УДК 69.07.004.6 DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43

Вероятностный подход к оценке риска прогрессирующего обрушения

Иван Иванович ВЕДЯКОВ, доктор технических наук, профессор, директор, e-mail: vedyakov@tsniisk.ru

Дмитрий Валерьевич СОЛОВЬЕВ, кандидат технических наук, e-mail: dvsolov@yandex.ru

Алексей Игоревич КОВАЛЕНКО, инженер

ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ Строительство», 109498 Москва, 2-я Институтская, 6

Аннотация. *Необходимость учета возникновения аварийных ситуаций в опорных конструкциях строительных объектов при неустановленных особых воздействиях обусловлена требованиями федерального закона по механической безопасности строительных объектов. Существующий нормативный подход зачастую препятствует решению задач по модернизации и реконструкции производств, реализации современных уникальных архитектурных концепций и не позволяет учитывать вклад превентивных проектных мероприятий в надежность конструкции. Для формирования системы нормативных документов следует разработать методику оценки риска отказа строительных конструкций, в том числе при особых воздействиях. В статье рассмотрена балльная система определения риска отказа конструкции, учитывающая особенности различных конструктивных схем зданий, возможность возникновения ряда негативных событий. Предложено вероятность и последствия негативного события оценивать комплексно как расчетным методом, так и экспертной оценкой в баллах для принятия наиболее правильного и приближенного к реальности инженерного подхода к оценке риска. Кроме того, проведена параллель между существующими подходами в теории вероятностей, позволяющая в перспективе подготовить математическое обоснование применяемой балльной системы.*

Ключевые слова: *прогрессирующее обрушение, оценка риска, расчет строительных конструкций, здания и сооружения повышенного уровня ответственности, теория вероятностей, вероятностные методы расчета конструкций.*

A PROBABILISTIC APPROACH TO EVALUATING THE RISK OF PROGRESSIVE COLLAPSE

Ivan I. VEDYAKOV, e-mail: vedyakov@tsniisk.ru

Dmitriy V. SOLOV'EV, e-mail: dvsolov@yandex.ru

Aleksey I. KOVALENKO

Reserch Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V. A. Koucherenko, Research Center of Construction, 2-ya Institutskaya ul., 6, Moscow 109428, Russian Federation

Abstract. *The need to take into account the occurrence of emergency situations in the supporting structures of construction objects at unidentified special impacts is due to the requirements of the federal law on mechanical safety of construction objects. The existing regulatory approach often hinders the solution of the tasks of modernization and reconstruction of production facilities, the implementation of modern unique architectural concepts and does not make it possible to take into account the contribution of preventive design measures to the reliability of the structure. To form a system of regulatory documents, it is necessary to develop a methodology for assessing the risk of failure of building structures, including under special impacts. The article considers a point system for determining the risk of structural failure, taking into account the features of various structural schemes of buildings, the possibility of a number of negative events. It is proposed to assess the probability and consequences of a negative event comprehensively both by calculation method and by expert assessment in points in order to adopt the most correct and realistic engineering approach to risk assessment. In addition, a parallel is drawn between the existing approaches in probability theory, which in the future make it possible to prepare a mathematical justification of the applied point system.*

Key words: *progressive collapse, risk assessment, calculation of building structures, buildings and structures of increased level of responsibility, probability theory, probabilistic methods for calculating structures.*

Современные подходы по обеспечению требований закона № 384-ФЗ по механической безопасности строительных объектов определяют необходимость учета возникновения аварийных ситуаций в опорных конструкциях строительных объектов при неустановленных особых воздействиях. Для подтверждения несущей способности конструкций проводят расчет на сопротивление прогрессирующему обрушению, что реализуется исключением из расчетной схемы колонн и других опорных элементов. Существующий нормативный подход зачастую препятствует решению задач по модернизации и реконструкции производств, реализации современных уникальных архитектурных концепций и не позволяет учитывать вклад превентивных проектных мероприятий и проектных решений в надежность конструкции. В этой связи оценка риска отказа

© ВЕДЯКОВ И. И., СОЛОВЬЕВ Д. В., КОВАЛЕНКО А. И., 2021

строительных конструкций, с учетом проектных мероприятий по повышению надежности, становится особо актуальной.

Одно из направлений совершенствования методов расчета строительных конструкций — развитие вероятностных подходов к определению несущей способности. Для решения данной задачи необходимо обратиться к логико-вероятностному подходу оценки рисков возникновения прогрессирующего обрушения, а также адаптировать существующие подходы (методы размытых множеств, приемы нечеткой логики и методы принятия решений в условиях неопределенности) к строительным конструкциям в контексте сценариев прогрессирующего обрушения.

В свободном доступе можно ознакомиться с учебными пособиями по этой тематике, в том числе по основам расчета надежности технических систем и их элементов. В работах [1—3] рассмотрены вероятностные модели нагрузок и методы вычисления вероятности отказа применительно к строительному проектированию. Также следует обратить внимание на методы, используемые в машино- и приборостроении по расчету, определению и увеличению надежности, а также адаптировать их к строительной индустрии [4]. Иными словами, за последние годы отечественная наука продвинулась в совершенствовании и систематизации знаний в этой области, в строительных вузах уже несколько десятилетий изучают подходы к оценке надежности конструктивных систем.

Возникновение интереса к вопросу применения теории вероятностей и статистики для определения характеристик безопасности конструкций относится к 1920-м гг., работы М. Майера являются одними из первых в этой области. Значительный вклад в развитие вероятностных подходов к определению характеристик материалов, нагрузок и непосредственно к расчету конструкций внесли отечественные ученые Н. С. Стрелецкий, А. Р. Ржаницын, В. В. Болотин, Н. Н. Складнев, В. Д. Райзер и др. [5—7].

При этом методология расчета строительных конструкций на надежность с применением теории вероятностей в настоящее время еще недостаточно развита. Данному вопросу уделяется немного внимания на уровне нормотворчества в связи с устоявшимся мнением о сложности таких инженерных подходов. Вместе с тем наиболее прогрессивное направление, используемое в различных областях техники в отечественной и зарубежной практике для технически сложных систем, — методы менеджмента и оценки риска.

Основы данного метода заложены еще в практике совершенствования отечественных строительных норм по оценке рисков и защищенности объектов повышенного уровня ответственности от тяжелых аварий и катастроф [8].

В законе № ФЗ-184 «О техническом регулировании», ГОСТ 27751—2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» была заложена основа для возможности оценки риска отказа конструкций в процессе проектирования, однако отсутствует нормативная методика оценки такого риска. Отметим, что Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах утверждена приказом МЧС России в 2009 г. и используется, особенно при возведении уникальных, особо опасных и технически сложных объектов. В этом документе расчетные величины пожарного риска являются количественной мерой возможности реализации пожарной опасности объекта и ее последствий для людей.

В отечественной нормативной базе согласно ГОСТ «Надежность в технике», в частности ГОСТ 27.301—95 «Надежность в технике (ССНТ). Расчет надежности. Основные положения», ГОСТ 27.310—95 «Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» и др., установлены общие правила расчета надежности технических объектов, требования к методикам, порядок представления результатов и принципиальные подходы к анализу видов, последствий и критичности отказов технических объектов. По форме и подходам очень близок к оценке рисков строительных конструкций СП 366.1325800.2017 «Промысловые трубопроводы. Оценка технических решений на основе анализа риска».

Отечественный ГОСТ «Надежность в технике» в основной массе учитывает подходы к этой проблематике, заложенные в американских нормативных документах. В европейских нормах (Eurocode 1 EN 1991-1-7:2006 [9]) определены нормативные требования к оценке риска отказа строительной конструкции при особых воздействиях.

Таким образом, при разработке новых проектов и проектов реконструкции зданий и сооружений, в частности повышенного уровня ответственности, оценка риска может рассматриваться как подтверждение достаточности инженерных решений, использованных в проекте с целью защиты от прогрессирующего обрушения. Аналогичное применение оценки риска отказа конструкций имеется и в отечественной, и в зарубежной практике проектирования. С целью формирования законченной системы нормативных документов по этому вопросу следует разработать

и внедрить нормативную методику оценки риска отказа строительных конструкций, в том числе при особых воздействиях.

Обычно под риском понимается количественная характеристика опасности, безразмерная величина, определяемая частотой реализации опасностей: отношение числа случаев проявления опасности к возможному числу случаев проявления опасности в заданный период времени. Иногда это понятие определяют как средневероятные потери от отказа.

В общем случае риск возникновения аварии определяется выражением

$$R = PU,$$

где P — вероятность возникновения аварии (отказа конструкции); U — ущерб от аварии.

Причем вероятность возникновения аварии необходимо рассматривать как сумму двух вероятностей $P = P_т + P_д$, теоретической и дополнительной. Данный подход хорошо иллюстрируется графиком *(см. рисунок).*

К моменту окончания строительства и введения объекта в эксплуатацию, из-за ошибок людей фактическая вероятность аварии P по сравнению с теоретической (проектной) величиной $P_т$ возрастает в несколько раз. Человеческие ошибки размывают закон распределения сопротивления объекта внешним воздействиям [2].

Применительно к прогрессирующему обрушению вероятность такого события связывают с вероятностью отказа основных несущих элементов конструкций или ключевых элементов (в терминологии СП 296.1325800) при особых воздействиях.

Определение величины риска основывается на количественных и качественных методах оценки [10—12].

Одна из основных задач при анализе риска прогрессирующего обрушения — идентификация угроз. Приведем основные негативные события, влияющие на вероятность нарушения целостности конструкции:

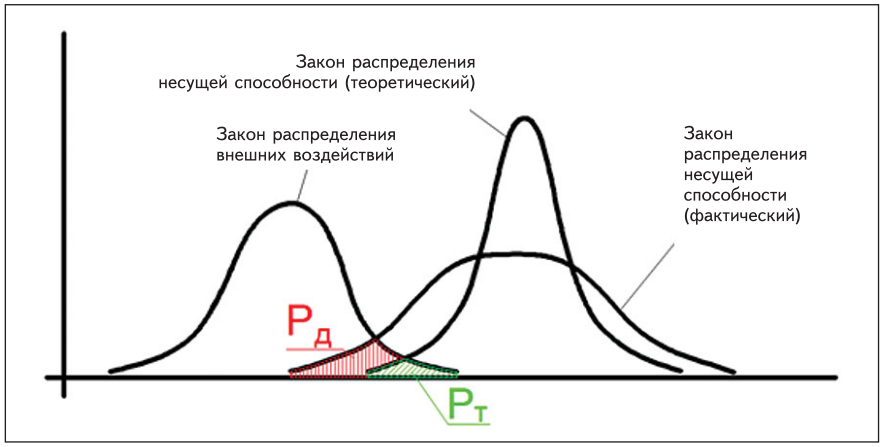

График вероятности возникновения аварии

- ошибки проектирования;
- брак при выполнении строительно-монтажных работ;
- эксплуатация конструкций, не соответствующая проектным решениям;
- экстремальные значения климатических воздействий;
- деградация свойств материалов конструкций вследствие механических воздействий, старения, пониженной температуры, химических процессов;
- коррозионные повреждения и износ;
- изменения грунтовых условий, карстовые процессы и иные влияния окружающей среды, не предусмотренные проектом;
- особые воздействия, такие как пожар, взрыв, наводнение, удар;
- сейсмические воздействия;
- негативное воздействие третьих лиц, в том числе террористические акты;
- неисправность автоматических систем, обеспечивающих мониторинг и своевременное обнаружение неисправностей;
- неустановленные особые воздействия.

На основании этих негативных событий можно выявить более детально вероятные угрозы, способные привести к отказу отдельных элементов и строительной конструкции в целом. Для дифференциации угроз, последствий негативных воздействий и определения типовых сценариев угроз следует различать конструкции по материалу, конструктивной схеме, функциональному назначению.

Из практики строительства известно, что далеко не все дефекты конструкций приводят к их разрушению. В большинстве случаев аварии зданий и сооружений происходят в результате проявления как минимум двух независимых негативных событий: внешнего экстремального воздействия и совокупности человеческих ошибок. Таким образом, снижение вероятности аварии должно сопровождаться мероприятиями по снижению вероятности проявления указанных событий.

Существуют различные превентивные меры по увеличению надежности строительных конструкций зданий и сооружений, в том числе требования ГОСТ 27751, СП 296.1325800 и др., особенно предъявляемые к зданиям повышенного уровня ответственности. При этом количественная оценка повышения уровня безопасности и ресурса зданий, с учетом указанных мероприятий, к сожалению, до настоящего времени не проводилась.

Для такой оценки может быть принят подход [13] к расчету показателя эффективности превентивных мер по обеспечению безопасности

$$E_s = \frac{R_{in} - R_{eq}}{R_{in}},$$

где E_s — показатель эффективности; R_{in} — начальный риск без учета мер по обеспечению безопасности; R_{eq} — риск с учетом мер по обеспечению безопасности.

Получение таких данных позволит уточнить как количественную, так и качественную оценку риска аварии и обосновать подходы к повышению надежности строительных конструкций.

Для снижения вероятности возникновения негативных событий при разработке проектной документации могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- независимый контроль проектирования, научно-техническое сопровождение (НТС) проектирования, государственная экспертиза проекта;
- НТС изготовления и монтажа, мониторинг на стадии возведения, разработка регламента строительно-монтажных работ, независимый контроль проектов производства работ, сварочных технологических карт и т. п.;
- мониторинг строительных конструкций на стадии эксплуатации, плановые и внеплановые обследования конструкций, разработка регламента по эксплуатации строительной конструкции;
- модельные аэродинамические испытания здания или сооружения сложной формы, разработка рекомендаций по климатическим нагрузкам на конструкцию;
- проведение независимого технического контроля качества материалов для изготовления несущих конструкций (в рамках НТС);
- геотехническая экспертиза;
- выполнение расчетов конструкций на максимальное расчетное землетрясение для сейсмических районов;
- антитеррористические мероприятия, контроль управления доступом, превентивные меры против ударов автотранспортом и др., учет особых нагрузок в соответствии с требованиями СП 296.1325800, специальные противопожарные мероприятия;
- наличие автоматических систем мониторинга строительных конструкций;
- повышение прочности конструкций при проектировании за счет введения дополнительных коэффициентов условий работы для ключевых элементов с учетом требований СП 296.1325800, а также коэффициентов надежности по ответственности;
- улучшение физико-химических свойств материалов конструкций;
- обеспечение альтернативных путей передачи нагрузок.

Рассмотрим работу конструкции или ее частей с точки зрения надежности на основе анализа статистических данных, моделей надежности и экспертной оценки. Для начала введем понятия базовых моделей надежности [1, 4] и определим варианты их использования в контексте строительных конструкций.

Зачастую установить конкретный закон распределения времени до обрушения элемента или конструкции очень сложно или невозможно, поэтому подразумевают, что случайная величина — время до аварии — распределена по известному закону, т. е. закон распределения известен априорно. Наиболее часто в теории надежности используют экспоненциальный закон распределения, а также распределения Рэлея и Вейбулла. Выбрав конкретный закон распределения, говорят, что для элемента (конструкции) справедлива соответствующая модель надежности.

Экспоненциальная модель надежности подразумевает, что интенсивность отказов объекта (конструкции) постоянна:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}, \lambda > 0,$$

а время до отказа — непрерывная случайная величина, распределенная экспоненциально, т. е. функция вероятности отказа принимает вид

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Из этой формулы мы можем получить еще несколько так называемых единичных показателей надежности:

- вероятность безотказной работы

$$Q(t) = e^{-\lambda t};$$

- плотность отказов

$$f(t) = P'(t) = \lambda e^{-\lambda t};$$

- среднее время до отказа

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty Q(t)dt = 1/\lambda.$$

У этой модели есть плюсы и минусы. Плюсы в ее простоте, а минус в том, что она хорошо описывает период нормальной работы и эксплуатации объекта. И не рассматривает период приработки и износа. В случае строительных конструкций это можно описать, как период выявления первичных ошибок проектирования, производства и выполнения строительно-монтажных работ до периода, когда объект переходит в стадию старения и происходят естественные процессы разрушения различных элементов конструкций.

Модель надежности Рэлея подразумевает, что время до отказа — непрерывная случайная величина, распределенная по закону:

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \sigma > 0,$$

где σ — параметр распределения, имеющий размерность времени.

Тогда остальные показатели надежности можно выразить зависимостями:

1. Оценка риска возникновения негативных событий для различных типов конструкций

Основные негативные события	Железобетонные конструкции, баллы			Стальные конструкции, баллы		
	сборный каркас	сборно-монолитный каркас	монолитный каркас	заводская поставка с узлами на болтах	заводского изготовления с применением сварных монтажных соединений	изготавливаемые на строительной площадке
Ошибки проектирования	3	2	1	1	2	3
Брак при выполнении строительно-монтажных работ	1	2	3	1	2	3
Эксплуатация конструкций, не соответствующая проектным решениям	1	1	1	1	1	1
Экстремальные значения климатических воздействий	1	1	1	1	1	1
Деградация свойств материалов конструкций вследствие механических воздействий, старения, пониженной температуры, химических процессов	1	2	3	1	2	3
Коррозионные повреждения и износ	3	2	1	2	2	2
Изменения грунтовых условий, карстовые процессы и иные влияния окружающей среды, не предусмотренные в проекте	1	1	1	1	1	1
Особые воздействия, такие как пожар, взрыв, наводнение, удар	3	2	1	3	3	3
Сейсмические воздействия	3	2	1	1	1	1
Негативное воздействие третьих лиц, в том числе террористические акты	3	2	1	1	2	3
Неисправность автоматических систем (СМИК, СМИС и т. п.), обеспечивающих мониторинг и своевременное обнаружение неисправностей	1	1	1	1	1	1
Неустановленные особые воздействия	1	1	1	1	1	1

Примечание. Для смешанных каркасов оценка производится отдельно для железобетонного и металлического каркаса, окончательное значение определяется средним значением риска в баллах.

$$Q(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}};$$

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}};$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{Q(t)} = \frac{t}{\sigma^2};$$

$$T_{\text{ср}} = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Если взглянуть на формулу интенсивности отказов, то очевидно, что λ представляет собой возрастающую прямую линию. Такая форма функции позволяет моделировать процессы износа и старения конструкции.

Модель надежности Вейбулла подразумевает, что время до отказа или аварии является непрерывной случайной величиной, распределенной по закону:

$$P(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, \eta, \beta > 0,$$

где β – безразмерный параметр формы; η – параметр масштаба, измеряемый в единицах времени (часы).

Остальные показатели надежности можно представить в виде:

$$Q(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}};$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}};$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{Q(t)} = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1};$$

$$T_{\text{ср}} = \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right),$$

где $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$ – гамма-функция, задаваемая обычно в табличном виде [1, 4].

Параметр β значительно влияет на форму функций плотности и интенсивности отказов: при $\beta > 1$ функция интенсивности монотонно возрастает, а функ-

2. Коэффициент снижения негативных воздействий за счет компенсирующих и контрольных мероприятий

Компенсирующие и контрольные мероприятия	Железобетонные конструкции, баллы			Стальные конструкции, баллы		
	сборный каркас	сборно-монолитный каркас	монолитный каркас	заводская поставка с узлами на болтах	заводского изготовления с применением сварных монтажных соединений	изготовляемые на строительной площадке
Независимый контроль проектирования, научно-техническое сопровождение (НТС) проектирования, государственная экспертиза проекта	0,875	0,85	0,825	0,865	0,85	0,835
НТС изготовления и монтажа, мониторинг на стадии возведения, разработка регламента строительно-монтажных работ, независимый контроль проектов производства работ, сварочных технологических карт и т. п.	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,835
Мониторинг строительных конструкций на стадии эксплуатации, плановые и внеплановые обследования конструкций, разработка регламента по эксплуатации строительной конструкции	0,975	0,95	0,925	0,965	0,95	0,935
Модельные аэродинамические испытания здания или сооружения сложной формы, разработка рекомендаций по климатическим нагрузкам на конструкцию	0,975	0,975	0,97	0,965	0,975	0,98
Независимый технический контроль качества материалов для изготовления несущих конструкций (в рамках НТС)	0,975	0,95	0,915	0,965	0,95	0,935
Геотехническая экспертиза	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
Расчет конструкций на максимальное расчетное землетрясение для сейсмических районов	0,925	0,95	0,975	0,975	0,975	0,975
Антитеррористические мероприятия, контроль управления доступом	0,925	0,95	0,975	0,965	0,95	0,935
Учет особых нагрузок в соответствии с требованиями СП 296.1325800	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,835
Наличие автоматических систем мониторинга строительных конструкций	0,975	0,975	0,97	0,965	0,975	0,98
Обеспечение повышенной прочности конструкций при проектировании за счет введения дополнительных коэффициентов условий работы для ключевых элементов с учетом требований СП 296.1325800, а также коэффициентов надежности по ответственности	0,925	0,95	0,975	0,965	0,95	0,935
Обеспечение повышенных физико-химических свойств материалов конструкций	0,975	0,975	0,97	0,965	0,975	0,98
Обеспечение альтернативных путей передачи нагрузок	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,835

ция плотности имеет характерный «горб»; при $\beta < 1$ — монотонно убывает, так же как и функция плотности отказов.

Рассмотренные модели можно адаптировать для анализа надежности строительных конструкций, в том числе прогнозирования факторов прогрессирующего обрушения. При экспертном подходе к оценке риска прогрессирующего обрушения для упрощения инженерной методики целесообразно использовать балльную систему, по аналогии с уже имеющимися подходами в других нормативных документах, где риск определен как двухмерный вектор, одна из координат которого представляет оценку вероятности, а другая — оценку

3. Описание шкалы для оценки вероятности отказа

Категория риска / класс сооружений	Железобетонные конструкции, баллы			Стальные конструкции, баллы		
	сборный каркас	сборно-монолитный каркас	монолитный каркас	заводская поставка с узлами на болтах	заводского изготовления с применением сварных монтажных соединений	изготавливаемые на строительной площадке
Низкая / КС-3	1—8	1—8	1—8	1—7	1—8	1—10
Средняя / КС-2	9—11	9—11	9—12	8—9	9—12	11—14
Высокая / КС-2	12—18	12—17	13—16	10—13	13—17	15—21
Очень высокая / КС-1	19—20	18—19	17—18	14—15	18—19	22—23

Примечание. Частота рискобразующего события может быть изменена с учетом особенностей проектируемого здания и сооружения главным инженером проекта и согласована с заказчиком проектной документации.

последствий негативного события (СП 366.1325800).

При разработке типовых сценариев угроз следует определять условия работы конструкций (основной режим), факторы и негативные события, влияющие на ее безопасность, основные негативные события и вероятные сопутствующие воздействия.

Основными параметрами для установления сценариев можно представить следующие:

- нагрузки и воздействия в соответствии с СП 20.13330;
- особые воздействия на конструкцию с учетом требований СП 296.1325800 и СП 20.13330;
- неустановленные особые воздействия;
- климатические условия;
- конструктивную схему, применяемые строительные материалы, наиболее уязвимые элементы и узлы, в которых возможно возникновение повреждений или износа;
- программу мониторинга при возведении и эксплуатации;
- вид, степень и последствия повреждений при возникновении определенного сценария.

Приведенные негативные события для конструктивных схем и типовые сценарии могут быть приняты в качестве исходных данных для составления шкалы оценки вероятности отказа здания или сооружения, а также оценки последствий таких негативных событий.

С учетом анализа негативных событий и угроз для зданий с различным конструктивным решением авторами статьи разработана балльная система определения риска отказа конструкции. Для зданий с различными конструктивными схемами риск возникновения отказа предлагается рассчитывать, как сумму вклада в баллах каждого вероятного негативного события *(табл. 1)*. Отсутствие вероятности того или иного негативного события должно быть обосновано. Риск отказа принимается равным сумме по каждой из 12 позиций, представленных в таблице.

Для снижения вероятности возникновения негативных событий при разработке проектной документации могут быть учтены мероприятия, приведенные в *табл. 2*. Коэффициент снижения негативных воздействий можно определить перемножением отдельных коэффициентов, с учетом наличия в проекте тех или иных мероприятий, снижающих вероятность отказа конструкции.

Расчетная вероятность отказа может быть получена умножением риска в баллах *(см. табл. 1)* на понижающий коэффициент *(см. табл. 2)*. Оценка вероятности отказа конструкции проводится по шкале *(табл. 3)* с учетом допустимых категорий риска для зданий различного уровня ответственности.

Вывод

В настоящее время накоплен огромный опыт оценки риска в различных областях техники в отечественной и зарубежной практике, который может быть использован для разработки актуальной методики прогнозирования аварийных ситуаций в строительстве. В отечественной нормативной базе, в частности в ФЗ-184, ГОСТ 27751 и др., заложена основа для оценки риска отказа строительных конструкций, при этом отсутствует нормативная методика оценки такого риска.

С целью формирования законченной и развитой системы нормативных документов по менеджменту и оценке риска аварий строительных конструкций следует разработать нормативную методику оценки риска, в том числе при особых воздействиях.

Для принятия наиболее правильного и приближенного к реальности инженерного подхода к оценке риска вероятность и последствия негативного события целесообразно оценивать комплексно как расчетным методом, так и экспертной оценкой в баллах на основании предложенного подхода.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Ведяков И. И., Райзер В. Д.* Надежность строительных конструкций. Теория и расчет. М. : АСВ, 2018. 412 с.
2. *Мельчаков А. П.* Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов. Челябинск : ЮУрГУ, 2006. 49 с.
3. *Шпете Г.* Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
4. *Ефремов А. А.* Теория надежности. Томск : ТГПУ, 2015. 83 с.
5. *Ржаницын А. Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.
6. *Болотин В. В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : Стройиздат, 1981. 351 с.
7. *Райзер В. Д.* Теория надежности в строительном проектировании. М. : АСВ, 1998. 304 с.
8. *Фортов В. Е., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Фомин В. М.* Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. 178 с.
9. EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7: General actions. Accidental actions [Воздействия на конструкции. Ч. 1–7. Общие воздействия. Особые воздействия].
10. *Райзер В. Д.* Оценка риска при проектировании сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 4. С. 15–19.
11. *Тамразян А. Г., Степанов А. Ю.* Количественная оценка риска прогрессирующего обрушения конструкций большепролетных сооружений // Сб. науч. тр. УНИИСК им. В. М. Шимановского. Киев, 2008. Вып. 1. С. 90–97.
12. *Байбурин А. Х., Мельчаков А. П.* Техническое регулирование безопасности зданий и сооружений на основе оценки риска аварии // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2017. № 11. С. 3–10.
13. *Тамразян А. Г.* Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 21–27.

R E F E R E N C E S

1. Vedyakov I. I., Rayzer V. D. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsiy. Teoriya i raschet* [Reliability of building structures. Theory and calculation]. Moscow, ASV Publ., 2018. 412 p. (In Russian).
2. Mel'chakov A. P. *Raschet i otsenka riska avarii i bezopasnogo resursa stroitel'nykh ob"ektov* [Calculation and assessment of accident risk and safe resource of construction facilities]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2006. 49 p. (In Russian).
3. Shpete G. *Nadezhnost' nesushchikh stroitel'nykh konstruktsiy* [Reliability of load-bearing building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994. 288 p. (In Russian).
4. Efremov A. A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Tomsk, TGPU Publ., 2015. 83 p. (In Russian).
5. Rzhanitsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy na nadezhnost'* [Theory of calculation of building structures for reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 239 p. (In Russian).
6. Bolotin V. V. *Metody teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy* [Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 351 p. (In Russian).
7. Rayzer V. D. *Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [Reliability theory in construction design]. Moscow, ASV Publ., 1998. 304 p. (In Russian).
8. Fortov V. E., Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. *Mashinostroenie Rossii: tekhnika Sibiri, Severa i Arktiki* [Mechanical engineering of Russia: machinery of Siberia, the North and the Arctic]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federalnyy universitet Publ., 2018. 178 p. (In Russian).
9. EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7: General actions. Accidental actions.
10. Rayzer V. D. Risk assessment in the design of structures. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy*, 2007, no. 4, pp. 15–19. (In Russian).
11. Tamrazyan A. G., Stepanov A. Yu. Quantitative assessment of the risk of progressive collapse of large-span structures. *Sb. nauchnykh trudov UNIISK im. V. M. Shimanovskogo.* Kiev, 2008, iss. 1, pp. 90–97. (In Russian).
12. Bayburin A. Kh., Mel'chakov A. P. Technical regulation of the safety of buildings and structures based on an accident risk assessment. *Arkhitektura, gradostroitel'stvo i dizayn*, 2017, no. 11, pp. 3–10. (In Russian).
13. Tamrazyan A. G. Basic principles of risk assessment in the design of buildings and structures. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 2, pp. 21–27. (In Russian).

Для цитирования: *Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Коваленко А. И.* Вероятностный подход к оценке риска прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 36–43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.

For citation: Vedyakov I. I., Solov'ev D. V., Kovalenko A. I. A Probabilistic Approach to Evaluating the Risk of Progressive Collapse. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 10, pp. 36–43. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.