

УДК 624.012.45

**О НАЗНАЧЕНИИ ЦЕЛЕВЫХ УРОВНЕЙ НАДЕЖНОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ  
СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ:  
МЕТОД ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

***В.В. Тур, Д.Н. Лазовский***

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

e-mail: [profturvic@gmail.com](mailto:profturvic@gmail.com), [d.lazovski@psu.by](mailto:d.lazovski@psu.by)

*В настоящем докладе представлен подход к назначению целевого уровня надежности, применяемого для оценивания существующих конструкций строительных сооружений с учетом остаточного срока службы и стоимости мер безопасности. Принятый подход основан на применении метода экономической оптимизации с ограничением значения параметра принятия решения и соответственно уровня надежности существующей конструкции с учетом обеспечения безопасности жизнедеятельности по индексу качества жизни согласно ISO 2394:2015 (LQI).*

**Ключевые слова:** существующая конструкция, надежность, остаточный срок службы.

**ON THE PURPOSE OF THE TARGET RELIABILITY LEVELS USED IN THE EVALUATION OF EXISTING  
STRUCTURES OF CONSTRUCTION STRUCTURES: THE METHOD OF ECONOMIC OPTIMIZATION**

***V. Tur, D. Lazovsky***

Brest State Technical University, Republic of Belarus

Polotsk State University, Republic of Belarus

e-mail: [profturvic@gmail.com](mailto:profturvic@gmail.com), [d.lazovski@psu.by](mailto:d.lazovski@psu.by)

*This report presents an approach to assigning a target level of reliability used to evaluate existing structures of construction structures, taking into account the remaining service life and the cost of safety measures. The adopted approach is based on the application of the method of economic optimization with a limitation of the value of the decision-making parameter and, accordingly, the level of reliability of the existing structure, taking into account the safety of life according to the quality of life index according to ISO 2394:2015 (LQI).*

**Keywords:** existing design, reliability, residual service life.

**Введение.** В соответствии с действующими нормативными документами оценивание надежности существующих конструкций следует выполнять в рамках метода предельных состояний (полностью вероятностным или полувероятностным методом). Очевидно, что проверки предельных состояний существующих конструкций, в отличие от вновь проектируемых, должны опираться на отличающиеся целевые параметры надежности, которые следует назначать с учетом следующих аспектов:

– повышение целевого уровня надежности по сравнению с установленным на момент обследования обычно предполагает больший объем затрат для существующих конструкций, чем для вновь возводимых;

– остаточный срок службы существующих конструкций практически всегда меньше, чем проектный (50...100 лет), принятый при проектировании новых конструкций;

– информация о фактическом состоянии существующей конструкции является доступной для выполнения оценок надежности (отчеты по обследованию технического состояния, результаты испытаний, измерений, лабораторных исследований). В данном случае, в отличие от проектирования новой конструкции, когда инженер оперирует, главным образом, абстракциями различного уровня, при оценивании существующих конструкций, последние, уже не абстракция, а реальность несмотря на то, что эту конструкцию можно осмотреть, прикоснуться, испытать и т.д., число неопределенностей, участвующих в расчетных моделях, применяемых для оценивания надежности практически остается неизменным.

Целевые уровни надежности, рекомендованные СН 2.01.01 [10] применимы главным образом к вновь проектируемым конструкциям. СТБ ISO 2394 [6] дает более детальные и несколько отличающиеся рекомендации, относящиеся к принципам обеспечения надежности. Целевые значения уровней надежности, приведенные в документах [6, 7] частично базируются на калибровках с учетом предыдущей практики, и их следует рассматривать как некоторые индикативные значения, что вполне приемлемо при проектировании новых конструкций, когда оперируют некоторыми относительными или условными вероятностями отказа.

Для оценивания существующих конструкций СТБ ISO 13822 [8] допускает возможность назначения другого значения целевого уровня надежности, принимая за основу оптимизацию полной стоимости (затрат), связанной с остаточным сроком службы. Однако, индикативные целевые уровни надежности для выполнения проверок предельных состояний несущей способности всё равно связывают со стандартным минимальным периодом для оценивания безопасности (т.е. 50 лет опять понимается в качестве остаточного срока службы согласно [1; 8]). При этом в стандарте [8] отсутствуют указания о том, каким образом связать эти целевые значения с более коротким остаточным сроком службы с учетом сохранения оптимального экономического решения.

При этом, общепризнано [1; 5], что неэкономично устанавливать для существующих строительных сооружений те же значения целевых уровней надежности, как и для вновь проектируемых.

Согласно СТБ ISO 2394:2015 (см. Приложение G, таблица G.5) целевой уровень надежности существующих конструкций допускается понижать по сравнению с вновь проектируемыми в связи с тем, что восстановление целевого уровня надежности до состояния новой конструкции требует относительно больших затрат (см. рисунок 1). Это отражается более крутым наклоном линии  $C_{upgrade}$  на рисунке 1: затраты на возведение новой конструкции  $C_{build}$  будут повышаться в меньшей степени с повышением уровня безопасности (индекс надежности  $\beta$ ), чем затраты на модернизацию (включая усиление) для существующей конструкции  $C_{upgrade}$ .

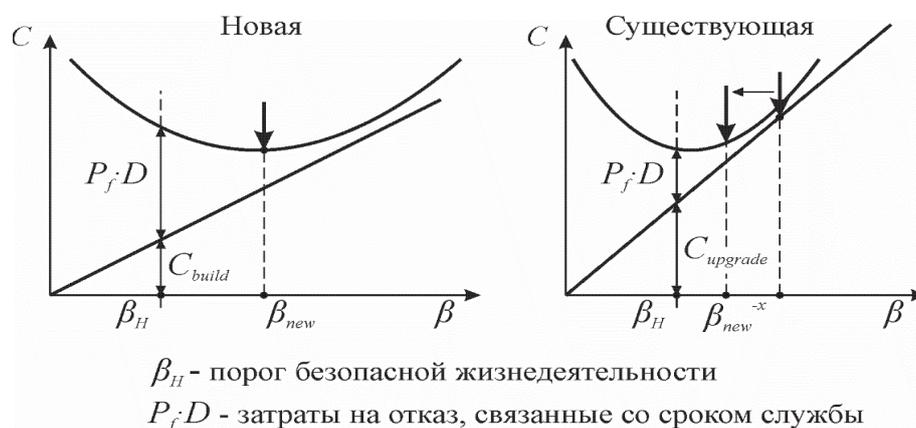


Рисунок 1. – Иллюстрация к различным в оптимизации затрат для новой и существующей конструкции [1]

Следовательно, для существующей конструкции могут быть использованы значения относительной стоимости мер безопасности на одну категорию выше, т.е. появляется автоматически возможность применения «высокой» относительной стоимости мер безопасности вместо «умеренной» без внесения изменений в конструктивную систему. Это находится в соответствии с рекомендациями, изложенными в fib MC 2010 [4], Probabilistic Model Code JCSS [9] и СТБ ISO 2394:2015 [7]. Рекомендуемые целевые значения индексов надежности связаны как с последствиями наступления отказа, так и с относительной стоимостью мер безопасности, но для реферативного периода в один год. СТБ ISO 13822 [8] обращается к оценке существующих конструкций, указывая, при этом, на четыре целевых уровня надежности для различных последствий отказа (для проверок предельных состояний несущей способности): малые последствия ( $\beta = 2,3$ ); незначительные ( $\beta = 3,1$ ); умеренные ( $\beta = 3,8$ ); значительные или высокие ( $\beta = 4,3$ ). Оценочным (или реферативным) периодом является «стандартный минимальный период безопасности» (т.е. 50 лет). Рекомендации по назначению целевых уровней надежности приведены и в некоторых национальных стандартах. Например, стандарт NEN 8700:2009 для оценивания существующих конструкций приводит значения целевых индексов надежности для остаточного срока службы (принимаемого как реферативный период), рассматривая как стратегию оптимальной модернизации, так и минимального уровня надежности, ниже которого конструкция не может быть допущена к эксплуатации без модификации. В общем случае ISO 2394 (ISO 2394:1998 и ISO 2394:2015), JCSS [9] представляют более приемлемую дифференциацию надежности для существующих строительных конструкций по сравнению с СТБ ISO 13822 [8] и EN 1990 [2], поскольку учитывают стоимость мер, обеспечения безопасности.

**Экономическая оптимизация целевого уровня надежности. Влияние остаточного срока службы.** При рассмотрении только экономической оптимизации для более короткого остаточного срока службы рекомендуется принимать следующие допущения:

- использование низких ставок дисконтирования (не более 0,03) [1];
- практически линейное во времени повышение вероятности отказа;
- независимость целевой вероятности отказа или индекса надежности от рассматриваемого остаточного срока службы строительного сооружения.

Поэтому, экономически более выгодно инвестировать в меры обеспечения безопасности, если можно получить о них выгоду в течение более длительного периода времени.

**Методология экономической оптимизации.** Согласно СТБ ISO 2394 [6] целевые уровни надежности для проектирования новых и оценивания существующих конструкций следует устанавливать с учетом последствий отказа, формы разрушения, экономических потерь и экологических угроз, социальных потерь и т.д., и стоимости затрат на меры по снижению вероятности отказа (стоимости мер безопасности). Если не рассматривать в монетарном выражении потери, связанные с человеческими жертвами в результате отказа строительной конструкции, целевой уровень надежности на данном этапе может быть в первом приближении установлен на основе экономической оптимизации [1]. В противном случае, для обеспечения приемлемых рисков (индивидуальных и групповых) используются подходы, основанные, например, на индексе качества жизни (LQI – life quality index) согласно ISO 2394:2015 [7]. При этом, ISO 2394 [7] указывает, что целевой уровень надежности должен быть установлен, основываясь на разумном балансе между последствиями отказа и стоимостью мер обеспечения безопасности. С экономической точки зрения, цель состоит в том, чтобы минимизировать затраты на срок службы конструкции.

Предполагаемые полные затраты  $C_{tot}$  в общем случае могут рассматриваться как сумма предполагаемых затрат на технические обследования, обслуживание, модернизацию и затрат, связанных с отказом конструкции.

Параметры принятия решения  $d$ , который следует оптимизировать, оказывает влияние на сопротивление, долговечность, пригодность к нормальной эксплуатации, стратегии модернизации и т.д.

В общем случае, единовременные затраты на модернизацию включают:

- стоимость затрат  $C_0$ , не зависящая от значения параметра принятия решения  $d$  (стоимость обследования технического состояния, оценивания текущей надежности, администрирования и управления, экономические потери, связанные с перебоями в работе, прерыванием базиса, перемещением производства, утратой репутации и т.д.);

- стоимость затрат  $C_m(d)$ , зависящая от параметра принятия решения.

Стоимость затрат на отказ  $C_f$  представляет собой затраты, связанные с последствиями отказа конструкции, и включает:

- стоимость затрат на модернизацию (включая усиление) или замену строительной конструкции или её элемента, включая оценочные ориентировочные базовые затраты на модернизацию, полученные на основании собранной исходной информации в ходе обследования, а также дополнительные затраты, учитывающие риски от непредвиденного ущерба;

- экономические затраты (ущерб) в результате вывода из эксплуатации неисправной конструктивной системы, если соответствующие затраты учитывают в региональной экономике;

- социальные последствия (стоимость в монетарном выражении жертв и раненых в результате отказа);

- затраты на ликвидацию неблагоприятных экологических последствий (например, выброса  $CO_2$  и других агрессивных газов, загрязнения воды и почвы);

- затраты от психологических эффектов (например, утрата репутации).

Все ожидаемые (или прогнозируемые) затраты на отказ, которые могут появиться в течение реферативного периода, равно, как правило, остаточному сроку службы строительного сооружения следует оценивать в соответствии с их текущим значением. Это ведет к следующему выражению для ожидаемых затрат на отказ [5]:

$$E[C_f(t_{ref}; d)] \approx C_f \cdot P_f(d) \cdot TF(t_{ref}; d), \quad (1)$$

где  $C_f$  – текущее значение затрат на отказ;

$P_f(d)$  – вероятность отказа, определенная при параметре принятия решения  $d$  для базового реферативного периода  $t_0$ ;

$TF$  – временная функция, которую можно принять согласно [5].

Согласно [1, 5], базовый реферативный период следует выбирать таким образом, чтобы события отказа в различные базовые периоды могли рассматриваться как независимые. Могут быть полезны следующие указания относительно выбора базового реферативного периода  $t_0$ , приведенные в [1]:

- один год может быть принят в большинстве случаев (например, когда конструкционную надежность определяют климатические и/или транспортные воздействия);

- от пяти до десяти лет можно рассматривать для офисных зданий с преобладающим устойчивым компонентом функциональной нагрузки;

- $t_0 = t_{ref}$  может применяться тех случаях, когда на надежность строительной конструкции несущественно влияют изменяющиеся во времени явления (например, геотехнические конструкции, кладка из природных и искусственных камней и т.д.).

Временной коэффициент  $TF$  получают для суммы геометрической прогрессии в виде [5]:

$$TF(t_{ref}; d) = \frac{1 - \left[ (1 - P_f(d)) / (1 + q) \right]^{t_{ref}/t_0}}{1 - \left[ (1 - P_f(d)) / (1 + q) \right]}, \quad (2)$$

где  $q$  – годовая ставка дисконтирования, принимаемая равной при оценивании  $q \approx 0,03$ , согласно [1].

Прогнозируемые полные затраты на отказ выражают следующим образом:

– для случая предполагаемой модернизации (включая, усиление)

$$E[C_{tot}(t_{ref}; d)] = C_0 + C_m(d) + C_f \cdot P_f(d) \cdot TF(t_{ref}; d), \quad (3)$$

– для случая, когда модернизация не предполагается (принимают текущее состояние)

$$E[C_{tot}(t_{ref}; d_0)] = C_f \cdot P_f(d) \cdot TF(t_{ref}; d_0), \quad (4)$$

где  $d_0$  – значение параметра принятия решения до модернизации (включая усиление).

Предыдущий опыт показывает, что удобно анализировать затраты, связанные с текущим значением стоимости конструкции (текущая стоимость нового конструктивного элемента, идентичного оцениваемому существующему по величине параметра принятия решения  $d_0$ ).

Данная стоимость  $C_{str}$  включает все затраты, включая затраты на рабочую силу, материалы, оборудование, управление, контроль качества (сметную стоимость конструкции).

Тогда уравнения (3) и (4) можно переписать:

– в случае модернизации:

$$\begin{aligned} \frac{C_{tot}(t_{ref}; d)}{C_{str}} &= C_{tot}(t_{ref}; d) = \frac{C_0}{C_{str}} + \frac{C_m(d)}{C_{str}} + \frac{C_f}{C_{str}} \cdot (P_f(d) \cdot TF) = \\ &= C_0 + C_m(d) + C_f \cdot P_f(d) \cdot TF(t_{ref}; d), \end{aligned} \quad (5)$$

– в случае без модернизации:

$$C_{tot}(t_{ref}; d_0) = C_f \cdot P_f(d_0) \cdot TF(t_{ref}; d), \quad (6)$$

Тогда оптимальное значение параметра принятия решения  $d_{opt}$  (оптимальная стратегия модернизации) получим из следующего выражения:

$$\min d C_{tot}(t_{ref}; d) = C_{tot}(t_{ref}; d_{opt}), \quad (7)$$

Оптимальная стратегия модернизации предполагает установление целевого индекса надежности, соответствующей  $d_{opt}$ :

$$\beta_{tag, up} \approx -\Phi^{-1} \left[ \left( \frac{t_{ref}}{t_0} \right) \cdot P_f(d_{opt}) \right], \quad (8)$$

При этом стоимость затрат, определенные по формулам (3) и (4) следует сравнивать между собой для того, чтобы принять решение о необходимости модернизации конструкции или конструктивного элемента.

Граничное значение  $d_{0,lim}$  параметра принятия решения до выполнения модернизации можно найти следующим образом:

$$C_f \cdot P_f(d_{0,lim}) \cdot TF(t_{ref}; d_{0,lim}) = C_0 + C_m(d_{opt}) + C_f \cdot P_f(d_{opt}) \cdot TF(t_{ref}; d_{opt}), \quad (9)$$

Для  $d_0 < d_{0,lim}$  – уровень надежности существующей конструкции настолько низкий, что последствия отказа становятся высокими. При  $d_0 > d_{0,lim}$  состояние конструкции является допустимым с экономической точки зрения.

Минимальный индекс надежности  $\beta_0$ , ниже которого конструкция или элемент конструкции рассматривается как ненадежный и требует модернизации (усиления):

$$\beta_0 \approx -\Phi^{-1} \left[ \left( \frac{t_{ref}}{t_0} \right) \cdot P_f(d_{0,lim}) \right], \quad (10)$$

В данном случае значения минимального индекса надежности строительной конструкции должны находиться в согласовании со значениями, полученными согласно ISO 2394:2015, основываясь на обеспечении безопасности жизнедеятельности (LQI-метод).

*Заключение.* Предложены теоретические подходы, к назначению требуемого уровня надежности для оценивания существующих строительных конструкций, основанные на экономической оптимизации с учетом остаточного срока службы и стоимости мер обеспечения безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *fib* Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures – Fideration Internationale du betón (*fib*), 2016 – DCC Document Competence Center Kástle.k., Germany.
2. EN 1990. Eurocode – Basis of Structural Design.
3. EN 1991-1-1:2004. Design of Concrete Structures – General rules and rules for building.
4. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. – Ernst and Sohn, 2013, -p.p. 389.
5. Holicky, M. Optimization of the target reliability for temporary structures / M. Holicky // Civil Engineering and Environmental Systems. – Vol. 30, № 2. – P. 87–96.
6. ISO 2394:1998. General principles on reliability for structures.
7. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures.
8. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures.
9. JCSS PMC (JCSS Probabilistic Model Code) (periodically updated online publication). Joint Committee on Structural Safety. Mode access: <https://jcss.byg.dtw.dk>.
10. CH 2.01.01 – Основы проектирования строительных конструкций.