УДК 69.07

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-5-15](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-5-15)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКА ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE RISK ANALYSIS OF PROGRESSIVE COLLAPSE

И. И. ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук
Д. В. СОЛОВЬЕВ, канд. техн. наук

Известные нормативные подходы к проектированию не позволяют учитывать вклад превентивных проектных мероприятий и проектных решений в надежность конструкции. В определенных случаях оценка риска может рассматриваться как подтверждение достаточности инженерных решений, примененных в проекте с целью защиты от прогрессирующего обрушения. В отечественной и зарубежной нормативной базе имеется ряд нормативных документов, устанавливающих правила расчета надежности технических объектов, требования к методикам, порядок представления результатов и определяющих принципиальные подходы к анализу видов, последствий и критичности отказов технических объектов.

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

В статье рассмотрена базовая система определения риска отказа конструкции, учитывающая особенности различных конструктивных схем зданий, возможность возникновения ряда негативных событий.

The existing regulatory approaches to design do not allow us to take into account the contribution of preventive design measures and design solutions to the reliability of the design. In certain cases, the risk assessment can be considered as a confirmation of the adequacy of engineering solutions used in the project to protect against progressive collapse. In the domestic and foreign regulatory framework, there are several normative documents that establish the rules for calculating the reliability of technical objects, requirements for methods, the procedure for presenting results, and defining fundamental approaches to analyzing the types, consequences, and criticality of failures of technical objects.

In order to form a complete and developed system of regulatory documents, it is necessary to develop and implement a regulatory methodology for assessing the risk of failure of building structures, including working under special influences.

The article considers a point-based system for determining the risk of structural failure, taking into account the features of various structural schemes of buildings, the possibility of several negative events.

Ключевые слова:

Здания и сооружения повышенного уровня ответственности, особо опасные объекты, оценка риска, прогрессирующее обрушение, расчет строительных конструкций, уникальные и большепролетные конструкции

Key words:

Buildings and structures with a high level of responsibility, calculation of building structures, long-span structures, non-proportional destruction, progressive collapse, risk analysis, unique structures

В настоящее время активно формируется нормативная база в области обеспечения сопротивления конструкций прогрессирующему обрушению. Вместе с этим определен курс правительства и крупных собственников в промышленности на модернизацию и реконструкцию производств. Имеющиеся нормативные подходы зачастую препятствуют решению таких задач, не позволяют учитывать вклад превентивных проектных мероприятий и проектных решений в надежность конструкции. В связи с этим возможность оценки риска отказа строительных конструкций становится очень актуальной.

Одним из направлений совершенствования методов расчета строительных конструкций является развитие вероятностных подходов к определению несущей способности. В свободном доступе можно ознакомиться с целым рядом учебных пособий по этой тематике, в том числе по основам расчета надежности технических систем, по надежности их элементов. В работах [4, 5, 6] рассмотрены вероятностные модели нагрузок и методы вычисления вероятности отказа применительно к строительному проектированию. Таким образом, за последние годы отечественная наука продвинулась в совершенствовании и систематизации знаний в этой области, в строительных ВУЗах уже несколько десятилетий студенты изучают подходы к оценке надежности конструктивных систем.

Возникновение интереса к вопросу применения теории вероятности и статистики к определению характеристик безопасности конструкций относится к 20-м годам прошлого века; 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. [1, 2, 3].

При этом, как отмечает ряд авторов, методология расчета строительных конструкций на надежность с применением теории вероятности в настоящее время развита недостаточно. Связано это, возможно, с тем, что указанному вопросу уделяется недостаточно внимания на уровне нормотворчества в связи с устоявшимся мнением о сложности таких инженерных подходов.

При этом наиболее прогрессивным направлением, применяющимся в различных областях техники в отечественной и зарубежной практике для технически сложных систем, являются методы менеджмента и оценки риска.

Основы указанного метода заложены еще в практике совершенствования отечественных строительных норм по оценке рисков и защищенности объектов повышенного уровня ответственности от тяжелых аварий и катастроф [7].

В ФЗ-184 «О техническом регулировании», ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и СП 296.1325800.2017 «Здания и соору-

жения. Особые воздействия» создана основа возможности оценки риска отказа конструкций в процессе проектирования, при этом отсутствует нормативная методика оценки такого риска.

Отметим, что «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» утверждена в 2009 г. и применяется достаточно часто, особенно при возведении уникальных, особо опасных и технически сложных объектов. В этом документе расчетные величины пожарного риска рассматриваются как количественная мера возможности реализации пожарной опасности объекта и ее последствий для людей.

В отечественной нормативной базе имеется ряд гостов в области надежности 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., устанавливающих общие правила расчета надежности технических объектов, требования к методикам, порядок представления результатов и определяющих принципиальные подходы к анализу видов, последствий и критичности отказов технических объектов всех видов. По форме и подходам очень близок к оценке рисков строительных конструкций СП 366.1325800.2017 «Промысловые трубопроводы. Оценка технических решений на основе анализа риска» [8].

Отечественные ГОСТы в области надежности в технике в основной массе учитывают подходы к этой проблематике, отраженные в американских нормативных документах. В европейских нормах – в Eurocode 1 BS EN 1991-1-7:2006 в приложении «В» [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, примененных в проекте с целью защиты от прогрессирующего обрушения. Аналогичное применение оценки риска отказа конструкций, как видим, имеется и в отечественной, и в зарубежной практике проектирования. С целью формирования законченной и развитой 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: это 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.

Применительно к прогрессирующему обрушению вероятность такого события связывают с вероятностью отказа основных несущих элементов конструкций или ключевых элементов (в терминологии СП 296.1325800.2017) при особых воздействиях.

Определение величины риска основывается на количественных и качественных методах оценки.

Теме оценки безопасности зданий и сооружений на основе количественной оценки риска посвящен ряд работ [10, 11, 12].

Идентификация угроз является одной из основных задач при анализе риска прогрессирующего обрушения. Приведем основные негативные события, влияющие на вероятность нарушения целостности конструкции:

- 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, пониженных температур, химических процессов;
- коррозионные повреждения и износ;
- изменения грунтовых условий, карстовые процессы и иные влияния окружающей среды, не предусмотренные в проекте;
- особые воздействия, такие как пожар, взрыв, наводнение, удар;
- сейсмические воздействия;
- негативное воздействие третьих лиц, в т. ч. террористические акты;
- неисправность автоматических систем (СМИК, СМИС и т.п.) при их наличии, обеспечивающих мониторинг и своевременное обнаружение неисправностей;
- неустановленные особые воздействия.

На основании указанных негативных событий можно определить 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 разрушению конструкций. 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 27751-2014, СП 296.1325800.2017 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] по определению 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 указанных данных позволит уточнить как количественную, так и качественную оценку риска аварии и в целом обосновать подходы к повышению надежности строительных конструкций.

Для снижения вероятности возникновения негативных событий при разработке проектной документации могут быть учтены 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 (МРЗ), для сейсмических районов;
- антитеррористические мероприятия, контроль управления доступом, превентивные меры против ударов автотранспортом и др.; учет особых нагрузок в соответствии с требованиями СП 296.1325800.2017; специальные противопожарные мероприятия;
- наличие автоматических систем мониторинга строительных конструкций;
- обеспечение повышенной прочности конструкций при проектировании посредством введения дополнительных коэффициентов условий работы для ключевых элементов с учетом требований СП 296.1325800.2017, введения коэффициентов надежности по ответственности;
- обеспечение повышенных физико-химических свойств материалов конструкций;
- обеспечение альтернативных путей передачи нагрузок.

Как уже отмечалось, количественная оценка риска является многофакторной и достаточно сложной задачей, поэтому с целью упрощения инженерного подхода к оценке риска вероятность и последствия негативного события целесообразно оценивать не расчетным методом, а экспертной оценкой в баллах по аналогии с уже имеющимися в других нормативных документах подходами, где риск представляет собой двухмерный вектор, одна из координат которого представляет оценку вероятности, а другая – оценку последствий негативного события [8].

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

Определяющими параметрами для установления сценариев можно представить следующие:

- нагрузки и воздействия в соответствии с СП 20.13330.2016;

- особые воздействия на конструкцию с учетом требований СП 296.1325800.2017 и СП 20.13330.2016;
- неустановленные особые воздействия;
- климатические условия;
- конструктивная схема, применяемые строительные материалы, наиболее уязвимые элементы и узлы, в которых возможно возникновение повреждений или износа;
- программа мониторинга при возведении и эксплуатации;
- вид и степень повреждений при возникновении определенного сценария, а также последствия повреждений.

Указанные негативные события для конструктивных схем и типовые сценарии могут быть приняты в качестве исходных данных с целью составления шкалы для 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 нами разработана балльная система определения риска отказа конструкции, состоящая в следующем.

Для зданий с различными конструктивными схемами риск возникновения отказа предлагается определять 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 может быть определен перемножением отдельных коэффициентов с учетом наличия в проекте тех или иных мероприятий, снижающих вероятность отказа конструкции.

Расчетная вероятность отказа может быть определена умножением риска в баллах, определенного по табл. 1, на понижающий коэффициент, определенный по табл. 2.

Оценка вероятности отказа конструкции проводится по шкале, приведенной в табл. 3, с учетом допустимых категорий риска для зданий различного уровня ответственности (табл. 4).

Выводы

В настоящее время накоплен огромный опыт оценки риска в различных областях техники в отечественной и зарубежной практике, который может быть использован при разработке (актуальной) методики прогнозирования аварийных ситуаций в строительстве.

В отечественной нормативной базе, в частности, в ФЗ-184, ГОСТ 27751-2014 и др., заложена основа для возможности 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 аварии строительных конструкций следует разработать и внедрить нормативную методику оценки риска, в том числе при особых воздействиях.

Для упрощения инженерного подхода к оценке риска вероятность и последствия негативного события целесообразно оценивать не расчетным методом, а экспертной оценкой в баллах на основании предложенного подхода.

Таблица 1

**Оценка риска возникновения негативных событий (в баллах)
для различных типов конструкций**

№ п.п.	Основные негативные события	Железобетонные конструкции			Стальные конструкции		
		Сборный каркас	Сборно-монолитный каркас	Монолитный каркас	Заводская поставка с узлами на болтах	Заводское изготовление с применением сварных монтажных соединений	Изготавливаемые на строительной площадке
1	Ошибки проектирования	3	2	1	1	2	3
2	Брак при выполнении строительно-монтажных работ	1	2	3	1	2	3
3	Эксплуатация конструкций, не соответствующая проектным решениям	1	1	1	1	1	1
4	Экстремальные значения климатических воздействий	1	1	1	1	1	1
5	Деградация свойств материалов конструкций вследствие механических воздействий, старения, пониженных температур, химических процессов	1	2	3	1	2	3
6	Коррозионные повреждения и износ	3	2	1	2	2	2
7	Изменения грунтовых условий, карстовые процессы и иные влияния окружающей среды, не предусмотренные в проекте	1	1	1	1	1	1
8	Особые воздействия, такие как пожар, взрыв, наводнение, удар	3	2	1	3	3	3
9	Сейсмические воздействия	3	2	1	1	1	1
10	Негативное воздействие третьих лиц, в т. ч. террористические акты	3	2	1	1	2	3
11	Неисправность автоматических систем (СМИК, СМИС и т. п.) при наличии, обеспечивающих мониторинг и своевременное обнаружение неисправностей	1	1	1	1	1	1
12	Неустановленные особые воздействия	1	1	1	1	1	1

Примечание:

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

Таблица 2

**Коэффициент снижения негативных воздействий за счет компенсирующих
и контрольных мероприятий**

№ п.п.	Компенсирующие и контрольные мероприятия	Железобетонные конструкции			Стальные конструкции		
		Сборный каркас	Сборно-монолитный каркас	Монолитный каркас	Заводская поставка с узлами на болтах	Заводское изготовление с применением сварных монтажных соединений	Изготавливаемые на строительной площадке
1	Независимый контроль проектирования, научно-техническое сопровождение (НТС) проектирования, государственная экспертиза проекта	0,875	0,85	0,825	0,865	0,85	0,835
2	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
3	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
4	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
5	Проведение независимого технического контроля качества материалов для изготовления несущих конструкций (в рамках НТС)	0,975	0,95	0,915	0,965	0,95	0,935
6	Геотехническая экспертиза	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
7	Выполнение расчетов конструкций на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) для сейсмических районов	0,925	0,95	0,975	0,975	0,975	0,975
8	Антитеррористические мероприятия, контроль управления доступом	0,925	0,95	0,975	0,965	0,95	0,935
9	Учет особых нагрузок в соответствии с требованиями СП 296.1325800.2017	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,835
10	Наличие автоматических систем мониторинга строительных конструкций	0,975	0,975	0,97	0,965	0,975	0,98

№ п.п.	Компенсирующие и контрольные мероприятия	Железобетонные конструкции			Стальные конструкции		
		Сборный каркас	Сборно-монолитный каркас	Монолитный каркас	Заводская поставка с узлами на болтах	Заводское изготовление с применением сварных монтажных соединений	Изготавливаемые на строительной площадке
11	Обеспечение повышенной прочности конструкций при проектировании за счет введения дополнительных коэффициентов условий работы для ключевых элементов с учетом требований СП 296.1325800.2017, введения коэффициентов надежности по ответственности	0,925	0,95	0,975	0,965	0,95	0,935
12	Обеспечение повышенных физико-химических свойств материалов конструкций	0,975	0,975	0,97	0,965	0,975	0,98
13	Обеспечение альтернативных путей передачи нагрузок	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,835

Таблица 3

Описание шкалы для оценки вероятности отказа

№ п.п.	Категория риска	Железобетонные конструкции			Стальные конструкции		
		Сборный каркас	Сборно-монолитный каркас	Монолитный каркас	Заводская поставка с узлами на болтах	Заводское изготовление с применением сварных монтажных соединений	Изготавливаемые на строительной площадке
1	Низкая	1-8	1-8	1-8	1-7	1-8	1-10
2	Средняя	9-11	9-11	9-12	8-9	9-12	11-14
3	Высокая	12-18	12-17	13-16	10-13	13-17	15-21
4	Очень высокая	19-20	18-19	17-18	14-15	18-19	22-23

Примечание:
Описание частоты риск-образующего события может быть изменено главным инженером проекта и согласовано с заказчиком ПД на ПТ. Изменение должно учитывать особенности проектируемого здания и сооружения.

Допустимые категории риска

№ п.п.	Уровень ответственности	Категория риска
1	КС-3, уникальные здания и сооружения	Низкая
2	КС-3, технически сложные производственные объекты	Ниже среднего
3	КС-2, здания с большим числом людей, жилые здания и т. п.	Средняя
4	КС-2	Высокая
5	КС-1	Очень высокая

Библиографический список

1. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность.– М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
2. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. 351 с.
3. *Райзер В.Д.* Теория надежности в строительном проектировании. – М.: АСВ, 1998. 304 с.
4. *Ведяков И.И., Райзер В.Д.* Надежность строительных конструкций. Теория и расчет. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2018. 412 с.
5. *Мельчаков А.П.* Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов. (Теория, методики и инженерные приложения): Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 49 с.
6. *Шнете Г.* Надежность несущих строительных конструкций/ пер. с нем. О.О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. 288 с.
7. *Фортвов В.Е., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М.* Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики: Монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 178 с.
8. СП 366.1325800.2017 Промысловые трубопроводы. Оценка технических решений на основе анализа риска.
9. BS EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7: General actions. Accidental actions.
10. *Райзер В.Д.* Оценка риска при проектировании сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. №4. С. 15-18.
11. *Тамразян А.Г., Степанов А.Ю.* Количественная оценка риска прогрессирующего обрушения конструкций большепролетных сооружений – Київ: Сб. наукових праць УНІІСК ім. В. М. Шимановського. 2008. Вип. 1. С. 90-97.
12. *Байбурун 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. – М.: Вестник МГСУ. 2011. №2. С. 21-27.

Авторы:

Иван Иванович ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук, проф., директор ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan VEDYAKOV, D. Sci. (Engineering), Full Professor, Director of TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vedykov@gmail.com

тел.: +7 (499) 171-26-50

Дмитрий Валерьевич СОЛОВЬЕВ, канд. техн. наук, заведующий сектором лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitriy SOLOVYEV, Ph. D. (Engineering), Head of Sector of Metal structures in Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: DVSolov@yandex.ru

тел.: +7 (499) 170-67-78; +7 (903) 107-03-47