

В.В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}¹ УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь² Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь

НОРМИРУЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Учитывая изменчивую природу несущей способности и воздействий, проверка проектной надежности строительных конструкций сводится к обеспечению того, что вероятность наступления предельного состояния не должна превышать целевое (допустимое) значение. Этот метод известен как вероятностный метод проверки предельных состояний. Существуют более простые методы проверки предельных состояний для инженерных расчетов, наиболее популярным из которых является метод коэффициентов надёжности. Однако в той или иной степени все существующие методы проверки предельных состояний и, соответственно, методы обеспечения проектной надежности строительных конструкций основаны на вероятностном методе. По этой причине исследования и нормативное закрепление допустимых вероятностей отказа являются одной из первостепенных задач научного сообщества и национальных органов в области разработки строительных норм и правил. На основании аналитического обзора исследований представлено описание вероятности отказа и индекса надежности как мер проектной надежности; зафиксированы положения, на основании которых необходимо назначать целевое значение вероятности отказа, включая прямые и косвенные последствия отказа; представлены результаты сравнения численных значений индексов надежности. Наиболее полная методика определения целевых значений вероятности отказа изложена в международном стандарте ISO 2394. Данный стандарт содержит указания по определению целевых индексов надежности на основе экономической оптимизации, анализа индивидуального или общественного риска, а также индекса качества жизни. Однако данная методика и, в особенности, численные значения индексов надежности требуют адаптации с учетом экономических особенностей конкретной страны.

Ключевые слова: вероятность отказа, индекс надежности, формат безопасности, вероятностный метод, коэффициенты надежности, неопределенности, Еврокод.

V.V. NADOLSKI^{1,2}¹ Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus² Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

STANDARDIZED VALUES OF THE FAILURE PROBABILITY OF BUILDING STRUCTURES

Abstract. Taking into account the variable nature of load-bearing capacity and loads, checking the design reliability of building structures leads to ensuring that the probability of occurrence of the limit state should not exceed the target (permissible) value. This method is known as the probabilistic limit state verification method. There are simpler methods for checking limit states for engineering calculations, the most popular of which is the method of reliability factors. However, all existing methods for checking limit states and, accordingly, methods for ensuring the design reliability of building structures are based on the probabilistic method. For this reason, research and the normative consolidation of acceptable failure probabilities are one of the primary tasks of the scientific community and national authorities in the field of developing norms and rules. Based on an analytical review of the research, a description of the probability of failure and the reliability index as measures of design reliability is presented and provisions are fixed on the basis of which it is necessary to assign a target value for the probability of failure, including direct and indirect consequences of failure.

The conditions for assigning target failure probabilities in regulatory documents are systematized and the results of comparing the numerical values of reliability indices are presented. The most complete methodology for determining the target values of the probability of failure is set out in the international standard ISO 2394. This standard contains guidelines for determining target reliability indices based on economic optimization, analysis of individual or public risk, as well as the quality of life index. However, this methodology, and in particular the numerical values of reliability indices, require adaptation taking into account the economic characteristics of a particular country.

Keywords: *probability of failure, reliability index, safety format, probabilistic method, reliability factors, uncertainties, Eurocode.*

Введение

Проектирование строительных конструкций выполняется в рамках метода предельных состояний. В свою очередь, предельное состояние соответствует дискретному представлению поведения (отклика, реакции) конструкции при заданном воздействии, с которым могут быть связаны потери и/или повреждения [1]. Учитывая изменчивую природу несущей способности и воздействий, проверка проектной надежности строительных конструкций сводится к обеспечению того, что вероятность наступления предельного состояния p_f не превышает допустимое значение p_t , т.е. $p_f \leq p_t$. Этот метод известен как вероятностный метод проверки предельных состояний [2, 3]. Существуют более простые методы проверки предельных состояний для инженерных расчетов, наиболее популярным из которых является метод коэффициентов надёжности. Однако в той или иной степени все существующие методы проверки предельных состояний и, соответственно, методы обеспечения проектной надежности строительных конструкций основаны на вероятностном методе [4, 5].

По этой причине исследования и нормативное закрепление допустимых вероятностей отказа являются одной из первостепенных задач научного сообщества и национальных органов в области разработки строительных норм и правил [6]. Однако в Российской Федерации не установлены целевые значения показателя надежности, об этом отмечает один из авторов ГОСТ 27751, профессор В.Д. Райзер: *“Невозможно также сказать, какой уровень надежности требуют нормы проектирования, и должен ли он быть одинаковым для всех сооружений или различаться, а если должен различаться, то в каких пределах и в зависимости от чего”* [7]. Отсутствие целевых значений вероятности отказа сдерживает развитие и внедрение вероятностных методов проверок предельных состояний, так как расчетное (полученное) значение вероятности отказа не с чем сравнивать и, соответственно, невозможно сделать вывод о достаточности надежности [8, 9]. Поэтому целью данного научного исследования является аналитический обзор и анализ значений вероятностей отказа, регламентированных в международных нормативных документах EN1990, ISO 2394, ASCE 7, а также анализ наиболее актуальных научных исследований в этой области.

Модели и методы

Существует несколько важных концептуальных аспектов, положенных в основу определения и нормирования вероятности отказа, которые необходимо рассмотреть прежде, чем переходить к обзору значений, закрепленных в нормативных документах. На практике вместо значений вероятности отказа используют связанные с ними значения индекса надежности, поэтому далее по тексту будет также использоваться этот термин.

Одной из ключевых особенностей индекса надежности является то, что это мера проектной надежности. При этом проектная надежность зданий, как правило, превышает целевые значения из-за скрытых резервов в моделях несущей способности (например, пренебрежение вкладом продольной арматуры в сопротивление сдвигу) или моделях воздействий (например, консервативное упрощение зонирования на картах климатических воздействий), а также из-за требований конструирования и т.д. В свою очередь, «фактическая» надежность сооружения зависит от намного большего количества факторов.

Доминирующими из них являются человеческие ошибки, которые минимизируются процедурами контроля качества, а не проектными требованиями.

Значения индексов надежности существенно *зависят от предпосылок*, при которых они были получены. В целом индекс надежности связан с этими предпосылками и не может рассматриваться отдельно от них. Наиболее важные предпосылки касаются вероятностных моделей базисных переменных. Поэтому второй важной особенностью индекса надежности является то, что это мера *относительной* надежности, т.е. надежность сравнивается между базовым и рассматриваемым случаем, поэтому корректнее говорить о том, что одно конструктивное решение более надежно или менее надежно при одинаковых предпосылках.

Следующей особенностью индекса надежности является то, что он регламентируется для *конструктивного элемента*, а не для системы, хотя при его назначении могут использоваться параметры всего здания. Методы теории надежности и значения индексов надежности в первую очередь разработаны для конструктивного элемента. Однако большинство конструкций представляют собой систему конструктивных элементов. Очевидно, что отказ системы является более серьезным последствием, чем отказ одного конструктивного элемента. Поэтому в общем случае необходимо рассматривать отказ системы, а не отдельного конструктивного элемента. Системное поведение конструкций можно количественно оценить с помощью вероятностного анализа. Однако такой анализ надежности системы требует от инженера значительной изобретательности и специализированных навыков в области теории надежности, вероятности и статистики, поэтому его реализация затруднительна на практике. На основании вышеотмеченных рассуждений может оказаться уместным увеличение значения индекса надежности конструктивного элемента для конструкции с несколькими ключевыми элементами или для конструктивного элемента с несколькими одинаково важными видами отказов.

Следующей особенностью является то, что целевой уровень надежности *должен быть определен и назначен с учетом последствий отказа*. Последствия отказа – это один из самых важных и базовых показателей, которые должны учитываться при определении и назначении индекса надежности. Последствия отказа включают социальные (угроза здоровью и жизни людей), экологические, экономические последствия, потерю ценности культурного наследия и т.д. [10]. Последствия отказа должны анализироваться с учетом прямых и косвенных, в том числе с учетом единовременных и долговременных (последующих) последствий. Примером косвенных последствий могут быть лица, не получившие необходимых услуг в случае выхода из строя конструкций больницы, пожарного депо и т.д. К лицам (жизням), подвергающимся риску из-за разрушения конструкции, также относятся лица, которые могут находиться вне конструкции, но затронуты в случае разрушения конструкции. Следует также уделять внимание долгосрочным рискам, а не только тем, которые возникают непосредственно при разрушении конструкции. Более высокий уровень надежности следует назначать для сооружений с высоким уровнем заселенности (использования людьми), а также для сооружений, выполняющих важные функции для населения (больницы, пожарные депо, важные мосты, пути эвакуации в зданиях с высокой посещаемостью и т.д.). Традиционно последствия отказа рассматривают обобщенно для всего здания, однако конкретный конструктивный элемент может быть отнесен к более высокому или более низкому уровню надежности, чем присвоенный всей конструкции.

В большинстве нормативных документов последствия отказа учитываются косвенно посредством классов последствий, при этом используют качественные (лингвистические) характеристики для определения класса последствий, что вызывает субъективизм при назначении уровня надежности. В этой связи интерес представляют исследования по назначению классов последствий в зависимости от количественных характеристик. В работе [11] представлены рекомендации по назначению класса последствий для здания в зависимости

от количества людей N , подвергающихся риску: СС1 при $N < 10$, СС2 при $10 \leq N < 1000$ и СС3 при $N \geq 1000$ или для сооружений, используемых в важных отраслях промышленности, или обслуживающие сообщества с населением более 5000 человек. В работе [12] представлены рекомендации по дифференциации надежности конструктивных элементов в зависимости от отношения N_{col}/A_{col} (в чел./м²), где N_{col} – количество лиц, подвергающихся риску; A_{col} – площадь обрушения, относящаяся к сценарию обрушения элемента, в следующем виде:

- СС1 при $N_{col}/A_{col} \leq 0,01$ (типичными примерами являются здания и/или зоны в зданиях, в которых люди обычно не находятся, например, сельскохозяйственные объекты);
- СС2 при N_{col}/A_{col} в пределах $0,01 < N_{col}/A_{col} \leq 0,1$ (примеры – жилые и офисные помещения, исключая места скопления людей);
- СС3 при $N_{col}/A_{col} > 0,1$ (примеры – места скопления людей, включая вестибюли, залы ожидания, конференц-центры, актовые залы, спортивные и плавательные сооружения, трибуны, кинотеатры, театры, музеи, аудитории).

Когда область обрушения может быть связана с различными отношениями N_{col}/A_{col} , для установления класса последствий может быть принято консервативное значение или средневзвешенное значение. Отношение N_{col}/A_{col} может зависеть от характера рассматриваемого режима отказа. Хотя пластическое разрушение может дать людям предупреждение о своевременной эвакуации из здания, однако такой сценарий рекомендуется консервативно исключить при оценке количества людей, подвергающихся риску.

При выборе целевого уровня надежности также учитываются затраты и усилия, необходимые для снижения вероятности отказа [13].

Следующей особенностью индекса надежности является то, что целевые уровни *связаны с периодом отнесения*. Под периодом отнесения подразумевается период времени, принимаемый для статистического описания параметров базисных переменных, зависящих от времени. Очевидно, что целевая надежность всегда должна указываться вместе с периодом отнесения, учитываемым при проверке надежности [14]. Согласно ISO 2394 в качестве периода отнесения можно рассматривать срок службы для предельных состояний эксплуатационной пригодности и усталости, в то время как более короткий период отнесения может быть разумным для предельных состояний несущей способности.

Расчетный или остаточный срок службы и период отнесения (базовый период) для целевого значения индекса надежности можно выбрать независимо. Целевое значение индекса надежности и распределение экстремальных значений, используемые для представления изменяющихся во времени воздействий (доминирующего воздействия в комбинации нагрузок), должны быть основаны на одном и том же периоде отнесения. Когда проверка надежности выполняется для годового периода отнесения, то годовой целевой индекс надежности рассматривается вместе с сопротивлением и воздействием, рассчитанными для года. Целевая надежность, относящаяся к одному периоду отнесения, может быть пересчитана на другой период отнесения с использованием методологии, описанной в [15], с учетом зависимости между годовыми событиями отказа. Из-за значительного влияния постоянных воздействий и изменчивости сопротивления в среднем ежегодные случаи отказа имеют умеренную корреляцию [16, 17], что необходимо учитывать при пересчете индексов надежности для разных периодов отнесения.

В общем случае при определении последствий отказа, соответственно и индекса надежности, следует учитывать различие между пластичным и хрупким разрушением, возможностью прогрессирующего разрушения. Однако на сегодня, к сожалению, данные особенности не учитываются в нормах проектирования. Целевые показатели надежности рекомендуются для пластичных элементов конструкции, разрушение которых допускает перераспределение внутренних усилий и, таким образом, не приводит сразу к полному или частичному разрушению конструкции, что позволяет принять меры для снижения тяжелых последствий. Отказу пластичного компонента предшествует предупреждение, предварительные признаки, однако следует констатировать тот факт, что при реальной

эксплуатации конструкции такие признаки трудно идентифицируются обычными людьми (обывателями). Поэтому с помощью явных требований или соответствующей детализации следует гарантировать отсутствие хрупкого разрушения. Элемент конструкции, который может внезапно разрушиться без предупреждения, должен соответствовать более высокому уровню надежности, чем рекомендуемый для пластического разрушения.

Собственно, после того как зафиксированы основы, на которых базируются значения индексов надежности, далее перейдем к рассмотрению значений, регламентированных в нормативных документах.

Результаты исследования и их анализ

Одним из первых нормативных документов, на который стоит обратить внимание, является EN 1990, который используется всеми европейскими странами, рядом Скандинавских и некоторыми странами с постсоветского пространства, а именно Республикой Казахстан, Республикой Беларусь. Основная цель, которая преследовалась при нормировании индексов надежности в EN 1990, – это обеспечение единых значений индексов надежности для унификации и сопоставимости результатов на территории европейских стран. Однако регламентированные этим документом значения индекса надежности часто критикуют из-за их высоких значений. Подробный анализ последствий применения таких высоких значений индексов надежности представлен в исследовании [18]. Помимо явных последствий экономической нецелесообразности применения таких больших значений индекса надежности (значения частных коэффициентов для переменных воздействий достигают 2.0...2.5 [19], что не согласуется с многолетней практикой проектирования по всему миру), есть и серьезные методологические противоречия: *«результаты расчетов показывают, что вероятность превышения расчетных значений составила в среднем 10^{-5} . Данная вероятность возможна только при нормировании редких природных и климатических явлений (например, сейсмических) или чрезвычайного (особого) значения воздействия. Прогнозирование возможных значений случайных величин для таких малых вероятностей становится сомнительным: длина экстраполяции аппроксимирующей функции противоречит математическим принципам; существенная изменчивость конечного результата от принятых предпосылок; нестабильность получаемых результатов»* [18]. По этой причине в последних редакциях СН 2.01.01 требования к оценке целевых значений дополнены формулировкой: *«при определении частных коэффициентов рекомендуется выполнять анализ надежности с учетом существующей практики проектирования и требований действующих ТНПА»*, для более подробной информации см. [20, 21, 22]

Следующий документ, заслуживающий внимания, это ISO 2394, который содержит более подробные рекомендации по назначению уровней надежности по сравнению с EN 1990. Согласно ISO 2394 целевые показатели надежности связаны с последствиями отказа и относительными затратами на меры безопасности и основаны на критериях экономической оптимизации и индекса качества жизни [23, 24]. В соответствии с ISO 2394:1998, если возможный отказ конструкции не связан с человеческими жертвами, целевой уровень надежности может быть определен исключительно на основе экономической оптимизации. В противном случае для определения целевого уровня надежности необходимо применять подходы, основанные на анализе индивидуального или общественного риска, или индекса качества жизни. Далее более подробно рассмотрим каждый из подходов определения целевого значения индекса надежности.

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе экономической оптимизации* представляет собой минимизацию ожидаемых общих затрат с учетом последствий отказа и мер безопасности в течение всего срока службы или иного рассматриваемого периода времени. Ожидаемые общие затраты можно рассматривать как

сумму ожидаемых затрат на возведение, техническое обслуживание, модернизацию, меры безопасности и затрат, связанных с отказом конструкции [25, 26, 27]. Как правило, затраты состоят из части, не зависящей от параметра принятия решения (затраты, связанные с обследованиями, восстановлением, администрированием, экономические потери из-за прерывания работы и т.д.) и части, зависящей от параметра принятия решения. Оценка стоимости отказа является очень важным, но, вероятно, самым сложным шагом в оптимизации затрат. Следует учитывать не только прямые последствия отказа (возникающие в результате отказов отдельных компонентов), но и последующие последствия (связанные с неисправностью всей конструкции, ограничением функциональности сооружения).

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе рисков для безопасности человека* направлена на обеспечение приемлемых уровней риска для обитателей или пользователей сооружения по сравнению с другими видами повседневной деятельности. Годовая вероятность отказа не может превышать требований, основанных на критериях индивидуальной безопасности человека или группового риска. Маловероятно, что общественность согласится с более высокими показателями отказов чем те, которые связаны с максимально допустимыми значениями индивидуального или общественного риска, даже, если они основаны на рациональных критериях, например таких, как принцип минимальных затрат на спасение жизни [28].

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе индивидуальных рисков* направлена на то, чтобы вероятность стать жертвой разрушения конструкции была меньше, чем вероятность смерти в результате несчастного случая. Вероятность смерти в результате несчастного случая в повседневной жизни в развитых странах составляет около 10^{-4} в год, поэтому ISO 2394:1998 предлагает назначать вероятность стать жертвой разрушения конструкции равной 10^{-6} . В исследовании [29] проанализировали риски для людей, связанные с текущей практикой в области строительных конструкций, и получили значения 10^{-6} и 10^{-5} в год соответственно для среднего и высокого класса ответственности конструкций. Однако современная практика дает ограниченные представления о приемлемых индивидуальных рисках, поскольку повседневное проектирование приводит к более высоким целевым уровням, чем необходимо для обеспечения безопасности человека [30]. Основываясь на концепции индивидуального риска, целевая вероятность отказа $P_{f,IR}$ определяется, исходя из условной вероятности несчастного случая при реализации отказа конструкции P_{clf} , посредством следующего выражения:

$$P_{f,IR} \leq 10^{-5} / P_{clf}, \quad (1)$$

Оценка базы данных об отказах конструкций, проведенная в исследовании [31], позволяет определить вероятность по крайней мере одного несчастного случая в случае отказа конструкции. Значение P_{clf} , равное 0.005, получено для жилых зданий, 0.01 – для коммерческих зданий, 0.03 – для промышленных объектов, 0.055 – для мостов. В исследовании [32] оценивают условные вероятности P_{clf} для высокого, среднего и низкого классов последствий, равными 0.3, 0.03 и 0.001 соответственно. При разрушении конструкции вероятность несчастного случая для отдельного человека (риск которого оценивается) может быть ниже, чем вероятность по крайней мере одного несчастного случая для любого пользователя, поскольку время пребывания человека в зоне обрушения конструкции может быть коротким. В случае зданий этот эффект пренебрежимо мал, но в случае мостов или инфраструктуры этот эффект играет доминирующую роль, и критерий индивидуального риска становится менее значительным.

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе группового риска* направлена на ограничение отказов, сопровождаемых большим количеством погибших. Взаимосвязь между вероятностью наступления события и смертельными исходами хорошо описывается зависимостью следующего вида (ISO 2394:1998) [33]:

$$F(n) \leq A \cdot n^{-\alpha}, \quad (2)$$

где A и α – константы.

Значение α большее 1 используется для социально неодобряемых событий, т.е. сопровождающихся серьезными последствиями, в частности выраженными в числе смертельных исходов. В большинстве случаев приемлемые значения α находятся в диапазоне от 1 до 2, при этом наиболее часто применяемое значение $\alpha = 2$ [34]. Константа A представляет собой частоту возникновения события с $N \geq 1$ смертельным исходом. Чтобы избежать принятия иррациональных решений, определенный критерий приемлемости F - n также должен контролировать ожидаемое количество смертельных случаев $E(N)$ в течение рассматриваемого контрольного периода, что соответствует площади под линией приемлемости F - n [35]. В исследовании [29] на основе анализа текущей практики в области проектирования зданий приведены следующие значения константы A :

для “малонаселенных” зданий: $A = 2,6 \cdot 10^{-6}$;

для “густонаселенных” зданий: $A = 5,6 \cdot 10^{-6}$.

Рекомендации для оценки ожидаемого числа погибших в конкретном сценарии обрушения можно найти в исследовании [12]. В работе [29] представлены эмпирические зависимости для числа жертв n и площади обрушения A_{col} вследствие отказа элемента конструкции:

для “малонаселенных” зданий: $n = 0.27 \cdot A_{col}^{0.5} - 1 \geq 0$;

для “густонаселенных” зданий: $n = 0.59 \cdot A_{col}^{0.56} - 1 \geq 0$.

Соответствующая частота возникновения событий с $N \geq 1$ смертельными исходами может быть преобразована в целевые вероятности отказа ($P_{ft,SR}$) с использованием уравнения [29]:

$$P_{ft,SR} \approx A \cdot n^{-\alpha} / P_{N|f}, \quad (3)$$

где $P_{N|f}$ описывает условную вероятность $N = n$ смертельных исходов в случае отказа. Консервативно принимают $P_{N|f}$ равным P_{clf} [29].

Оценка целевых значений показателей надежности на основе индекса качества жизни, который учитывает затраты на меры безопасности по спасению жизни и прогнозируемое число погибших в случае разрушения конструкции. По сравнению с экономической оптимизацией этот подход приводит к меньшим значениям целевых показателей надежности, поскольку учитываются только человеческие последствия разрушения конструкции и не учитываются другие потери (экономические, экологические и т.д.) [10]. Результаты исследования [29] подтверждают, что применение подхода индекса качества жизни может привести к более высоким уровням риска по сравнению с текущей практикой проектирования в соответствии с Еврокодами. В исследовании [30] продемонстрировали, что минимальные уровни безопасности для человека в ISO 2394:1998 и подход индекса качества жизни в ISO 2394:2015 дают сопоставимые показатели надежности.

Стандарт ISO 2394 помимо описания самих методик оценки целевых значений показателей надежности содержит рекомендуемые значения. Для среднего класса последствий рекомендуется применять следующие значения индекса надежности:

- на основании экономической оптимизации: $\beta_1 = 4.2$ для периода отнесения один год при средних относительных затратах на меры безопасности и при средних экономических потерях (большинство жилых зданий). В пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 3.2$. Значения β корректируются с учетом уровня развития страны. Целевые показатели надежности β приведены в ISO 2394, являются ориентировочными только для развитых стран. Для стран, находящихся на стадии развития, более низкие значения β могут быть оправданы с учетом соответствующих социально-экономических параметров;
- на основании индекса качества жизни: $\beta_1 = 3.7$ для периода отнесения один год при средних относительных затратах на спасение жизни, в пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 2.55$.

Еще одним документом, на который стоит обратить внимание, является ASCE 7. Согласно ASCE 7 здания и сооружения классифицируют по четырем категориям риска в зависимости от количества людей, подверженных риску. Категория I связана с небольшим количеством лиц, подверженных риску, а категория IV - с десятками тысяч. Для III категории рекомендовано значение равное 3.75 для годового периода отнесения [36]. В пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 2.6$.

Результаты анализа численных значений индексов надежности для среднего класса последствий отказа сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения индексов надежности по разным нормативным документам.

Стандарт	$\beta(1 \text{ y.})$	$\beta(50 \text{ y.})$
EN 1990, 2002	4.7	3.8
ISO 2394 : 1998	4.1	3.1
ISO 2394 : 2015, на основе экономической оптимизации для развитых стран	4.2	3.2
ISO 2394 : 2015, на основе экономической оптимизации для развивающихся стран	3.3	2.3
ISO 2394 : 2015, на основе безопасности людей	3.7	2.55
ASCE 7-22	3.75	2.6

Как видно из представленного анализа, значения индексов надежности существенно отличаются в разных нормативных документах как с позиции численных значений, так и с позиции методик их назначения.

Выводы

Наиболее полная методика определения целевых значений вероятности отказа изложена в международном стандарте ISO 2394. Данный стандарт содержит указания по определению целевых индексов надежности на основе экономической оптимизации, анализа индивидуального или общественного риска, а также индекса качества жизни. Анализ нормируемых значений вероятностей отказа (индексов надежности), регламентированных в международных нормативных документах EN1990, ISO 2394-1998, ISO 2394-2015, ASCE 7-22, показал, что, исходя из безопасности людей, индекс надежности рекомендуется принимать не менее 3.7 для периода отнесения 1 год. При этом, исходя из экономической оптимизации (целевые показатели надежности представлены как функция затрат на меры по снижению риска и последствий в случае отказа), индекс надежности рекомендуется принимать не менее 4.2 для периода отнесения 1 год. Т.е. требования по более высокому индексу надежности обусловлены экономическими соображениями. Однако следует обратить внимание, что значения индекса надежности, исходя из экономической оптимизации, получены для развитых стран. Если страна относится к развивающийся, то рекомендуемое значение – 3.3 для периода отнесения 1 год. Поэтому в общем случае необходимо определять значения индекса надежности с учетом экономических особенностей конкретной страны.

Следует отметить, что принято считать, что существующая практика проектирования гарантирует безопасность строительных конструкций, и в существующих реалиях сообщество в неявном виде принимает эти уровни надежности. Данная ситуация позволяет также определить целевые индексы надежности на основании анализа предыдущей практики проектирования. Однако следует понимать, что данный подход является дополнительным, так как полученные таким образом значения индексов надежности будут не оптимальными для всех видов конструкции и условий применения.

В рассмотренных нормативных документах значения индексов надежности регламентированы для «нестареющих» конструктивных элементов, соответственно в тех случаях, когда деградация (возможно, контролируемая осмотрами и ремонтами) рассматривается как причина отказа, представляется разумным нормировать годовой целевой

индекс для самого неблагоприятного года, поскольку надежность конструкции в другие годы будет превышать этот целевой показатель. При этом значение индекса необходимо понизить, чтобы не быть чрезмерно консервативным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митасов В.М., Адищев В.В., Стаценко Н.В. Концепция предельных состояний и их проверка по российским нормам и Еврокодам // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. №8. С. 15-23.
2. Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Использование вероятностных методов оценки надежности технических объектов на примере технологических и автомобильных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 4(67). С. 3-10.
3. Герасимов Е.П. Использование вероятностных методов для вычисления нормативной надежности по трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 1(44). С. 55-60.
4. Мкртычев О.В., Юрьев Р.В. Оценка надежности консольной плиты при действии повторяющихся землетрясений // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 147-151.
5. Тамразян А.Г., Филимонова Е. А. Критерии формирования комплексной целевой функции железобетонной плиты с учетом анализа риска // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 68-74.
6. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций / Мкртычев О.В., Райзер В. Д. - Москва : Издательство АСВ, 2016. - 908 с.
7. Райзер В.Д. Очерк развития теории надежности и норм проектирования строительных конструкций // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. 2014. №2. С. 29-35.
8. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон – проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №8. С. 30-33.
9. Уткин В.С., Соловьев С.А., Ярыгина О.В. Расчет несущих элементов конструкций по заданному значению надежности при неполной статистической информации // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 81-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91.
10. Diamantidis D., Holický M., Sýkora M. Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures // Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava Civil Engineering Series. 2016. Vol. 16. P. 1-10. DOI: 10.1515/tvsb-2016-0008.
11. Diamantidis D., Sykora M. Reliability differentiation and uniform risk in standards: a critical review and a practical appraisal // Future Trends in Civil Engineering. 2019. P.242-260. DOI: 10.5592/CO/FTCE.2019.11.
12. Hingorani R., Tanner P., Prieto M., Lara C. Consequence classes and associated models for predicting loss of life in collapse of building structures. Structural Safety. 2020. Vol. 85. DOI: 10.1016/j.strusafe.2019.101910
13. Vrouwenvelder A. C. W. M. Target reliability as a function of the design working life // Structural engineering international. 2010. P. 62-65.
14. Тур В. В., Тур А.В., Дереченник С.С. О назначении требуемых мер надежности при разработке национальных нормативных документов по проектированию строительных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 2–15. Doi: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15.
15. Holický M., Diamantidis D., Sykora M. Reliability levels related to different reference periods and consequence classes. Beton- und Stahlbetonbau. 2018. Vol. 113. P. 22-26. <https://doi.org/10.1002/best.201800039>
16. Baravalle M., Köhler J. A risk-based approach for calibration of design codes // Structural Safety. 2019. Vol. 78. P. 63-75.
17. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design - A discussion on current and future reliability levels. Heron. 2018. Vol. 63(3). P. 243-301.
18. Тур В. В., Надольский В. В. Целевые значения показателей проектной надежности в рамках концепции надежности, принятой в европейских нормах (Еврокодах) // Проблемы современного бетона и железобетона. 2015. Вып. 7. С. 178 – 192.
19. Надольский В.В., Тур В.В. Калибровка (определение) частного коэффициента для снеговой нагрузки при расчетах стальных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2013. № 1(79). С. 169–172.
20. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // Вестник Полоцкого государственного университета. 2014. № 8. С. 27–34.
21. Надольский В.В., Голицки М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20.

22. Nadolski V.V., Holický M., Sýkora M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 7–21.
23. Ditlevsen O., Friis-Hansen P. Life Quality Index an empirical or a normative concept? // International Journal of Risk Assessment and Management. 2007. Vol. 7. P. 895 - 921. DOI: 10.1504/IJRAM.2007.014666.
24. Pandey M.D., Nathwani J. Life Quality Index for the Estimation of Societal Willingness-to-Pay for Safety. Structural Safety. 2004. Vol. 26. 181-199. DOI: 10.1016/j.strusafe.2003.05.001.
25. Holický M. Optimisation of the target reliability for temporary structures // Civil Engineering and Environmental Systems. 2013. Vol. 30(2). P. 87-96.
26. Allen D.E. Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings. Canadian Journal of Civil Engineering. 1991. Vol. 18(6). P. 995-1004.
27. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M. Economic and human safety reliability levels for existing structures // Structural Concrete. 2015. Vol. 16(3). P. 323-332.
28. Fischer K., Virguez E., Sánchez-Silva M., Faber M.H. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria. Structural Safety. 2013. Vol. 44. P. 37–46. doi: 10.1016/j.strusafe.2013.05.00.
29. Tanner P., Hingorani R. Acceptable risks to persons associated with building structures. Structural Concrete. 2015. Vol. 16(3). Pp. 314-22.
30. Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target Reliability for Existing Structures Considering Economic and Societal Aspects // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. P. 181-194.
31. Eldukair Z.A., Ayyub B.M. Analysis of recent U.S. structural and construction failures // Journal of Performance of Constructed Facilities. 1991. Vol. 5. P. 57-73.
32. Steenbergen R.D.J.M., Vrouwenvelder A.C.W.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. Heron. 2010. Vol. 55(2). P. 123 – 139.
33. Vrijling J.K., van Gelder P.H.A.J.M., Ouwenkerk S.J. Criteria for acceptable risk in the Netherlands. // Infrastructure Risk Management Processes. 2005. P. 143-157. DOI: 10.1061/9780784408155.ch05.
34. Vrouwenvelder T., Scholten N. Assessment criteria for existing structures // Structural Engineering International. 2010. Vol. 20. P. 62-65.
35. Aven T., Heide B. Reliability and validity of risk analysis. Reliability Engineering & System Safety, 2009. Vol. 94(11). P. 1862-1868. DOI: 10.1016/j.res.2009.06.003
36. Cornell C., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines. Journal of Structural Engineering ASCE. 2002. Vol. 128(4). p. 526–533.

REFERENCES

1. Mitasov V.M., Adishchev V.V., Stacenko N.V. Konceptiya predel'nyh sostoyanij i ih prover-ka po rossijskim normam i Evrokodam [The concept of limit states and their verification according to Russian norms and Eurocodes] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2017. Vol.8. P. 15-23. (rus)
2. Harchenko A.O., Harchenko A.A., Vladeckaya E.A. Ispol'zovanie veroyatnostnyh metodov ocenki nadezhnosti tekhnicheskikh ob'ektov na primere tekhnologicheskikh i avtomobil'nyh sistem [The use of probabilistic methods for assessing the reliability of technical objects on the example of technological and automotive systems] *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2019. Vol. 4(67). P. 3-10. (rus)
3. Gerasimov E.P. Ispol'zovanie veroyatnostnyh metodov dlya vychisleniya normativnoj nadezhnosti po treshchinostjokosti zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov [The use of probabilistic methods for calculating the normative reliability of crack resistance of reinforced concrete bendable elements] *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018. Vol. 1(44). P. 55-60. (rus)
4. Mkrtychev O.V., YUr'ev R.V. Ocenka nadezhnosti konsol'noj plity pri dejstvii povtoryayu-shchihsya zemletryasenij [Assessment of the reliability of a cantilever plate under the action of repeated earthquakes] *Vestnik MGSU*. 2010. Vol. 3. P. 147-151. (rus)
5. Tamrazyan A.G., Filimonova E. A. Kriterii formirovaniya kompleksnoj celevoj funkicii zhelezobetonnoj plity s uchetom analiza riska [Criteria for the formation of a complex target function of a reinforced concrete slab taking into account risk analysis] *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 10. P. 68-74. (rus)
6. Mkrtychev O.V., Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti v proektirovanii stroitel'nyh konstrukcij [Theory of reliability in the design of building structures] / Mkrtychev O.V., Rajzer V. D. - Moskva : Izdatel'stvo ASV, 2016. 908 p. (rus)
7. Rajzer V.D. Ocherk razvitiya teorii nadezhnosti i norm proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij [An essay on the development of the theory of reliability and standards of design of construction structures] *Sejsmostojkoe stroitel'stvo i bezopasnost' sooruzhenij*. 2014. No2. P. 29-35. (rus)
8. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton – problemy i perspektivy [Concrete and reinforced concrete – problems and prospects] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. Vol.8. P. 30-33. (rus)

9. Utkin V.S., Solov'ev S.A., Yarygina O.V. Raschet nesushchih elementov konstrukcij po zadannomu znacheniyu nadezhnosti pri nepolnoj statisticheskoj informacii [Calculation of load-bearing structural elements according to a given reliability value with incomplete statistical information] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2020. Vol. 1(87). P. 81-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91. (rus)
10. Diamantidis D., Holický M., Sýkora M. Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava Civil Engineering Series*. 2016. Vol. 16. P. 1-10. DOI: 10.1515/tvsb-2016-0008.
11. Diamantidis D., Sykora M. Reliability differentiation and uniform risk in standards: a critical review and a practical appraisal. *Future Trends in Civil Engineering*. 2019. P.242-260. DOI: 10.5592/CO/FTCE.2019.11.
12. Hingorani R., Tanner P., Prieto M., Lara C. Consequence classes and associated models for predicting loss of life in collapse of building structures. *Structural Safety*. 2020. 85. DOI: 10.1016/j.strusafe.2019.101910
13. Vrouwenvelder A. C. W. M. Target reliability as a function of the design working life . *Structural engineering international*. 2010. P. 62-65.
14. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. O naznachenii trebuemyh mer nadezhnosti pri razrabotke nacional'nyh normativnyh dokumentov po proektirovaniyu stroitel'nyh konstrukcij [On the appointment of required reliability measures in the development of national regulatory documents on the design of building structures]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. Vol. 1. P. 2–15. Doi: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15. (rus)
15. Holický M., Diamantidis D., Sykora M. Reliability levels related to different reference periods and consequence classes. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2018. Vol. 113. P. 22-26. DOI: 10.1002/best.201800039
16. Baravalle M., Köhler J. A risk-based approach for calibration of design codes. *Structural Safety*. 2019. Vol. 78. p. 63-75.
17. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design - A discussion on current and future reliability levels. *Heron*. 2018. Vol. 63. No. 3. pp. 243-301.
18. Tur V. V., Nadol'skij V. V. Celevye znacheniya pokazatelej proektnoj nadezhnosti v ramkah koncepcii nadezhnosti, prinyatoj v evropejskikh normah (Evrokodah) [Target values of design reliability indicators within the framework of the reliability concept adopted in European standards (Eurocodes)] . *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona*. 2015. Vyp. 7. P. 178 – 192. (rus)
19. Nadol'skij V.V., Tur V.V. Kalibrovka (opredelenie) chastnogo koefficienta dlya snegovoj nagruzki pri raschetah stal'nyh konstrukcij [Calibration (determination) of the partial coefficient for snow load in calculations of steel structures] *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. Vol. 1(79). P. 169–172. (rus)
20. Nadol'skij V.V., Martynov YU.S. Ocenka trebuemogo (celevogo) urovnya nadezhnosti na os-novanii predydushchego opyta normirovaniya [Assessment of the required (target) level of reliability based on previous rationing experience] . *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. Vol. 8. P. 27–34. (rus)
21. Nadol'skij V.V., Golicki M., Sikora M., Tur V.V. Sopostavlenie urovnej nadezhnosti, obespechivaemyh normami Rossijskoj Federacii i Evrosoyuzha [Comparison of reliability levels provided by the norms of the Russian Federation and the European Union] . *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 6. P. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. (rus)
22. Nadolski V.V., Holický M., Sýkora M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus . *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 2. C. 7–21.
23. Ditlevsen O., Friis-Hansen P. Life Quality Index an empirical or a normative concept? *International Journal of Risk Assessment and Management*. 2007. Vol. 7. P. 895 - 921. DOI: 10.1504/IJRAM.2007.014666.
24. Pandey M.D., Nathwani J. Life Quality Index for the Estimation of Societal Willingness-to-Pay for Safety. *Structural Safety*. 2004. Vol. 26. 181-199. DOI: 10.1016/j.strusafe.2003.05.001.
25. Holický M. Optimisation of the target reliability for temporary structures . *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2013. Vol. 30. No. 2. P. 87-96.
26. Allen D.E. Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1991. Vol. 18. No. 6, P. 995-1004.
27. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M. Economic and human safety reliability levels for existing structures . *Structural Concrete*. 2015. Vol. 16. No. 3. P. 323-332.
28. Fischer K., Virguez E., Sánchez-Silva M., Faber M.H. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria. *Structural Safety*. 2013. Vol. 44. P. 37–46. doi: 10.1016/j.strusafe.2013.05.00.
29. Tanner P., Hingorani R. Acceptable risks to persons associated with building structures. *Structural Concrete*. 2015. Vol. 16(3). Pp. 314-22.
30. Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target Reliability for Existing Structures Considering Economic and Societal Aspects . *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017. Vol. 13. No. 1. P. 181-194.
31. Eldukair Z.A., Ayyub B.M. Analysis of recent U.S. structural and construction failures . *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1991. Vol. 5. No. 1. P. 57-73.

32. Steenbergen R.D.J.M., Vrouwenvelder A.C.W.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. *Heron*. 2010. Vol. 55(2). P. 123 – 139.
33. Vrijling J.K., van Gelder P.H.A.J.M., Ouwenkerk S.J. Criteria for acceptable risk in the Netherlands. *Infrastructure Risk Management Processes*. 2005. pp. 143-157. DOI: 10.1061/9780784408155.ch05.
34. Vrouwenvelder T., Scholten N. Assessment criteria for existing structures . *Structural Engineering International*. 2010. Vol. 20. No. 1, pp. 62-65.
35. Aven T., Heide B. Reliability and validity of risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94(11). P. 1862-1868. DOI: 10.1016/j.ress.2009.06.003
36. Cornell C., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 2002. Vol. 128(4). p. 526–533.

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства» и доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: nadolskivv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus, candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions, and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus
E-mail: nadolskivv@mail.ru