x$ ), используемый в критерии LQI.

Скорее всего, в случае частного лица, принимающего решение, невозможно принять одно фиксированное значение  $H_c$  без исследования конкретной ситуации. Следовательно, в общем случае отношение  $H_c / ((g/q) \cdot C_x)$  следует рассматривать как некоторую переменную величину в критерии (22).

Как показано в [16], для многих расчетных случаев можно принять, что  $\gamma_s / \gamma = \frac{\gamma_s + \omega}{\gamma + \omega}$ . Тогда достаточно проверить следующее

условие: является ли отношение ставок дисконтирования  $\gamma_s / \gamma$  большим, чем отношение расходов SWTP на сохранение жизни  $N_F$  человек и полным ущербом от отказа конструктивной системы  $C(p^*) + H$ . Для лица, принимающего социальные решения,  $\gamma_s / \gamma = 1,0$  и критерий (22) упрощается до проверки является ли составляющая  $(g/q) \cdot C_x \cdot N_F$  большей, чем  $C(p^*) + H$ .

В работе [16] для случая малых коэффициентов вариаций сопротивления и эффектов воздействий ( $0,1 \leq V \leq 0,3$ ) предлагается определять целевое значение пороговой вероятности отказа  $p_{f,acc}$  как меры надежности на основе LQI-критерия по следующей упрощенной формуле:

$$P_{f,acc} \cong \frac{1}{5} k_1 = \frac{1}{5} \cdot \frac{C_1(\gamma + \omega)}{q \cdot C_x \cdot N_F} \quad (23)$$

При этом отмечается, что, если последствия, связанные с утратой человеческой жизни в случае отказа очень высокие (константа  $k_1 > 10^{-2}$ ), упрощенный формат (23) применять не следует. Ориентированные минимальные целевые меры надежности, полученные с применением LQI-критерия и монетарной оптимизации ISO 2394:2015 [12] приведены в таблице 3 и таблице 11.

**Таблица 11** – Ориентировочные значения целевых мер надежности (ULS,  $T_{ref} = 1$  год), основанные на монетарной оптимизации, согласно ISO 2394:2015 [12]

Относительная стоимость мер безопасности	Последствия отказа (классы согласно таблице F.1 [12])		
	Класс 2	Класс 3	Класс 4
Большая	$\beta = 3,1$ , ( $P_f \approx 10^{-3}$ )	$\beta = 3,3$ , ( $P_f \approx 5 \times 10^{-4}$ )	$\beta = 3,7$ , ( $P_f \approx 10^{-4}$ )
Средняя	$\beta = 3,7$ , ( $P_f \approx 10^{-4}$ )	$\beta = 4,2$ , ( $P_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta = 4,4$ , ( $P_f \approx 5 \times 10^{-6}$ )
Малая	$\beta = 4,2$ , ( $P_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta = 4,4$ , ( $P_f \approx 5 \times 10^{-6}$ )	$\beta = 4,7$ , ( $P_f \approx 10^{-6}$ )

Целевые меры надежности, связанные с отказом, приведенные в таблице 11 согласно [12], применимы как для уровня отдельного конструктивного элемента, части или полной конструктивной системы, что регулируется выбором соответствующего класса последствий. Классы последствий следует принимать по таблице F.1 ISO 2394:2015 [12].

В отличие от таблицы 1, 2 и, содержащейся в EN1990 [5, 8] и ISO 2394:2015 [12], в данной таблице F.1 имеется не только описание предполагаемых последствий, выражающих признаки отказа, но и прогнозируемое число жертв (например, для класса Class 2 – не более 5; Class 3 – не более 50; а Class 4 – не более 500).

Следует подчеркнуть, что проектный срок службы рассматривается в рамках данной оптимизационной задачи как некоторая наперед заданная детерминистическая величина, представленная числом  $T_{ref}$  лет. В реальной ситуации срок службы для данного проекта является случайной величиной, зависящей от целого ряда как физических, так и социальных факторов.

Принимая допущение о независимости отказов в отдельные годы, вероятность отказа в  $i$ -м году  $P_f(p, i)$  определяется:

$$P_f(p, i) = P_f(p) [1 - P_f(p)]^{i-1} \quad (24)$$

где  $P_f(p)$  – начальная вероятность отказа, зависящая от величины параметра принятия решения  $p$  (как было показано выше – глобального коэффициента безопасности  $\gamma_{Glob} = \frac{\mu_R}{\mu_E}$ ).

При этом следует подчеркнуть, что годовые вероятности отказа могут рассматриваться как независимые только тогда, когда они в основном определяются переменными во времени воздействиями (климатическими, транспортными и т. д., т. е. когда статистические параметры воздействий получены из распределений, построенных основываясь на среднегодовых максимумах).

Тогда вероятность отказа  $P_f(p)$  в течение реферативного периода  $T_{ref}$  лет может быть оценена следующим образом:

$$P_{f,Tref}(p) = 1 - [1 - P_f(p)]^{Tref} \approx T_{ref} \cdot P_f(p) \quad (25)$$

Следует подчеркнуть, что приближение по формуле (25) справедливо для  $P_f(p) < 10^{-3}$ .

Дисконтный коэффициент для предполагаемых затрат при отказе в  $i$ -м году определяют согласно [7]:

$$Q(q, i) = 1 / (1 + q)^i \quad (26)$$

Когда полные затраты, связанные с отказом в  $i$ -м году при монетарной оптимизации, можно записать в виде:

$$C_{tot}(p, q, T_{ref}) = C_f \cdot P_f(p) \cdot PQ(p, q, T_{ref}) \quad (27)$$

В свою очередь коэффициент  $PQ(p, q, T_{ref})$  в формуле (27) в работе [7] предложено определять:

$$PQ(p, q, T_{ref}) = \frac{1 - \left[ \frac{(1 - P_f(p))}{(1 + q)} \right]^{Tref}}{1 - \left[ \frac{(1 - P_f(p))}{(1 + q)} \right]} \quad (28)$$

В общем случае полные затраты  $C_{tot}(p, q, T_{ref})$  зависят от затрат  $C_o$ ,  $C_f(H)$ ,  $C_1$ , годовой вероятности отказа  $P_f(p)$ , ставки дисконтирования  $q$ , реферативного периода  $T_{ref}$ . Для малых вероятностей отказа  $P_f(p)$  и малых значений ставки дисконтирования  $q$ , коэффициент  $PQ(p, q, T_{ref}) \approx T_{ref}$ . Традиционно, дифференцируя целевую функцию и приравнявая её к нулю, находят  $P_{opt}$ , как было показано ранее, и соответственно  $P_{f,opt} = P_f(p_{opt})_1$ . Для реферативного периода  $T_{ref}$  целевая вероятность отказа:

$$P_{f,opt,Tref} = 1 - (1 - P_{f,opt})^{Tref} \approx T_{ref} \cdot P_{f,opt,1} \quad (29)$$

#### 4 Определение допустимых предельных целевых значений вероятностей отказа $P_{f,acc}$ из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности (LQI-критерий) для условий Республики Беларусь

В соответствии с Приложением G ISO 2394:2015 [12] индекс качества жизни (LQI) определяют по формуле:

$$LQI = g^q \cdot e \quad (30)$$

где  $g$  – валовый внутренний продукт (ВВП) на душу населения;

$e$  – ожидаемая средняя продолжительность жизни;

$q$  – коэффициент, зависящий от продолжительности активной фазы жизни  $\omega$ , определяемый по формуле:

$$q = \frac{\omega}{(1 - \omega) \cdot \beta} \quad (31)$$

здесь  $\beta$  – коэффициент Cobb-Douglas, принимаемый равным 0,7.

Для условий Республики Беларусь в 2017–2018 гг., валовый внутренний продукт на душу населения составил  $g = 5723$  USD, средняя продолжительность жизни – 74 года, а ставка дисконтирования – 9% (ставка рефинансирования Национального банка РБ). Принимая  $\omega = 0,18$ , коэффициент  $q$  равен:

$$q = \frac{0,18}{(1 - 0,18) \cdot 0,7} = 0,313,$$

Тогда

$$LQI_{BY} = 5723^{0,313} \cdot 74 = 1110,1 \text{ USD/year.}$$

Используемые затраты на сохранение одной жизни согласно [12]:

$$G_{\Delta} = ICAF = \frac{g}{q} \cdot \frac{e}{4} = \frac{5723}{0,313} \cdot \frac{74}{4} = 338260 \text{ USD/fat.}$$

**Таблица 12** – Значения индекса качества жизни LQI и  $G_{\Delta}$  для некоторых стран (выборка из Приложения G ISO 2394:2015 [12] и собственные данные для РБ)

Страна	$g$ , USD	LQI USD x y	$G_{\Delta}^{(1)}$ USD	SVSL <sup>1)</sup>
Австралия	35624	1967,5	4840000	6651000
Беларусь	5723	1110,1	338260	316130
Китай	5515	1038,01	353000	482000
Конго	290	138,36	16000	20000
Франция	30595	1901,38	2935000	2233000
Германия	33668	1985,3	3219000	2625000
Индия	2721	832,05	175000	172000
Норвегия	49416	2179,8	3937000	3531000
Польша	16418	1543,92	1369000	1221000

Примечание:

<sup>1)</sup> При годовой ставке дисконтирования  $q = 2\%$

В таблице 12 приведены для сравнения показатели для некоторых стран, характеризующие готовность инвестирования в обеспечение безопасности жизнедеятельности.

Пользуясь зависимостью (23), были рассчитаны ориентировочные минимальные (предельные) значения целевых вероятностей отказа  $p_{f,acc}$  применительно к офисным и жилым зданиям для условий Республики Беларусь, представленные в таблице 13.

**Таблица 13** – Предельные годовые значения целевых вероятностей отказа  $p_{f,acc(1)}$  для условий Республики Беларусь

$N_F / m^2$	Офисное здание $C_o = 900 USD / m^2$		
	Относительная стоимость мер безопасности $C_1 / C_o$		
	Малая 0,001	Умеренная 0,01	Большая 0,1
0,0001	$0,63 \times 10^{-3}$	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,63 \times 10^{-1}$
0,001	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,63 \times 10^{-3}$	$0,63 \times 10^{-2}$
0,01	$0,63 \times 10^{-5}$	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,63 \times 10^{-3}$
0,1	$0,63 \times 10^{-6}$	$0,63 \times 10^{-5}$	$0,63 \times 10^{-4}$
	Жилое здание $C_o = 700 USD / m^2$		
	0,0001	$0,5 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-2}$
	0,001	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-3}$
	0,01	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-4}$
	0,1	$0,5 \times 10^{-6}$	$0,5 \times 10^{-5}$

Принимая в общем случае, что для офисного здания норма площади на одного человека составляет от  $4,5 m^2$  до  $6 m^2$ , показатель  $N_F / m^2$  изменяется от  $0,167$  до  $0,222$  чел./ $m^2$ . Тогда целевые значения вероятностей отказа изменяются в пределах от  $p_{f,acc(1)} = 0,359 \times 10^{-6}$  до  $0,359 \times 10^{-4}$ . Для жилого здания норма площади  $10 m^2$ /чел (для Минска) дает  $N_F / m^2 = 0,1$  и изменения целевых значений вероятностей отказа от  $0,5 \times 10^{-6}$  до  $0,5 \times 10^{-4}$  (в зависимости от относительной стоимости мер безопасности). Для умеренной относительной стоимости мер безопасности из полученных значений видно, что для офисных зданий целевое предельное значение вероятностей отказа может быть ориентировочно принято  $p_{f,acc(1)} \cong 0,359 \times 10^{-5} = 3,6 \times 10^{-4}$  ( $\beta = 3,38$ ), а для жилых –  $p_{f,acc(1)} = 5 \times 10^{-4}$  ( $\beta = 3,29$ ).

Приведенные значения, безусловно, являются ориентировочными. При этом методы их определения содержат довольно существенные неопределенности. В первую очередь это относится к разделению на соответствующие классы относительной стоимости мер

безопасности ( $C_1 / C_o$ ). Они приняты, главным образом, опираясь на работы [6, 16, 18], в которых установлены следующие интервалы относительной стоимости:

- большая стоимость (А):  $10^{-2} \leq C_1 / C_o \leq 10^{-1}$ ;
- нормальная или умеренная (В):  $10^{-3} \leq C_1 / C_o \leq 10^{-2}$ ;
- малая (С):  $10^{-4} \leq C_1 / C_o \leq 10^{-3}$ .

Следует отметить, что данные классы стоимости выведены в работе [16] из зависимостей ( $C_1 / C_o$ ) – ( $H / C_o$ ) при сравнении с оптимальными значениями целевых мер надежности по JCSS [13]. Они выведены при ставке дисконтирования  $\gamma = 0,03$ , коэффициенте  $\omega = 0,02$ , коэффициентах вариаций  $V_E = V_R = 0,3$  для лог-нормального распределения сопротивлений и эффектов воздействий, как это принято в работах Rackwitz [14]. В работе [16] было показано, что комбинации различных распределений для эффектов воздействий и сопротивлений ( $W - N, GU - LN, GU - N$ ) при значениях коэффициентов вариаций  $V_E = V_R \leq 0,3$  мало влияют на результаты оптимизации. Распределение сопротивления имеет важное значение только в том случае, когда  $V_R \geq 0,3$ . При этом отмечается в [16], что для сопротивления это крайне редкий случай. Вместе с тем данные оценки приводятся без углубленного анализа, учитывающего неопределенности собственно расчетных моделей сопротивлений и эффектов воздействий. В связи с данными обстоятельствами следует дополнительно выполнить специальные исследования, опираясь на сформулированные принципы "комбинированной" оптимизации.

Предложенный в [16] LQI-целевой формат надежности, в принципе, может быть использован при оценивании отказа как на уровне конструктивного элемента, так и конструктивной системы в целом. При этом затраты на обеспечение безопасности  $C_1$  и число жертв  $N_F$  в случае реализации отказа определяют для соответствующего уровня.

Выполнение оценки на уровне элемента требует, однако, анализа конструкционной живучести для системы, особенно когда форма (режим) отказа связана с реализацией пластической деформативности системы, включая альтернативные пути передачи нагрузки. JCSS [13] предлагает устанавливать целевые значения мер надежности на уровне конструктивной системы. Эти же меры могут быть применены в качестве упрощения к отказу "критического" элемента, определяющего доминирующую форму отказа на уровне конструктивной системы.

### 5 Вероятность отказа конструктивного элемента и конструктивной системы в целом

В соответствии с концепцией, принятой в [6], предпочтительным является установление целевых значений мер надежности на уровне конструктивного элемента при проверках соответствующих предельных состояний. Это объясняется тем, что проектировщик в традиционных расчетах применяет формат безопасности на уровне элементов, а точнее сечений. Фактически все действующие нормы проектирования выполняют проверку предельных состояний в локализованных областях. При этом калибровки частных коэффициентов как для материалов, так и эффектов воздействий выполнены, опираясь на целевые меры надежности, нормированные для отдельного элемента. Вместе с тем конструктивные элементы, как было показано, подразделяются с точки зрения последствий отказов на классы надежности (RC), которые практически соответствуют установленным классам по последствиям отказа (CC). Соответственно, когда конструкция классифицируется с применением класса по последствиям (CC), её элементы рассчитывают для тех же целевых уровней надежности, что и конструкции в целом.

И хотя, согласно [5, 8], допускается применять различные классы надежности для различных конструктивных элементов, это практически никогда не выполняется при реальном проектировании. Следовательно, концепция дифференциации классов надежности или

последствий отказа крайне редко применяется при традиционном повседневном проектировании. Это, по мнению специалистов [7, 24], связано с тем, что приведенные в нормах проектирования описания классификационных процедур довольно расплывчаты, и опытные инженеры, полагаясь на свои знания, самостоятельно определяют критические ключевые элементы конструктивной системы, которые проектируют с более высоким, зачастую или как правило, неизвестным уровнем надежности. Кроме того, следует иметь в виду, что конструктивные элементы, запроектированные по действующим нормам, фактически будут иметь более высокие показатели надежности по сравнению с их целевыми значениями, что является результатом резервирования в расчетных моделях сопротивлений и эффектов воздействий, наличия альтернативных путей передачи эффектов воздействий и возможности их перераспределения при образовании пластических шарниров.

Как показывает анализ [21], во многих расчетных случаях отказ (разрушение) отдельного конструктивного элемента будет иметь значительно меньшие последствия по сравнению с полным разрушением всей конструктивной системы в целом или её значительной части. Поэтому следует ожидать, что целевые значения годовых вероятностей отказа будут различаться для конструктивного элемента и конструктивной системы, особенно в случае внезапного широко распространяющегося разрушения, как показано, например, в [21]. Поэтому при назначении целевых значений мер надежности следует различать вероятность отказа конструктивного элемента и вероятность обрушения конструктивной системы в целом.

Следует подчеркнуть, что в тех случаях, когда целевой уровень надежности устанавливается, принимая за основу последствия отказа, результатом которого является обрушение значительных площадей перекрытий и покрытий и большое число потенциальных жертв, очевидно, что такие уровни надежности связаны с отказом конструктивной системы, т. е. глобальным обрушением конструктивной системы или значительной её части. Обращая внимание на данное обстоятельство, в ряде публикаций [7, 21, 22] внесены предложения по учету последствий обрушения (отказа) конструктивной системы путем введения дополнения к индексу надежности  $\Delta\beta_{tag} = 0,4$ . Такой подход отражает на практике тот факт, что в случае отказа конструктивной системы ожидается примерно на порядок больше летальных исходов по сравнению с локальным отказом отдельного элемента (например, 10 против 1), а целевые значения параметров надежности устанавливаются в зависимости от числа смертельных исходов.

Конструкционные Еврокоды, в частности EN1992-1-1, определяют (устанавливают) целевые значения параметров надежности на уровне конструктивного элемента. Для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год и класса СС2 целевое значение вероятности отказа  $\beta_{tag1} = 4,7$  является несколько более высоким по сравнению с  $\beta_{tag1} = 4,2$  согласно JCSS [13].

Однако JCSS [13] предполагает, что конструктивные системы с несколькими, эквивалентными по значимости, формами отказа следует проектировать с более высоким уровнем надежности. Этот случай применим на практике для многих конструктивных систем, поэтому JCSS [13] рекомендуют повышать на  $\Delta\beta_{tag} = 0,5$  целевое значение индекса надежности, что дает такое же значение, что и EN1990. Следует отметить, что подобные значения дает и ASCE [10].

Для практикующих инженеров легче выполнить верификацию на уровне отдельного конструктивного элемента, чем для конструктивной системы в целом. Однако при появлении природных и техногенных угроз и связанных с ними особых воздействий или чрезвычайных нагрузок необходимо проверять исключительно сопротивление конструктивной системы в целом, особенно после её модификации (например, удаления элемента).

Эти требования должны быть реализованы через рассмотрение поведения конструктивной системы (косвенно через последствия

отказа) при выборе целевого значения меры надежности для отдельного конструктивного элемента.

В то время как подходы к назначению целевого уровня надежности, принятые в Еврокодах и JCSS [13] содержат классификацию конструкций, основанную на уровне последствий отказа в явном виде, в американских нормах ASCE [10] классификация опирается на обеспечение безопасности для людей, входящих в группу риска (т. е. риска потери жизни), что выражает последствия отказа в неявном виде (неявной форме). Следует отметить, что последствия в неявной форме, согласно ASCE [10], выражают в терминах числа летальных исходов  $N_F$ , которые в основном зависят:

- от числа людей в группе риска;
- вероятности появления особого события отказа;
- характеристик отказа (форма отказа, режим, распространения и т. д.);
- вероятности самоспасения и вероятности спасения людей специальными службами.

Оценка последствий отказа в ряде случаев связана с неопределенными параметрами, которые зачастую не зависят, собственно, от конструктивной системы (например, эффективность работы спасательных служб).

Для практикующего инженера, особенно на стадии проектирования, довольно сложно количественно определить расчетным путем последствия отказа, например, в приведенных выше терминах коэффициента последствий отказа  $\rho$  (см. таблицу 9).

## 6 О вычислении вероятностей отказа для конструктивной системы

Традиционный подход к оцениванию вероятности отказа, как меры надежности конструктивных систем, базирующийся на анализе возможных форм разрушения (режимов отказа) (англ. Failure Mode Approach – FMA) [6] имеет скорее теоретическую, нежели практическую, значимость в силу того, что не только сложен при применении к реальным конструктивным системам, но и имеет ряд недостатков:

- во-первых, конститутивные зависимости “ $\sigma - \varepsilon$ ”, описывающие поведение материалов под нагрузкой принимают в виде диаграммы идеального жесткопластического тела, что в случае большинства материалов (например, бетона) является значительным упрощением;
- во-вторых, в сложных конструктивных системах, имеющих большое число возможных форм разрушения (отказа), довольно сложно идентифицировать наиболее значимые формы отказа и сформулировать для них соответствующие функции состояния;
- в-третьих, сложно выявить корреляцию между различными формами отказа;
- в-четвертых, общая вероятность отказа конструктивной системы не может быть оценена даже тогда, когда доминирующая форма разрушения и её функция состояния известны а priori.

В последние годы довольно интенсивно развиваются подходы к оцениванию надежности конструктивных систем, основанные на т. н. глобальной функции предельного состояния (global limit state), отражающей глобальную реакцию конструктивной системы, полученную нелинейным расчетом и представляющую собой, по сути, неявную случайную функцию базисных переменных (свойств бетона, арматуры, геометрических размеров) и функцию воздействий.

Большинство известных предложений [21, 24], в общем случае, включают:

(1) интегрированный метод нелинейного анализа конструктивной системы, предполагающий применение близких к реальным физическим, диаграмм деформирования “ $\sigma - \varepsilon$ ” для материалов; учет эффектов 1-го и 2-го рода порядка, используемых для установления доминирующих форм отказа;

(2) статистики глобальной несущей способности (сопротивления) конструктивной системы, получаемые, например, при применении симуляции Монте-Карло (MCS);

Таблица 14 – Сравнение подходов к назначению целевых мер надежности

Подход, стандарт	Преимущества	Недостатки
Анализ рисков “F-N”-кривые ISO 2394:1998 [25]	– легко применяется; – требуется всего несколько входных параметров; – традиционно применяется в различных отраслях промышленности, что делает возможным сравнение между различными видами активностей	– может быть принято решение, не склонное к риску, в пользу определенных категорий жизни; – стоимость мер безопасности не учитывается в расчете напрямую, хотя они могут быть отражены в оптимизационной процедуре
Стоимостная оптимизация ISO 2394:1998 [25] ISO 2394:2015 [12] ISO 13822:2010 [28]	– позволяет предложить оптимальную проектную стратегию по отношению ко всем затратам жизненного цикла; – обеспечивает оптимальное решение для собственника, независимо от других отраслей промышленности	– часто сложно установить (определить) достоверно последствия отказа; – ставки дисконтирования трудно устанавливать на долгосрочную перспективу, определяемую сроком службы здания
Принцип предельных затрат на спасение жизни (LQI-принцип) ISO 2394:2015 [12]	– является комбинацией подхода, основанного на обеспечении безопасности жизнедеятельности и экономической оптимизации; – позволяет сравнить инвестиции в сохранение жизни в различных секторах и отраслях промышленности	– зависит от целого ряда социально-экономических факторов, которые сложно оценить в долгосрочной перспективе; – сравнивает стоимость в монетарном выражении ожидаемых жертв определенной деятельности с экономической ценностью этой деятельности; опасность, которой подвергаются люди может варьироваться в зависимости от индивидуума в пострадавшей популяции

(3) выбор (подбор) наиболее подходящей функции плотности вероятностей ( $pdf$ ) для глобального сопротивления, опираясь на первые моменты ( $R_m, \sigma_R$ );

(4) формирование глобальной функции состояния, которая включает глобальную функцию несущей способности (сопротивления) и функцию эффектов воздействий;

(5) приближенная оценка надежности конструктивной системы с применением классических подходов (например, FORM/SORM), используемых для оценки надежности конструктивных элементов (элементов конструктивной системы).

В последние годы получили довольно интенсивное развитие методы, основанные на вычислении т. н. “глобального сопротивления” для конструктивной системы.

Методы вычисления глобального сопротивления конструктивной системы, предлагаемые в работах [21, 24], имеют следующие преимущества:

- появляется возможность напрямую обойти сложности, связанные с выбором значимых форм отказа (разрушения) при анализе с использованием метода NLFEA;
- используются реальные диаграммы деформирования “ $\sigma - \varepsilon$ ”, описывающие механические свойства материалов, что позволяет приблизить численное моделирование к физическому.

В работе [21] предлагаемый метод называют “теорией глобальной надежности конструкций” (“Global Reliability Theory of Structures” – GRTS).

При выполнении вероятностного анализа конструктивных систем приходится сталкиваться с рядом сложностей, к которым относятся:

(а) *многоуровневая система, подвергаемая анализу*: факторы, влияющие на глобальное сопротивление конструктивной системы принято классифицировать на пяти уровнях: (1) уровень материалов; (2) уровень сечений; (3) уровень элементов конструкции; (4) уровень конструкции (суб-системы); (5) уровень конструктивной системы.

(б) *нелинейность*: сопротивление конструктивной системы является нелинейной функцией перечисленных выше факторов, особенно в случае, когда конструкция получает серьезные повреждения и/или даже разрушения;

(в) *корреляция*: в определенной степени могут существовать корреляционные связи между базисными переменными на одном уровне и/или между переменными на различных уровнях оценивания;

(г) *очень высокая степень неявности (implicitness)*: сопротивление, определяемое нелинейным численным анализом (NLFEA), является, по сути, неявной функцией базисных переменных и принимает в общем случае вид черного ящика (black box).

Кроме этого, одной из важнейших проблем, которым посвящаются целый ряд работ [21, 24], является вычисление вероятностей

отказа для системы, основываясь на довольно ограниченной выборке (как правило, <15 элементов для глобальных сопротивлений). Следует помнить, что выполнение даже отдельного нелинейного анализа сложных систем является довольно трудоемкой задачей, содержащей ряд неопределенностей как методологического, так и вычислительного характера. При этом повторение, например, 15 расчетов при случайном выборе значений базисных переменных может не дать ясного ответа о вероятности отказа системы, хотя бы в силу того, что традиционные подходы забывают упоминать о обеспеченности данной оценки.

Таким образом, вычисление вероятностей отказа для ограниченных выборок принимает самостоятельное важное значение.

### Заключение

Сравнение выбранных и проанализированных выше подходов, применяемых при нормировании целевых мер надежности (см. таблицу 14), показывает, что:

1. Целевые уровни надежности, рекомендованные в действующих нормах, являются несовместимыми как с точки зрения критериев, так и входящих в них параметров. Поэтому необходима разработка рациональных критериев назначения допустимых рисков для обеспечения безопасности людей, экономических и экологических последствий отказа конструкции.
2. В общем случае оптимальные уровни надежности следует устанавливать, рассматривая совместно относительную стоимость мер безопасности и предполагаемые затраты, связанные с последствиями отказа в течение проектного срока службы (экономическая оптимизация) с учетом ограничений, накладываемых требованием, основанном на принципе предельных затрат на спасение жизни (LQI-подход).
3. В общей стратегии проектирования преобладают экономические аспекты, в то время как аспекты безопасности жизнедеятельности должны проверяться только в особых случаях (например, при проверках живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях).

### Список цитированных источников

1. Райзер, В. Д. Теория надежности в строительном проектировании / В. Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.
2. Шпете, Г. Надежность несущих конструкций / Г. Шпете; пер. с нем. О. О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 228 с.
3. Ржаницын, А. П. Теоретические обоснования и перспективы развития методологии расчета строительных конструкций. – Москва, 1958. – М.: Госстройиздат, 1961. – С. 212–220.
4. Skjong, R. Social Indicator for Risk Acceptance / R. Skjong, K. Ronold // Proc. OMAE. – Lisbon, Portugal, 1998.
5. Основы проектирования конструкций : ТКП EN 1990. – Минск, 2010.

6. Coile, R. V. The meaning of Beta: background and applicability of the largest reliability index for normal conditions to structural fire engineering / R. V. Coile, D. Hopkin, L. Bisby, R. Caspeele // PROTECT 2017, 11–12 December 2017. – China : Procedia Engineering – P. 528–536.
  7. Diamantidis, D. Reliability Differentiation and Uniform Risk in Standards : a Critical Review and Practical Appraisal / D. Diamantidis, M. Sykora // Future Tends in Civil Engineering – Zagreb, Croatia, 17 oct. 2019. – P. 59–78.
  8. Basis of Structural Design : EN 1990. – Eurocode European Committee for Standardization, 2002.
  9. Basis of Structural Design : prEN 1990 Eurocode.
  10. American Society of Civil Engineering (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and other Structures // ASCE SE17-16. – Reston, VA, USA, 2017.
  11. Faber, M. H. Risk assessment for civil engineering facilities : critical overview and discussion / M. H. Faber, M. S. Stewart // Reliability engineering and System Safety. – 2017. – № 80. – P. 62–68.
  12. International Organization for Standardization, ISO 2394 : 2015 – General principles on reliability for structures, 2015.
  13. Joint Committee for Structural Safety (JCSS) / Probabilistic Model Code, 2001.
  14. Rackwitz, R. Optimization and risk acceptability based on the life quality index // Structural Safety. – 2002. – № 24. – P. 297–331.
  15. Holicky, M. The target reliability and design working life-safety and Security Engineering IV, doi.: 10.2495/SAFE110151. – P. 161–170.
  16. Fisher, K. Optimal and acceptable reliabilities for structural design – Structural Safety / K. Fisher, C. Viljoen, J. Köhler, M. H. Faber // doi.org/10.1016/j.strusafe. 2018.09.002.
  17. Fisher, K. The LQ1 acceptance criterion and human compensation costs for monetary optimization – a discussion note / K. Fisher, M. H. Faber // LQI Symposium, 2012.
  18. Virguez, E. Supporting Decisions on Global Health and Life Safety Investments / E. Virguez, M. H. Faber.
  19. Fisher, K. Deriving target reliability from LQI / K. Fisher, M. H. Faber // LQI Symposium in kqs. Lyngby, Danmark – Aug. 21-23, 2012. – P. 78–92.
  20. Holicky, M. Determination of Target Safety for Structures / M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora // ICAST 12, Vancouver, Canada, July 12-15, 2015.
  21. Lu, D. Global seismic Reliability Analysis of Building Structures based on System / D. Lu, P. Yu. Song // Level Limit States / Oct. 12-17, 2008. – Beijing, China.
  22. Hingorani, R. Structural safety requirements based on risks to persons / R. Hingorani, P. Tanner // Proc. Journal internationals.
  23. Vrouwenvelder, A. C. Developments towards full probabilistic design codes / Struct. Safety, 24, 2002. – P. 417–432.
  24. Diamantidis, D. Reliability Differentiation in the Eurocodes / D. Diamantidis, M. Holicky // ASCE Structural Congress, Vancouver, Canada, 2008.
  25. International Organization of Standardization ISO 2394:1998 – General principles of reliability for structures, 1998.
  26. Nathwani, J. S. Affordable safety by choice : the life quality method / J. S. Nathwani, N. C. Lind, D. M. Pandey. – Waterloo : University of Waterloo, 1997.
  27. General actions. Accidental actions : EN 1991-1-7.
  28. Assessment of existing structures : ISO13822, 2010.
- References**
1. Rajzer, V. D. Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proek-tirovanii / V. D. Rajzer. – M. : IZD-VO ACB, 1998. – 304 s.
  2. Shpete, G. Nadezhnost' nesushchih konstrukcij / G. Shpete ; per. s nem. O. O. Andreeva. – M. : Strojizdat, 1994. – 228 s.
  3. Rzhnacyan, A. R. Teoreticheskie obosnovaniya i perspektivy razvitiya metodologii rascheta stroitel'nyh kon-strukcij, Moskva, 1958. – M. : Gosstrojizdat, 1961. – S. 212–220.
  4. Skjong, R. Social Indicator for Risk Acceptance / R. Skjong, K. Ronold // Proc. OMAE. – Lisbon, Portugal, 1998.
  5. Osnovy proektirovaniya konstrukcij : TKP EN 1990. – Minsk, 2010.
  6. Coile, R. V. The meaning of Beta: background and applicability of the largest reliability index for normal conditions to structural fire engineering / R. V. Coile, D. Hopkin, L. Bisby, R. Caspeele // PROTECT 2017, 11–12 December 2017. – China : Procedia Engineering – P. 528–536.
  7. Diamantidis, D. Reliability Differentiation and Uniform Risk in Standards : a Critical Review and Practical Appraisal / D. Diamantidis, M. Sykora // Future Tends in Civil Engineering – Zagreb, Croatia, 17 oct. 2019. – P. 59–78.
  8. Basis of Structural Design : EN 1990. – Eurocode European Committee for Standardization, 2002.
  9. Basis of Structural Design : prEN 1990 Eurocode.
  10. American Society of Civil Engineering (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and other Structures // ASCE SE17-16. – Reston, VA, USA, 2017.
  11. Faber, M. H. Risk assessment for civil engineering facilities : critical overview and discussion / M. H. Faber, M. S. Stewart // Reliability engineering and System Safety. – 2017. – № 80. – P. 62–68.
  12. International Organization for Standardization, ISO 2394 : 2015 – General principles on reliability for structures, 2015.
  13. Joint Committee for Structural Safety (JCSS) / Probabilistic Model Code, 2001.
  14. Rackwitz, R. Optimization and risk acceptability based on the life quality index // Structural Safety. – 2002. – № 24. – P. 297–331.
  15. Holicky, M. The target reliability and design working life-safety and Security Engineering IV, doi.: 10.2495/SAFE110151. – P. 161–170.
  16. Fisher, K. Optimal and acceptable reliabilities for structural design – Structural Safety / K. Fisher, C. Viljoen, J. Köhler, M. H. Faber // doi.org/10.1016/j.strusafe. 2018.09.002.
  17. Fisher, K. The LQ1 acceptance criterion and human compensation costs for monetary optimization – a discussion note / K. Fisher, M. H. Faber // LQI Symposium, 2012.
  18. Virguez, E. Supporting Decisions on Global Health and Life Safety Investments / E. Virguez, M. H. Faber.
  19. Fisher, K. Deriving target reliability from LQI / K. Fisher, M. H. Faber // LQI Symposium in kqs. Lyngby, Danmark – Aug. 21-23, 2012. – P. 78–92.
  20. Holicky, M. Determination of Target Safety for Structures / M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora // ICAST 12, Vancouver, Canada, July 12-15, 2015.
  21. Lu, D. Global seismic Reliability Analysis of Building Structures based on System / D. Lu, P. Yu. Song // Level Limit States / Oct. 12-17, 2008. – Beijing, China.
  22. Hingorani, R. Structural safety requirements based on risks to persons / R. Hingorani, P. Tanner // Proc. Journal internationals.
  23. Vrouwenvelder, A. C. Developments towards full probabilistic design codes / Struct. Safety, 24, 2002. – P. 417–432.
  24. Diamantidis, D. Reliability Differentiation in the Eurocodes / D. Diamantidis, M. Holicky // ASCE Structural Congress, Vancouver, Canada, 2008.
  25. International Organization of Standardization ISO 2394:1998 – General principles of reliability for structures, 1998.
  26. Nathwani, J. S. Affordable safety by choice : the life quality method / J. S. Nathwani, N. C. Lind, D. M. Pandey. – Waterloo : University of Waterloo, 1997.
  27. General actions. Accidental actions : EN 1991-1-7.
  28. Assessment of existing structures : ISO13822, 2010.