



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
METAL CONSTRUCTIONS**

2022, ТОМ 28, НОМЕР 3, 107–129

EDN: OUSSUU

УДК 624.73

(22)-0443-1

## **К АНАЛИЗУ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ЛАВИНООБРАЗНОГО ОБРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ (ЧАСТЬ 2)**

**В. Ф. Муцанов**

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.*

*E-mail: mvf@donnasa.ru*

*Получена 11 августа 2022; принята 09 сентября 2022.*

**Аннотация.** В статье выполнен анализ основных нормативных документов, действующих на постсоветском пространстве стран СНГ, в странах Европейского Союза, США, Великобритании, в рамках которых рассматриваются процедуры проектирования, направленные на предотвращение развития прогрессирующего обрушения. Сравниваются и анализируются различные подходы в формулировках рассматриваемых расчетных ситуаций, конструктивных решений, к критериям несущей способности, параметрам зданий и сооружений, на которые распространяются требования по разработке мероприятий, исключающих развитие прогрессирующего обрушения. Выполнена критическая оценка конструктивных приемов, ориентированных на предупреждение развития прогрессирующего обрушения в конструкциях каркасов многоэтажных зданий, регламентированных нормативными документами. В дополнение к этому выполнен анализ основных научных исследований, направленных как на предупреждение развития лавинообразного обрушения, так и на решение смежных проблем (повышение живучести, снижение вероятности отказа и т. д.). На основе проведенного анализа формулируются актуальные задачи, на которых должны сфокусировать свое внимание исследователи, работающие в этом направлении.

**Ключевые слова:** прогрессирующее обрушение, здания и сооружения, нормы проектирования.

## **ДО АНАЛІЗУ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ З ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЛАВИНОПОДІБНОГО ОБВАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ (ЧАСТИНА 2)**

**В. П. Муцанов**

*ДОН ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.*

*E-mail: mvf@donnasa.ru*

*Отримана 11 серпня 2022; прийнята 09 вересня 2022.*

**Анотація.** У статті виконано аналіз основних нормативних документів, що діють на пострадянському просторі країн СНД, в країнах Європейського Союзу, США, Великобританії, в рамках яких розглядаються процедури проектування, спрямовані на запобігання розвитку прогресуючого обвалення. Порівнюються і аналізуються різні підходи у формулюваннях розрахункових ситуацій, конструктивних рішень, до критеріїв несучої здатності, параметрів будівель і споруд, на які поширюються вимоги з розробки заходів, що виключають розвиток прогресуючого обвалення. Виконано критичну оцінку конструктивних прийомів,



орієнтованих на попередження розвитку прогресуючого обвалення в конструкціях каркасів багатопверхових будівель, регламентованих нормативними документами. На додаток до цього виконано аналіз основних наукових досліджень, спрямованих як на запобігання розвитку лавиноподібного обвалення, так і на вирішення суміжних проблем (підвищення живучості, зниження ймовірності відмови тощо). За підсумками проведеного аналізу формулюються актуальні завдання, на яких мають сфокусувати свою увагу дослідники, які працюють у цьому напрямі.

**Ключові слова:** прогресуюче руйнування, будівлі та споруди, норми проектування.

## TO THE ANALYSIS OF THE MAIN PROVISIONS OF REGULATORY DOCUMENTS FOR THE PREVENTION OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDING STRUCTURES (PART 1)

Vladimir Mushchanov

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

*E-mail: mvf@donnasa.ru*

*Received 11 August 2022; accepted 09 September 2022.*

**Abstract.** The article analyzes the main regulatory documents in force in the post-Soviet space of the CIS countries, the countries of the European Union, the USA, Great Britain, within which design procedures are considered aimed at preventing the development of progressive collapse. Different approaches are compared and analyzed in the formulation of the considered design situations, constructive solutions, to the bearing capacity criteria, parameters of buildings and structures, which are subject to the requirements for the development of measures that exclude the development of progressive collapse. A critical assessment of constructive techniques aimed at preventing the development of progressive collapse in the frame structures of multi-storey buildings, regulated by regulatory documents, has been carried out. In addition to this, an analysis of the main scientific studies aimed both at preventing the development of an avalanche collapse and at solving related problems (increasing survivability, reducing the probability of failure, etc.) was carried out. On the basis of the analysis carried out, actual tasks are formulated, on which researchers working in this direction should focus their attention.

**Keywords:** progressive collapse, buildings and structures, regulatory documents.

### Анализ нормативных документов зарубежной школы проектирования

Анализ мирового опыта в этом направлении позволяет отметить более широкую проработку этого вопроса в нормативной базе ряда стран (прежде всего в США и Великобритании, как в странах, в которых накоплен наибольший опыт высотного строительства). Некоторые основные сведения приведены в таблице 1.

Несмотря на определенные различия в представленных в таблице 1 нормативных документах, общая идеология анализа несущей способности конструкции, получившей повреждения,

потенциально опасные, учитывая развитие прогрессирующего обрушения, может быть сведена к следующей схеме, представленной в одной из анализируемых работ (рис. 1).

При этом полный риск  $R$  предлагается оценить следующим образом

$$R = \sum_{i=1}^{N_H} p(H_i) \sum_j^{N_D} \sum_{k=1}^{N_S} P(D_j | H_i) P(S_k | D_j) C(S_k). \quad (1)$$

где  $N_H$  – количество различных угроз, способных повредить конструкцию;

$N_D$  – количество способов повреждения конструкции (в зависимости от данной угрозы);

Таблица 1. Анализ некоторых документов зарубежной нормативной базы

№ п/п	Наименование документа	Страна	Основные требования (рекомендации)
1	2	3	4
1.	ДБН В.2.2-24.2009 «Проектирование высотных и гражданских зданий»	Украина	<p>Документ распространяется на проектирование новых высотных жилых и общественных зданий с условной высотой от 73,5 м до 100 м включительно. Проектирование общественных зданий с условной высотой более 100 м разрешается выполнять как объектов экспериментального строительства в соответствии с индивидуальными техническими условиями. Нормы не распространяются на капитальный ремонт и реконструкцию высотных зданий.</p> <p>В качестве локального (гипотетического) обрушения следует рассматривать обрушение (удаление) вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания, ограниченного кругом площадью до 80 м<sup>2</sup> (диаметр 10 м):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– обрушение (удаление) отдельной колонны (пилона) или колонны (пилона) с примыкающими к ним участками стен, размещенными на одном этаже на площади локального обрушения.</li> <li>– обрушение участка перекрытия одного этажа на площади локального обрушения.</li> </ul> <p>Документ содержит методику рекомендательного характера Приложение Е) по расчету высотного здания на прогрессирующее обрушение, согласно которой:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– конструкции здания рекомендуется рассчитывать как систему «основание – фундамент – сооружение» с применением программных комплексов, позволяющих учитывать физическую и геометрическую нелинейности;</li> <li>– полученное напряженно-деформированное состояние является стартовым для расчета на нагрузки от удаляемых элементов;</li> <li>– расчет на дополнительную нагрузку от удаляемых элементов проводится в физически и геометрически нелинейной постановке. Нагрузки от удаления элементов соответствуют усилиям, полученным в них на предыдущем</li> </ul>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			<p>этапе расчета и увеличенным на коэффициент динамичности <math>1,2</math>. Проверка на прочность остающихся элементов выполняется без учета продольного изгиба.</p> <p>Расчетные характеристики прочности и деформативности материалов принимаются равными их нормативным значениям соответственно действующим нормам проектирования</p>
2	<p>Actions on structures – Part 1–7: General actions – Accidental actions (с технической поправкой EN 1991-1-7:2006/AC:2010)</p>	Европейский Союз	<p>Прогрессирующее обрушение рассматривается данным документом как <i>особая расчетная ситуация</i>, стратегия решения которой основана на локализации масштабов обрушения и возможна в рамках реализации следующих направлений:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>эффективное резервирование</i>, например, с помощью альтернативных путей передачи усилия,</li> <li>– <i>расчет ключевых элементов на допустимое особое нагружение <math>A_d</math></i>,</li> </ul> <p>Примечание: Рекомендованное значение для конструкций зданий <math>A_d = 34 \text{ кН/м}^2</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>конструктивные правила</i>, например, целостность, деформативность.</li> </ul> <p>Конкретные рекомендации для реализации предлагаемых направлений (стратегий) содержатся в Приложении А «Проектирование с учетом последствий локального разрушения конструкций в зданиях вследствие неустановленной причины».</p> <p>Данным документом высотные здания относятся к 3-му (самому высокому) классу по последствиям обрушения, для которых необходима расчетная систематичная оценка риска с учетом прогнозируемых и непрогнозируемых угроз (рис. 1).</p> <p>Расчетные зоны локального разрушения могут быть разными для каждого типа здания. Рекомендуемым значением является 15 % площади перекрытия, но не более <math>100 \text{ м}^2</math> на каждом из двух смежных этажей (рис. 2).</p>
3.	<p>UFC 4-023-03 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, with Change 3</p>	США	<p>Документ подготовлен Армейским корпусом инженеров США, Инженерной командой военно-морских объектов США, Агентством поддержки гражданских инженеров ВВС США.</p> <p>Документ объемом в 245 страниц носит всеобъемлющий характер:</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
			<p>ГЛАВА 1 – <i>Введение</i> (цель и область применения, применимость, общие понятия, краткое изложение проектных процедур прогрессирующего обрушения);</p> <p>ГЛАВА 2 – <i>Проектные требования в части прогрессирующего обрушения для новых и существующих конструкций</i> (определение категорий риска, проектные требования в зависимости от категорий риска);</p> <p>ГЛАВА 3 – <i>Проектные процедуры</i> (нагрузки и несущая способность, метод альтернативного пути, улучшенное местное сопротивление);</p> <p>ГЛАВА 5 – <i>Стальные конструкции</i> (требования к сталям и методам расчета, применение метода альтернативного пути для стальных конструкций)</p>
4.	GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance		<p>Руководство ориентировано на уменьшение вероятности прогрессирующего обрушения в новых и реконструируемых федеральных зданиях. Оно призвано обеспечить постоянный уровень защиты от прогрессирующего разрушения федеральных объектов и привести его в соответствие с набором стандартов безопасности, выпущенных Межведомственным комитетом по безопасности (ISC), Министерством обороны (DoD) и Администрацией общего обслуживания (GSA).</p> <p>Документ состоит из четырех основных разделов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вводный раздел, в котором рассматриваются общие цели и применимость руководящих принципов (главы 1 и 2);</li> <li>– раздел, в котором обсуждаются необходимые процедуры проектирования (глава 3);</li> <li>– раздел, в котором представлены конкретные критерии для материала (главы 4–8);</li> <li>– ряд приложений, которые предоставляют дополнительную справочную информацию, рекомендации и примеры разработки для реализации этих руководящих принципов (Приложения A...E).</li> </ul> <p>В целом процедуры проектирования,</p>

1	2	3	4
			используемые в настоящем Руководстве, направлены на снижение вероятности прогрессирующего разрушения, компенсируя потерю конструктивного элемента и локализуя область повреждения (альтернативный вариант).
5.	BS 5950-1:2000 (издание 2008 г.: Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment № 1) Structural use of steelwork in building. См. раздел 2.4.5 Structural integrity.	Великобритания	Подготовлен Британским институтом стандартов. Разделами 2.4.2...2.4.5 данного документа формулируются: – минимальные требования в части прогрессирующего обрушения; – ограничение эффектов случайного смещения опор; – ключевые элементы
6.	SCI P391 Structural Robustness of Steel Framed Buildings. – 2011	Великобритания	Документ подготовлен Институтом стальных конструкций (SCI) посвящен проблеме живучести стальных конструкций, которая определяется частью 1–7 Еврокода 1 как «...свойство конструкции противостоять таким случаям, как пожар, взрыв, удар или результат человеческих ошибок, без возникновения повреждений, непропорциональных по отношению к причинам, вызвавшим повреждения»

$N_s$  – количество неблагоприятных состояний  $S_k$  поврежденной конструкции с соответствующими последствиями  $C(S_k)$ ;

$P(H_i)$  – вероятность возникновения  $i$ -й угрозы (в рамках данного интервала времени);

$P(D_j|H_i)$  – условная вероятность возникновения  $j$ -го поврежденного состояния конструкции при наступлении  $i$ -й угрозы;

$PS_k|D_j$  – условная вероятность наступления  $k$ -го неблагоприятного общего состояния  $S$  конструкции, находящейся в  $j$ -м поврежденном состоянии.

Многие из положений UFC 4-023-03 вошли в требования и рекомендации СП 385.1325800.2018, поэтому повторно на них останавливаться не будем. Обратим внимание лишь на некоторые положения этого объемного документа:

*а) метод альтернативного пути.*

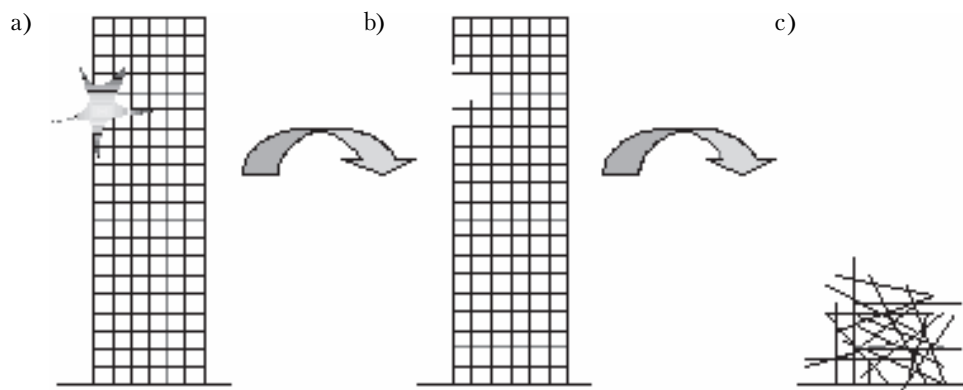
В методе альтернативного пути (Alternate Path - AP) проектировщик должен показать, что сооружение способно компенсировать удаленную колонну или секцию стены и что результирующие деформации и внутренние усилия не превыша-

ют приемлемых критериев. В рамках метода допускаются три процедуры анализа:

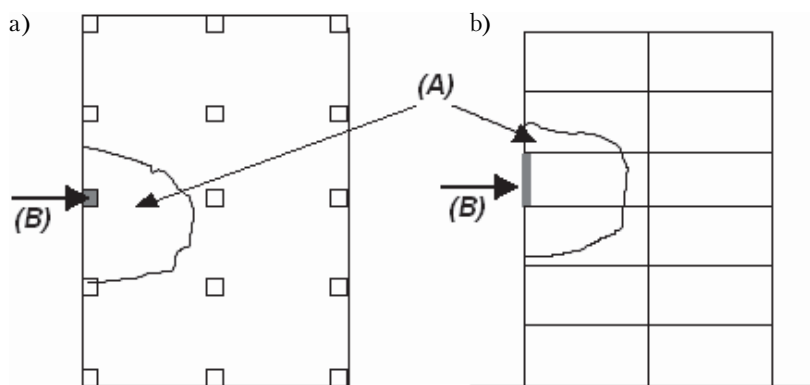
- линейная статическая,
- нелинейная статическая,
- нелинейная динамическая.

Оценка приведенных процедур анализа в соответствующей области сейсмического проектирования показала, что процедуры, указанные в ASCE 41 «Сейсмическая реабилитация существующих зданий», могут быть приняты и изменены для применения в UFC 4-023-03 2009 года. Наиболее существенные различия между физикой, намерениями и подходами, лежащими в основе UFC 4-023-03 и ASCE 41, заключаются в следующем:

- *степень разрушения.* Сейсмическое событие включает в себя всю конструкцию, в то время как для прогрессирующего разрушения начальное событие локализуется в области удаления колонны / стены;
- *типы нагрузки.* Сейсмические нагрузки являются горизонтальными и временными; для прогрессирующего разрушения нагрузки являются вертикальными и постоянными;



**Рисунок 1.** Этапы анализа риска для конструкций, испытывающих особые нагрузки: этап 1 (схема а) – определение и моделирование основных особых угроз. Оценка вероятности возникновения различных угроз с разными интенсивностями; этап 2 (схема б) – оценка состояния поврежденной конструкции вследствие различных угроз. Оценка вероятности различных состояний повреждения и соответствующих последствий указанных угроз; этап 3 (схема с) – оценка общего состояния поврежденной конструкции. Оценка вероятности аварийного общего состояния поврежденной конструкции с соответствующими последствиями.



**Рисунок 2.** Рекомендованные границы для допустимого повреждения: (А) – локальное повреждение не превышает 15 % площади перекрытия на каждом из двух смежных этажей; (В) – условно удаляемая колонна; а) план этажа; б) разрез.

- *о распределение повреждений.* При проектировании на воздействие землетрясения принято, что повреждения будут распределены по всему сооружению. При прогрессирующем обрушении первоначальный урон локализуется, и цель состоит в том, чтобы не дать ему прогрессировать;
- *о связь и ответ участника.* В типичных испытаниях для оценки сейсмических характеристик соединений и элементов применяются циклические нагрузки с возрастающей величиной без осевой нагрузки, а полученные кривые используются для построения кривых «магистральной». При прогрессирующем разрушении соединение и элемент испыты-

вают половину цикла нагрузки, часто в сочетании со значительной осевой нагрузкой, из-за больших деформаций и контактной реакции.

Эти различия были учтены при адаптации процедур и критериев ASCE 41 к моделированию и проектированию альтернативного пути для прогрессирующего разрушения в следующих формах:

- *границы разрушения.* В предыдущей версии UFC границы повреждений были установлены на уровне 15 и 30 % для площади перекрытия над удаленной колонной или стеной для внешней или внутренней колонны или стены, соответственно. В настоящей версии UFC

разрушение перекрытия не допускается, поскольку система перекрытий, балок и ригелей непосредственно над удаленной колонной могут быть спроектированы так, чтобы они не выходили из строя, как это делается для отсеков в перекрытиях над удаленной колонной;

– *моделирование и приемлемые критерии*. За некоторыми заметными исключениями, критерии обновления для линейных и нелинейных подходов и критерии моделирования для нелинейных подходов из ASCE 41 используются в обновленном UFC 4-023-03. Критерии ASCE 41 считаются консервативными применительно к конструкции с прогрессирующим разрушением, поскольку они были разработаны для повторяющихся циклов нагрузки, тогда как в прогрессирующем обрушении применяется только один цикл половинной нагрузки. Как указано в каждой главе данного UFC, посвященной конкретным материалам, для многих из этих компонентов используются уровни «Предотвращение разрушения» или «Безопасность жизнедеятельности» в ASCE 41. Заметные исключения (модификации) содержат балки и плиты RC и ряд стальных соединений. Эти изменения мотивированы и обоснованы экспери-

ментальными данными и результатами численного анализа;

– соединения из конструкционной стали. Различные типы соединений для конструкций со стальным каркасом перечислены в таблице 2. Этот список представляет собой перечень типов соединений, которые использовались в прошлом и/или в настоящее время для стандартных приложений проектирования строительных норм;

– *требования к стальным соединениям*. Для новой и существующей конструкции расчетная прочность и вращательная способность балок в соединениях между балками и колоннами должны определяться в соответствии с указаниями, приведенными в ASCE 41, с изменениями в соответствии с критериями приемлемости, приведенными в пункте 5-4.3 настоящего UFC;

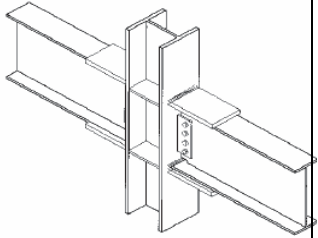
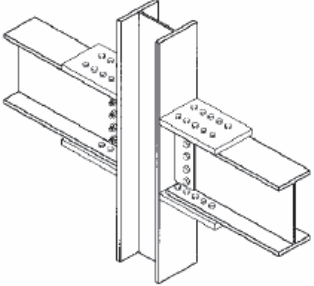
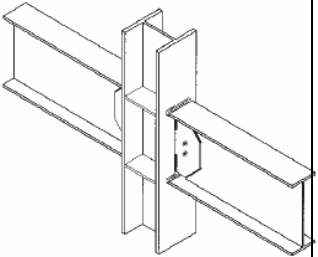
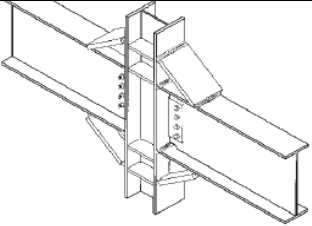
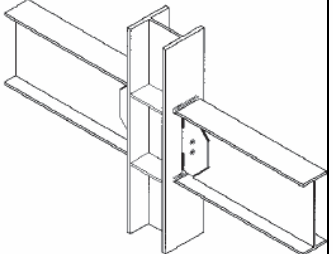
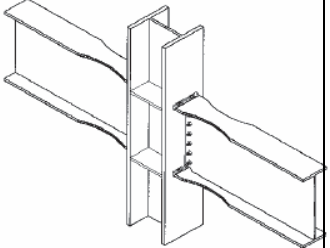
– *оценка уровней конструкции*. Чтобы определить соответствующий уровень конструктивных характеристик и соответствующие приемлемые критерии моделирования из ASCE 41, были оценены типы нагрузки и результирующие характеристики соединений из конструкционной стали, поскольку существует фундаментальное различие между

Таблица 2. Типы соединения балки с колонной в стальной раме

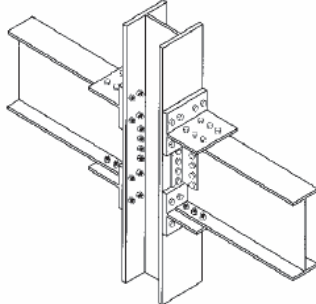
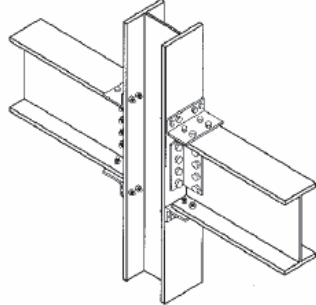
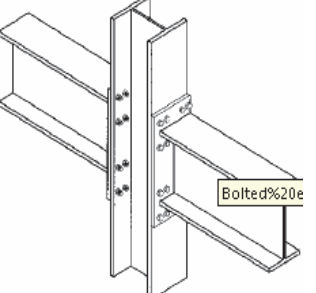
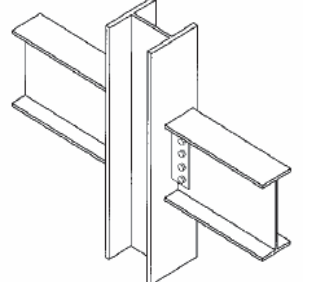
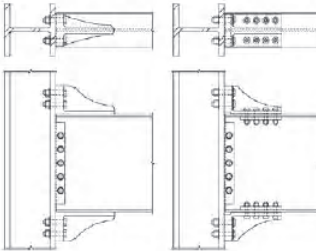
Соединение	Описание	Тип	Фигура	Эскиз соединения
1	2	3	4	5
Приваренная неусиленная полка (WUF)	Сварные швы по всей длине между полками балок и колоннами, прикрепленной болтами или на сварке стенкой, разработанные до изменения норм после землетрясения в Нортридже.	FR	C-8 (a)	
Приваренные накладки (WFP)	Накладка пластина со швом по всей длине к колонне и угловыми швами, соединяющими с полкой балки	FR	C-8 (b)	



Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Полки с приваренными накладками	Полка балки и накладка приварены к полке колонны	FR	C-8 (c)	
Накладка на болтах (BFP)	Накладка со швом по всей длине к колонне и по всей плоскости – болтами к полке балки	FR или PR	C-8 (d)	
Улучшенная приваренная неусиленная полка и стенка на болтах WUF (1)	Сварными швами полки балок соединены с колонной, стенка – на болтах. Разработан после землетрясения в Нортридже.	FR	C-8 (e)	
Приваренные верхний и нижний подкосы	Соединение с верхним и нижним приваренными подкосами, разработанное после землетрясения в Нортридже	FR	C-8 (f)	
Свободный фланец	На концах балки стенка крепится к ребру, воспринимающему срез и изгибающий момент, возникающий вследствие эксцентричного крепления стенки. Разработан после землетрясения в Нортридже	FR	C-8 (e)	
Уменьшенное сечение балки (RBS) <sup>(2)</sup>	Соединение, в котором площадь полки балки уменьшается для образования пластического шарнира. Разработан после землетрясения в Нортридже	FR	C 8 (g)	

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Тройник с двойным разрезом на болтах <sup>(2)</sup>	Разъемные тройники, прикрепленные болтами или заклепками к полкам балки и колонны	PR	C-9 (b)	
Верхний и нижний прижимные уголки	Прижимные уголки, крепящиеся на болтах или заклепках к полкам балок и колонне	PR	C-9 (a)	
	Отличается тем, что к нижней полке балки прижимной уголок крепится через композитную накладку	PR	C-9 (a)	
Торцевая пластина на болтах	Торцевая пластина, (усиленная или не усиленная ребрами жесткости), приваренная к балке и прикрепленная болтами к полке колонны	PR	C-9 (c)	
Простое сдвиговое соединение с или без <sup>(2)</sup> настила	Простое гравитационное соединение с планкой, работающей на срез, для композитного пола	PR	C-9 (d)	
Kaiser Bolted Bracket® – кронштейны на болтах	Моментное соединение SMF с кронштейнами из литой стали, прикрепленными болтами к полке колонны и приварены или присоединены болтами к обоим полкам балки	FR	C-11	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Side Plate® – боковая пластина	Моментное соединение SMF с боковыми пластинами на всю длину узла, закрепленное угловыми швами. Разработано после землетрясения в Нортридже в 1994 году	FR	C-12	
Slotted Web™ – стенка с прорезями	Моментное соединение SMF аналогичное WUF с расширенными прорезями по сварному шву, отделяющими полки балки от стенки в зоне соединения	FR	C13	

Примечание: PR = соединение с частично воспринимаемым моментом или соединение со сдвигом;

FR = соединение с полностью воспринимаемым моментом.

(1) Информация о тестировании и прогнозном анализе представлена в Karnsand Houghton 2008.

(2) Только прогнозная информация представлена в Karnsand Houghton 2008.

событиями сейсмического и прогрессирующего разрушения. Критерии сейсмического моделирования и приемлемости в ASCE 41 основаны на циклических испытаниях, в которых конец консольной балки подвергался воздействию постоянно увеличивающихся амплитуд; балки и соединения испытывают сдвиг и изгиб без осевого усилия. В условиях прогрессирующего разрушения осевое усилие развивается, когда многопролетная балка испытывает большие прогибы, и балка начинает вести себя больше как нить, чем балка.

Альтернативой изложенному методу данным нормативным документом рекомендуется во избежание развития прогрессирующего обрушения метод связей усилий.

Еще одним документом, направленным на снижение вероятности прогрессирующего разрушения в каркасах высотных зданий является «GSA Руководство по анализу и разработке альтернативных путей для устойчивости к прогрессирующему разрушению» (поз. 4 в таблице 1). Общая схема этого документа приведена на рисунке 3.

Рассматривая основные положения **BS 5950-1:2000** (издание 2008 г.: Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment No. 1) Structural use of steelwork in building. (раздел 2.4.5 Structural integrity), следует отметить:

**а) минимальные требования в части прогрессирующего обрушения**

Во всех зданиях этажи должны быть эффективно связаны вместе в уровне каждого перекрытия. Каждая колонна должна устойчиво сохранять свое положение в двух направлениях посредством горизонтальных связей, ориентированных, приблизительно, под прямыми углами, в уровне каждого этажа, поддерживаемого колоннами. Горизонтальные связи должны также устраиваться в уровне перекрытия за исключением случаев, когда стальным каркасом поддерживается покрытие, собственный вес которого не превышает  $0,7 \text{ кН/м}^2$  и которое воспринимает лишь нагрузки от собственного веса и ветра. Сплошные линии связей должны быть расположены как можно ближе к краям перекрытия или покрытия и к каждой линии колонны (рисунок 4). В входных углах ближайшие к краю

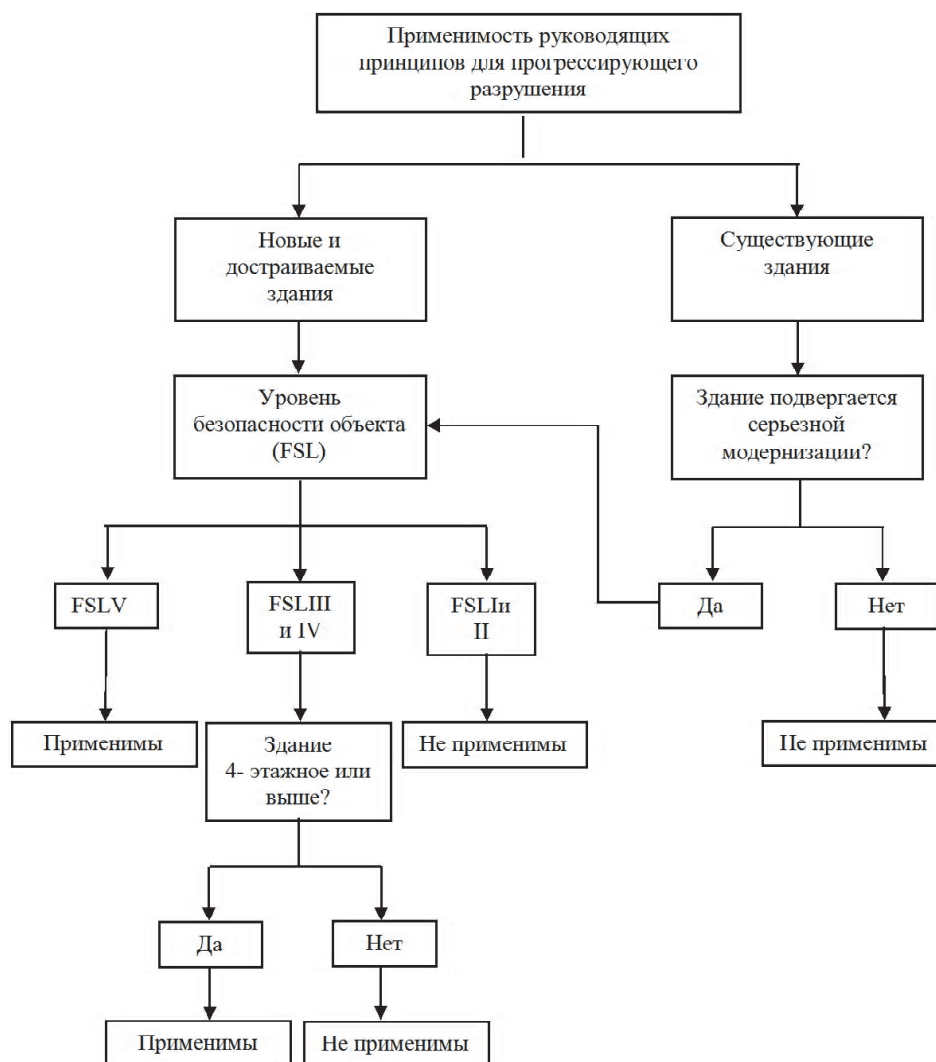


Рисунок 3. Блок-схема применимости документа.

связевые элементы должны быть закреплены в каркасе, как это показано, также на рисунке 4.

В качестве горизонтальных связей могут выступить:

- стальной элемент, а также те, которые используются для этой цели;
- арматурный стальной стержень, который крепится к стальной раме или заделанный в бетон;
- арматурная сетка в омоноличенном профилированном настиле, работающем совместно со стальными балками, где профилированный лист непосредственно связан с балками сдвигоустойчивыми соединениями.

Все горизонтальные связи и все другие элементы должны быть способны сопротивляться

факторизованной растягивающей нагрузке, которая не должна рассматриваться как дополнительная к другим нагрузкам, но не меньше 75 кН. **б) ограничение эффектов случайного смещения опор**

В случае действия правил специального проектирования определенных зданий, ограничивающих эффект случайного удаления опор, должны соблюдаться следующие условия:

- *общие связи.* Горизонтальные связи, как правило, описанные в пп. «а)», должны быть ориентированы сплошными линиями, когда это практически возможно, распределены в каждом уровне перекрытия и покрытия в двух направлениях, приблизительно под прямыми углами (рисунок 5).

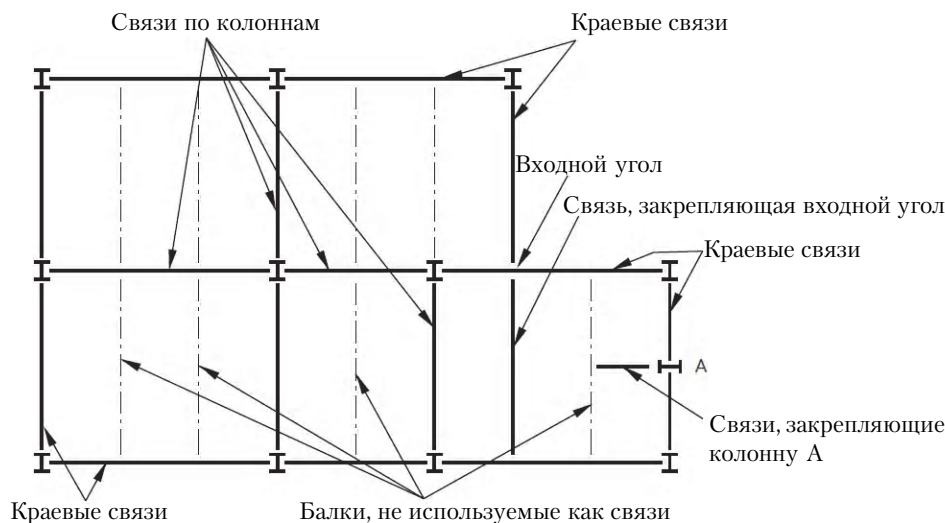


Рисунок 4. Пример связывания колонн в здании.

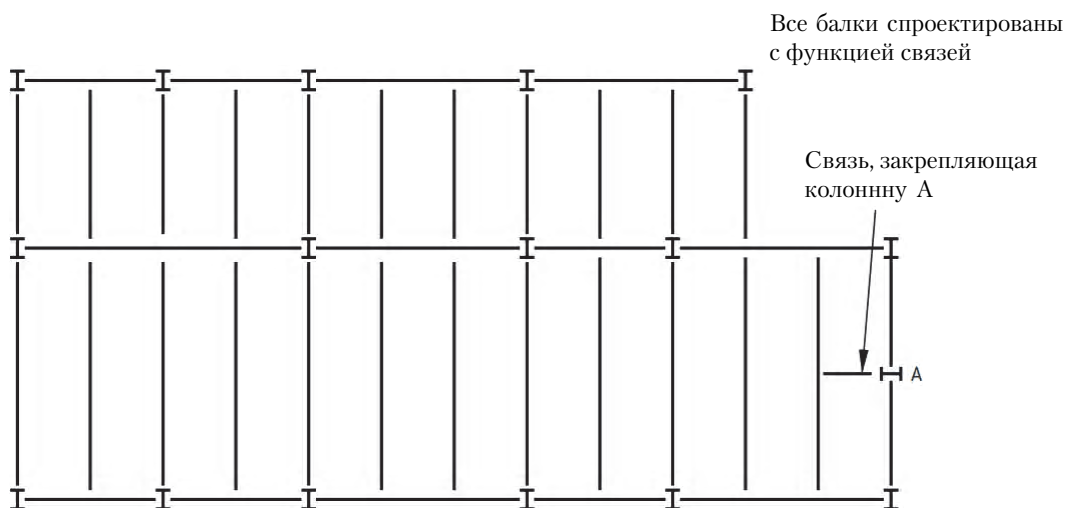


Рисунок 5. Пример общих связей в здании.

Стальные элементы, выступающие в роли горизонтальных связей, и их концевые соединения должны быть способны обеспечить несущую способность, исходя из условия восприятия факторизованных растягивающих нагрузок, которые не рассматриваются в качестве дополнительных к другим нагрузкам:

- для внешних связей:  $0,5(1,4g_k + 1,6q_k)s_tLn$ , но не менее  $75 \text{ кН}$ ;
- для крайних связей:  $0,25(1,4g_k + 1,6q_k)s_tLn$ , но не менее  $75 \text{ кН}$ ,

где  $g_k$  – указанная нагрузка собственного веса на единицу площади перекрытия или покрытия;

$L$  – пролет;

$q_k$  – указанная нагрузка на единицу площади покрытия или перекрытия;

$s_t$  – среднее поперечное расстояние между рассчитываемыми связями;

$n$  – фактор, учитывающий количество этажей в сооружении (таблица 3).

- **связи для крайних колонн.** Горизонтальные связи, закрепляющие колонны на краях перекрытия или перекрытия, должны обеспечить восприятие факторизованной растягивающей нагрузки, действующей перпендикулярно краю, равной большей из нагрузок, обозначенных в

Таблица 3. Значения фактора  $n$ 

Количество этажей	Значение фактора, $n$
5 или более	1,0
4	0,75
3	0,5
2	0,25
1	0

вышеприведенном пункте, или 1 % усилия в колонне, примыкающей к этому уровню, от максимальной вертикальной нагрузки собственного веса и нагрузки, приложенной к покрытию;

- *непрерывность колонн.* Если стальная рама непрерывна, по крайней мере, в одном направлении, то все колонны должны стыковаться с балками. Все соединения колонны должны быть способны воспринять значение растягивающей нагрузки, большее из общей факторизованной вертикальной нагрузки собственного веса, и нагрузки, приложенной к колонне в уровне перекрытия, расположенного между этим соединением колонны и следующим соединением колонны, расположенным ниже;
- *сопротивление горизонтальным силам.* Сформированные системы сопротивления горизонтальным силам должны быть распределены по зданию таким образом, чтобы в каждом из двух направлений под прямыми углами никакая существенная часть здания не была связана только в одной точке с системой противодействия горизонтальным силам;
- *тяжелые перекрытия.* Если применяются сборный железобетон или другие тяжелые перекрытия, лестницы или покрытия, они должны быть эффективно закреплены в направлении пролета, либо друг к другу, либо непосредственно за их опоры.

Если не выполняются первые три условия, здание должно быть проверено в уровне каждого этажа поочередно, чтобы гарантировать, что непропорциональное разрушение не будет вызвано условным удалением, поодиночно, каждой колонны и каждой балки, поддерживающей одну или несколько колонн. Если не соблюдается четвертое условие, проверка должна быть выполнена в уровне каждого этажа поочередно, чтобы гаран-

тировать, что непропорциональное разрушение не будет вызвано условным удалением, поодиночно, каждого элемента системы, обеспечивая сопротивление системы горизонтальным силам.

Часть здания с риском разрушения не должна превышать 15 % площади перекрытия или покрытия или 70 м<sup>2</sup> (меньшее) на соответствующем уровне и на одном непосредственно примыкающем перекрытии или покрытии, выше или ниже него. Если условное удаление колонны или элемента системы, обеспечивающего сопротивление горизонтальным силам, вызывает разрушение большей площади, колонна или элемент должны быть спроектированы как *ключевой элемент* (см. ниже).

В этих проверках для условно удаляемых элементов необходимо учитывать только треть обычной ветровой нагрузки и треть обычной приложенной нагрузки вместе с нагрузкой от собственного веса за исключением случаев зданий, используемых преимущественно для хранения, или когда приложенная нагрузка носит постоянный характер (здесь должна использоваться полная наложенная нагрузка). Должен применяться частный коэффициент надежности  $\gamma_f = 1,05$ , за исключением тех случаев, когда с учетом опрокидывания нагрузкой собственного веса, обеспечивающей восстанавливающий момент, следует умножить на частный коэффициент  $\gamma_f = 0,9$ .

#### **в) ключевые элементы**

В многоэтажном здании, которое, согласно требованиям правил, должно быть спроектировано таким образом, чтобы избежать прогрессирующего (непропорционального) обрушения, элемент, который рекомендуется в пункте в вышеприведенном разделе проектировать как ключевой, должен быть спроектирован для случайной нагрузки, указанной в BS 6399-1.

Любой другой стальной элемент или другой конструктивный элемент, который обеспечивает

боковую несмещаемость, жизненно важный для устойчивости ключевого элемента сам также, должен быть сконструирован как ключевой элемент для той же случайной нагрузки.

Дополнительная нагрузка должна прикладываться по всем горизонтальным и вертикальным направлениям одновременно, в одном направлении вместе с реакциями других компонентов здания, которые прикреплены к элементу и подвержены той же случайной нагрузке, но ограничены максимальными реакциями, которые могут быть разумно переданы, учитывая сопротивление разрушению таких компонент и их соединений.

В этой проверке эффекты обычных нагрузок должны также рассматриваться в той же степени и с тем же частным коэффициентом  $\gamma_f$ , как рекомендовано выше.

В документе **SCIP391 Structural Robustness of Steel Framed Buildings** обосновываются принципы обеспечения живучести стальных конструкций при проектировании, базирующиеся на основных принципах BSEN 1990, 2.1(5):

- избегать, уменьшать или снижать опасности, которым может подвергаться конструкция;
- выбирать конструктивную форму, которая позволяет снижать чувствительность к рассматриваемым опасностям;
- выбор конструктивной формы и методики расчета конструкции, которые могут должным образом снизить негативные последствия случайного удаления отдельного элемента или ограниченной части конструкции, или возникновения приемлемого локального повреждения;

– избегать, насколько это возможно, конструктивной схемы, которая может разрушиться внезапно;

– связывать конструктивные элементы вместе. Для большинства зданий со стальным каркасом потенциальные случайные воздействия останутся неопознанными, и поэтому подход к ограничению степени локального отказа, вероятно, будет укладываться в рамки принятой общей стратегии (рисунок 6).

В таблице 4 приведены рекомендации к обеспечению живучести для различных классов зданий. Все рекомендации разделены на две категории: рекомендации Еврокодов и рекомендации, приведенные в Приложениях к Еврокоду.

Анализируя научную литературу в этом направлении также можно отметить ряд интересных работ, которые ориентированы на решение следующих задач:

- разработана классификация видов прогрессирующего обрушения и рекомендации по алгоритму соответствующего расчета (работы В. О. Алмазова);
- предложены конструктивные решения, направленные на снижение возможности развития прогрессирующего обрушения (работы В. И. Травуша, В. И. Плетнева, И. М. Дьякова, Е. В. Домаровой и др.);

Примечание: Примером может служить устройство аутригερных этажей для повышения эффективности сопротивления прогрессирующему обрушению зданий московского «Сити», в которых 5–10-этажные рамные блоки располагаются над связевым этажом.

- прогнозирование наиболее вероятных аварийных ситуаций и их последствий (работы

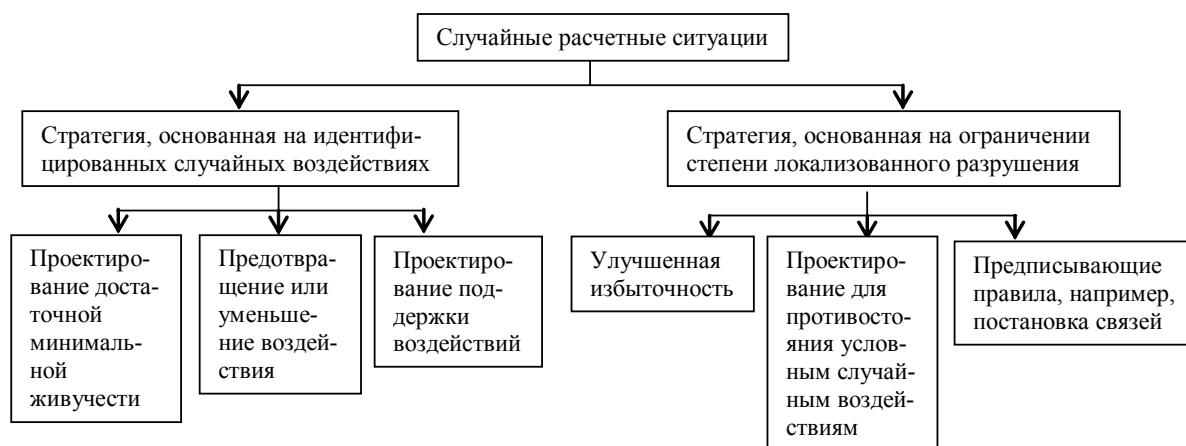


Рисунок 6. Стратегии для случайных расчетных ситуаций.

Таблица 4. Результирующие рекомендации к обеспечению живучести

Рекомендации к обеспечению живучести	Класс здания					
	1	2а	2b Т	2b NR	2b KE	3
<b>Еврокод</b>						
Нет дополнительных требований, если спроектировано по BSEN 1993	▪					
Обеспечить горизонтальными связями		▪	▪			
Обеспечить вертикальными связями			▪			
Метод условного удаления				▪		
Метод ключевого элемента					▪	
Систематическая оценка риска						▪
<b>Рекомендуемые дополнительно</b>						
Минимальное горизонтальное сопротивление растяжению $75 \text{ кН}$ для соединения балки с колонной	▪					
Несущие детали перекрытий, покрытий, лестничных маршей должны соответствовать BSEN 1992 и позволять допуски		▪	▪	▪	▪	▪
Несколько опорных систем			▪	▪	▪	▪
Раскрепление тяжелого покрытия / перекрытия / лестниц			▪	▪	▪	▪
Применение правил для класса 2b как минимум						▪

Примечания: 2b Т – метод связей; 2b NR – метод условного удаления; 2b KE – метод ключевого элемента

А. Е. Сурягина, К. И. Ерёмкина, J. L. Liu, Y. Bao, S. K. Kunnath, M. Post Madine и др.);

– обоснование использования численных методов к возможности анализа склонности конструкций к прогрессирующему обрушению (работы Xianzhong Zhaoa, Yang Ding, Amir Hossein Arshian, Feng Miaoa, Michel Ghosn, Akbar Pirmoz, X. S. Chenga, Peiqi Rena, Yi Lia, Xinzheng Lub, Hong Guanc, Yulong Zhou, Chang Hong Chena, S. Gerasimidisa, J. Sideri и др.). В этом перечне особо следует отметить работу [Uwe Starossek\* and Marco Haberland], в которой авторами предлагается формулировка основ для разработки мер по количественной оценке надежности конструкций. Предлагаются основные определения и обсуждаются требования к мерам надежности, границы их применения, разработанные авторами формулировки показателей надежности на основе:

а) жесткости

$$R_s = \min_j \frac{\det K_j}{\det K_o}, \quad (2)$$

где  $R_s$  – мера надежности, основанная на критерии жесткости,

$K_j$  и  $K_o$  – матрицы жесткости неповрежденной конструкции и конструкции после удаления структурного элемента или соединения  $j$ , соответственно;

б) повреждений

$$R_d = 1 - \frac{p}{p_{lim}}, \quad (3)$$

где  $R_d$  – мера надежности, основанная на критерии повреждения,

$p$  – максимальное общее повреждение от предполагаемого начального повреждения  $i_{lim}$ ,  
 $p_{lim}$  – приемлемое общее повреждение.

Примечание:  $p$  и  $p_{lim}$  следует рассматривать как следствие первоначального повреждения  $i_{lim}$ . Количественная оценка ущерба, требуемого здесь, может быть выполнена с учетом затронутых масс, объемов, площадей помещений (в зданиях) или даже связанных с этим затрат.

или

$$R_{d,int} = 1 - 2 \int_0^1 [d(i) - i] di, \quad (4)$$

где  $R_{d,int}$  – это интегральная мера надежности, основанная на учете повреждения,

$d(i)$  – максимальное общее повреждение, являющееся результатом и включающее в себя начальное повреждение.



Примечание:  $d(i)$  и  $i$  – безразмерные переменные, полученные путем деления соответствующего эталонного значения (масса, объем, площадь помещения или стоимость) на соответствующую стоимость неповрежденной конструкции.

в) энергии

$$R_e = \max_j \frac{E_{r,j}}{E_{f,k}}, \quad (5)$$

где  $R_e$  – энергетическая мера надежности,

$E_{r,j}$  – энергия, выделяющаяся при начальном отказе структурного элемента  $j$  и способствующая повреждению впоследствии затронутого структурного элемента  $k$ ;

$E_{f,k}$  – энергия, необходимая для выхода из строя впоследствии затронутого структурного элемента  $k$ .

А вероятность прогрессирующего обрушения в результате аномального события предлагается определять с классических позиций теории надежности, использующих упрощенное определение вероятности отказа в виде произведений отдельных вероятностей [34]

$$P(C) = P(C|D) \cdot P(D|E) \cdot P(E), \quad (6)$$

где  $P(E)$  – вероятность наступления аномального события  $E$ , которое угрожает сооружению (регулируется контролем наступления события);

$P(D|E)$  – условная вероятность местного повреждения  $D$  в результате аномального события  $E$  (локальная характеристика, описывает поведение элемента системы, регулируемая устройством соответствующей защиты или изменением локальной несущей способности);

$P(C|D)$  – условная вероятность разрушения  $C$  сооружения в результате местного повреж-

дения  $D$  (глобальная характеристика, описывает общее поведение системы и обуславливает ее надежность).

Используя (6), можно определить различные стратегии для ограничения вероятности наступления прогрессирующего обрушения, направленные на уменьшение значений частных вероятностей (рисунок 7):

- **предотвратить возникновение аномальных событий** (эта стратегия направлена на снижение вероятности возникновения аномальных событий за счет управления событиями, то есть  $P(E)$ );
- **предотвратить возникновение локального значительного разрушения конструкции в результате возникновения аномальных событий** (эта стратегия направлена на управление поведением (локального) элемента, и ее цель состоит в том, чтобы снизить вероятность локального значительного разрушения конструкции после заданных аномальных событий, то есть  $P(D|E)$ ). В этом случае конструкция должна обладать достаточной защитой или локальным сопротивлением, чтобы противостоять определенным аномальным явлениям без каких-либо повреждений);
- **предотвратить обрушение структурной системы в случае значительного местного разрушения конструкции** (эта стратегия направлена на управление (глобальным) поведением системы, и ее цель – снизить вероятность обрушения системы после наступления локального отказа, то есть  $P(C|D)$ ). При этом конструктивная система должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить эффективные меры по ограничению

Проектная стратегия	Предотвращение прогрессирующего обрушения		Предотвращение начала обрушения			
	Влияние поведения системы в целом		Влияние поведения отдельного элемента	Влияние аномальных событий		
$P(C)$	=	$P(C D)$	·	$P(D E)$	·	$P(E)$
<b>Сопротивление разрушению</b>	}	<b>Надежность</b>	}	<b>Локальное сопротивление или защита</b>	}	<b>Контроль события</b>

Рисунок 7. Стратегии предотвращения наступления прогрессирующего обрушения.

распространения разрушения конструкции в результате начального местного разрушения, то есть обладать свойством, называемым структурной надежностью).

На решение этой же проблемы направлены научные исследования, в которых проблема живучести конструкций (а предотвращение прогрессирующего разрушения тесно увязывается с этим качеством) анализируется несколько под другим углом.

Так, в работе [31] авторами, в качестве дополнения к понятию живучести конструкции, и вообще к характерному набору параметров надежности, предлагается ввести еще одну оценку резерва несущей способности конструкции, а именно, **мобилизованность** – своеобразная временная характеристика, показывающая, насколько система готова и способна среагировать на локальное во времени (импульсное) неожиданное возмущение, и определяемая в первом приближении как

$$\mu = \gamma(T_\gamma / T_s), \quad (7)$$

где  $T_s$  – расчетный срок эксплуатации сооружения,

$\gamma$  – индекс надежности (т. е., число стандартов, отделяющих среднее значение нагрузки от ее расчетного значения),

$T_\gamma$  – промежуток времени между выбросами нагрузочного процесса за уровень расчетного значения.

Для нормального случайного процесса величина  $T_\gamma$  определится выражением

$$T_\gamma = \frac{1}{\omega_+ (\gamma)} = \frac{2\pi}{\omega_{ef}} \cdot \exp \frac{\gamma^2}{2}, \quad (8)$$

а показатель мобилизованности, в этом случае

$$\mu = \frac{2\pi\gamma}{\omega_{ef} T_s} \cdot \exp \frac{\gamma^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\omega_{ef}$  – средняя частота пересечения среднего уровня нагрузки  $\bar{q}$  (1/с или 1/ч в зависимости от вида нагрузки), определяемая для случая нормального распределения, как  $\omega_{ef} = 2\pi\sqrt{\dot{q}/\bar{q}}$  (где  $\dot{q}$  и  $\bar{q}$  – дисперсия скорости процесса и дисперсия его координат).

Следует отметить, что в настоящее время во многих программных комплексах есть встроенные модули расчета на прогрессирующее обрушение (в том числе и в широко используемых в

нашей стране SCAD и Лира), но авторам неизвестны какие-либо работы по экспериментальной проверке результатов анализа проектных решений с использованием этих разработок. Замечание, представленное в работе [5], о том, что «...компьютерный расчет модели на лавинообразное разрушение осложнен невозможностью использования метода конечных элементов ввиду отсутствия точных данных о поведении конструкции при прогрессирующем обрушении и достаточного опыта построения структурных комплексных моделей и интерпретации результатов вычислений», на наш взгляд, излишне категорично, так как зачастую гипотезы и упрощения, используемые в аналитических методах расчета, имеют более существенные огрубления, чем приближенные методы строительной механики, к которым мы относим конечно-элементный анализ (на это также указывают исследования многих авторов, перечисленные выше). В связи с этим в нижеприведенных разделах предлагается авторский подход к решению обозначенных актуальных задач, базирующийся на комплексном использовании подходов конечно-элементного анализа и вероятностно-статистической оценки проектных решений на склонность к прогрессирующему обрушению.

В дополнение к проведенному обзору следует также отметить обширный список литературы по данному вопросу, приведенный в работе [5].

## Выводы

Вместе с тем, по-прежнему актуальными остаются следующие направления исследований:

- разработка методик или рекомендуемых алгоритмов расчета конструкций на прогрессирующее обрушение, конкретных рекомендаций по выбору зоны аварий;
- выбор набора и количества элементов, разрушение которых предшествует началу процесса прогрессирующего (лавинообразного) разрушения, и представление динамики разрушения здания (сооружения) с моделированием развития процессов обрушения и соответствующего изменения нагрузок и воздействий во времени;
- исследования по прогрессирующему разрушению для конструкций со стальным каркасом (к настоящему времени преобладают

исследования для конструкций, выполненных в железобетоне);  
– отсутствие (по крайней мере, в нормативной литературе) указаний по проведению расче-

тов напряженно-деформированного состояния анализируемой конструктивной схемы с учетом геометрической, физической и конструктивной нелинейности.

## Литература

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения = Reliability for constructions and foundations. General principles : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с. – Текст : непосредственный.
2. EN 1990:2002+A1. Eurocode. Basis of structural design. Supersedes ENV 1991-1:1994; This European Standard was approved by CEN on 29 November 2001. – Brussels : CEN, 2005. – 116 p. – Текст : непосредственный.
3. Уточненные методы расчета и проектирования инженерных сооружений / В. Ф. Мушанов, А. Н. Оржеховский, А. В. Зубенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 2. – С. 101–115. – doi: 10.18720/MCE.78.8.
4. Оржеховский, А. Н. Особенности напряженно-деформированного состояния и надежность проектируемых и эксплуатируемых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Оржеховский Анатолий Николаевич ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка, 2017. – 144 с. – Текст : непосредственный.
5. Лепешкина, Д. О. Прогрессирующее обрушение зданий и сооружений / Д. О. Лепешкина. – Текст : электронный // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : электронный сборник статей по материалам LXI международной студуденческой научно-практической конференции (10–20 декабря 2018 г.). – Новосибирск : Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2018. – № 1(60). – С. 19–36. – URL: [https://sibac.info/archive/technic/1\(60\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/1(60).pdf) (дата обращения: 10.04.2022).
6. UFC 4-023-03. Desesign of Buildings to Resist Progressive Collapse, with Change 3. Series 4: Multidisciplinary and facility-specific design / U.S. Army corps of engineers. – Virginia : United States Department of Defense, 2016. – 245 p. – Текст : непосредственный.
7. GSA. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance / Office of Design

## References

1. GOST 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. – Moscow : Standartinform, 2015. – 14 p. – Text : direct. (in Russian)
2. EN 1990:2002+A1. Eurocode. Basis of structural design. – Brussels : CEN, 2005. – 116 p. – Text : direct. (in English)
3. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskii, A. N.; Zubenko A. V. [et. al.]. Refined methods for calculating and designing engineering structures. – Text : direct. – In: *Engineering and construction magazine*. – 2018. – № 2. – P. 101–115. – doi: 10.18720/MCE.78.8. (in Russian)
4. Orzhekhovskii, A. N. Features of the stress-strain state and reliability of designed and operated frame-cantilever coatings over the stands of stadiums : Thesis of Ph. D. in Engineering ; Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – Makeevka, 2017. – 144 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Lepeshkina, D. O. Progressive collapse of buildings and structures. – Text : electronic. – In: *Scientific community of students of the XXI century. Engineering sciences : electronic collection of articles based on the materials of the LXI international student scientific and practical conference*. – Novosibirsk : Association of Researchers «Siberian Academic Book», 2018. – № 1(60). – P. 19–36. – URL: [https://sibac.info/archive/technic/1\(60\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/1(60).pdf) (date of the application: 10.04.2022). (in Russian)
6. UFC 4-023-03. Desesign of Buildings to Resist Progressive Collapse, with Change 3. Series 4: Multidisciplinary and facility-specific design / U.S. Army corps of engineers. – Virginia : United States Department of Defense, 2016. – 245 p. – Text : direct. (in English)
7. GSA. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance / Office of Design and Construction. – Washington : [S. n.], 2016. – 203 p. – Text : direct. (in English)
8. SP 267.1325800.2016. High rise buildings and complexes. Design rules. – Moscow : Standartinform, 2017. – 102 p. – Text : direct. (in Russian)
9. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic. – Moscow : Standartinform, 2018. – 24 p. – Text : direct. (in Russian)
10. DBN V.2.2-24-2009. Design of high-rise residential and public buildings. Buildings and structures: Appendix E. Methodology for calculating a high-rise building for resistance to progressive collapse. – Kyiv : Ministry of Regional Development and

- and Construction. – Washington : [S. n.], 2016. – 203 p. – Текст : непосредственный.
8. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования = High rise buildings and complexes. Design rules : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1032/пр : введен впервые : дата введения 2017-07-01 / разработан Акционерное общество «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования жилых и общественных зданий». – Москва : Стандартинформ, 2017. – 102 с. – Текст : непосредственный.
  9. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения = Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июля 2018 г. № 393/пр : введен впервые : дата введения 2019-06-01 / разработан Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЮЗГУ»), Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Закрытое акционерное общество «Городской проектный институт жилых и общественных зданий» (ЗАО «ГОРПРОЕКТ») [и др.]. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 24 с. – Текст : непосредственный.
  10. ДБН В.2.2-24-2009. Проектирование высотных жилых и общественных зданий. Здания и сооружения : Приложение Е. Методика расчета высотного здания на сопротивление к прогрессирующему обрушению : государственные строительные нормы Украины : утвержден и введен в действие Приказом Минрегионстроя Украины от 12 февраля 2009 г. № 67 : введен впервые : дата введения 2009-09-01 / разработан научно-исследовательским институтом строительного производства. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2009. – 105 с. – Текст : непосредственный.
  11. Chapter 18. Resistance to Progressive Collapse under Extreme Local Loads // Rules and Regulations of the Building Code of the City of New York / New York State Department of State. – Binghamton : Gould Publication, 2001. – 5 p. – Текст : непосредственный.
  12. BS 5950-1:2000. Structural use of steelwork in building (Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment № 1): 2.4.5 Structural integrity / British Constructional Steelwork Association, Building Research Establishment Ltd, Cold Rolled Sections Association [et. al.]. – London : British Standards Institution, 2008. – 224 p. – Текст : direct. (in English)
  13. Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse / Department for Communities and Local Government. – London : Queen's Printer and Controller of Her Majesty's Stationery Office, 2011. – 200 p. – Текст : direct. (in English)
  14. Way, A. Structural Robustness of Steel Framed Buildings. – UK, Berkshire : SCI, 2011. – 132 p. – Текст : direct. (in English)
  15. Khog, E.; Choi, K.; Komkov, V. ; translation from English by S. Yu. Ivanova, A. D. Larichev. Sensitivity Analysis in Structural Design. – Moscow : Mir, 1988. – 428 p. – Текст : direct. (in Russian)
  16. Russian Federation. Laws. Technical regulation on the safety of buildings and structures : Federal Law № 384-FZ. – St. Petersburg : Codex, 2009. – 24 p. – Текст : direct. (in Russian)
  17. SNiP RF Reliability of building structures and foundations. Fundamentals : project. – Moscow : [S. n.], 2006. – 28 p. – Текст : direct. (in Russian)
  18. VNiP MGSN 4.19-2005. Temporary norms and rules for the design of multifunctional high-rise buildings and building complexes in the city of Moscow. – Moscow : GUP NIATS, 2005. – 140 p. – Текст : direct. (in Russian)
  19. Designing measures to protect buildings and structures from progressive collapse : manual / JSC TsNIIPromzdaniy, FAU Federal Center for Regulation, Standardization and Conformity Assessment in Construction, CJSC Gorproekt [et. al.]. – Moscow : [S. n.], 2018. – 158 p. – Текст : direct. (in Russian)
  20. Ledenev, V. V. High-Rise Buildings : tutorial. – Tambov : TSTU, 2014. – 277 p. – Текст : direct. (in Russian)
  21. Raizer, V. D. To the problem of survivability of buildings and structures. – Текст : direct. – In: *Structural mechanics and calculation of structures*. – 2012. – № 5. – P. 77–78. (in Russian)
  22. KrasnoShchekov, Yu. V. Scientific basis for research on the interaction of elements of reinforced concrete structures. – Omsk : SSARU, 1997. – 276 p. – Текст : direct. (in Russian)
  23. Series 1.020-1/87. Frame structures of interspecific application for multi-storey buildings / Central Construction of Ukraine, 2009. – 105 p. – Текст : direct. (in Russian)

- Standards Institution, 2008. – 224 p. – Текст : непосредственный.
13. Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse / Department for Communities and Local Government. – London : Queen's Printer and Controller of Her Majesty's Stationery Office, 2011. – 200 p. – Текст : непосредственный.
  14. Way, A. Structural Robustness of Steel Framed Buildings / A. Way. – UK, Berkshire : SCI, 2011. – 132 p. – Текст : непосредственный.
  15. Хог, Э. Анализ чувствительности при проектировании конструкций / Э. Хог, К. Чой, В. Комков ; перевод с английского С. Ю. Ивановой, А. Д. Ларищева. – Москва : Мир, 1988. – 428 с. – Текст : непосредственный.
  16. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный Закон № 384-ФЗ : [принят Государственной думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года]. – Санкт-Петербург : Кодекс, 2009. – 24 с. – Текст : непосредственный.
  17. СНиП РФ. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : проект. – Москва : [Б. и.], 2006. – 28 с. – Текст : непосредственный.
  18. ВНИИ МГСН 4.19-2005. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Правительства Москвы от 28 декабря 2005 г. № 1058-ПП : введен впервые : дата введения 2006-02-11 / разработаны ОАО ЦНИИЭП жилища (головная организация), ФГУ ВНИИПО МЧС России, ВАН КБ [и др.]. – Москва : ГУП НИИАЦ, 2005. – 140 с. – Текст : непосредственный.
  19. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения : методическое пособие / АО ЦНИИПромзданий, ФАУ Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, ЗАО Горпроект [и др.]. – Москва : [Б. и.], 2018. – 158 с. – Текст : непосредственный.
  20. Леденев, В. В. Высотные здания : учебное пособие / В. В. Леденев. – Тамбов : ТГТУ, 2014. – 277 с. – Текст : непосредственный.
  21. Райзер, В. Д. К проблеме живучести зданий и сооружений / В. Д. Райзер. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 5. – С. 77–78.
  22. Краснощеков, Ю. В. Научные основы исследований взаимодействия элементов железобетонных конструкций / Ю. В. Краснощеков. – Омск : СибАДИ, 1997. – 276 с. – Текст : непосредственный.
  23. Серия 1.020-1/87. Конструкции каркаса межведомственного применения для многоэтажных зданий / ЦНИИПромзданий. – Москва : ЦНИИПромзданий, 1990. – 20 с. – Текст : непосредственный.
  - Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures. – Moscow : Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures, 1990. – 20 p. – Text : direct. (in Russian)
  24. Perelmuter, A. V. Selected problems of reliability and safety of building structures. – Moscow : ACU, 2007. – 256 p. – Text : direct. (in Russian)
  25. Kudishin, Yu. I.; Drobot, D. Yu. To the question of the survivability of building structures. – Text : direct. – In: *Structural mechanics and calculation of structures*. – 2008. – № 2. – P. 36–43. (in Russian)
  26. Sventikov, A. A. Evaluation of the progressive destruction of spatial hanging rod coatings. – Text : direct. – In: *Structural mechanics and calculation of structures*. – 2010. – № 5. – P. 34–38. (in Russian)
  27. Raizer, V. D. Theory of Structures Reliability. – Moscow : ACU, 2010. – 384 p. – Text : direct. (in Russian)
  28. Nazarov, Yu. P. To the problem of ensuring the survivability of building structures under emergency impacts. – Text : direct. – In: *Structural mechanics and calculation of structures*. – 2009. – № 4. – P. 5–9. (in Russian)
  29. Tikhonov, I. N.; Kozelkov, M. M. Calculation and design of reinforced concrete monolithic floors of buildings, taking into account protection against progressive collapse. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced concrete*. – 2009. – № 3. – P. 2–8. (in Russian)
  30. Starossek, U.; Haberland, M. Robustness of structures. – Text : direct. – In: *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*. – 2012. – № 1. – P. 3–21. (in English)
  31. Perelmuter, A. V.; Pichugin, S. F. On assessing the vulnerability of building structures. – Text : direct. – In: *Magazine of Civil Engineering*. – 2014. – № 5. – P. 5–15. – doi: 10.5862/MCE.49.1. (in Russian)
  32. Starossek, Uwe; Haberland, Marco. Approaches to measures of structural robustness. – Text : direct. – In: *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2011. – Volume 7, № 7. – P. 625–631. – DOI: 10.1080/15732479.2010.501562. (in English)
  33. Haberland, Marco; Starossek, Uwe. Progressive Collapse Nomenclature. – Text : direct. – In: *Structures*. – 2009. – Volume 1. – P. 1886–1895. (in English)
  34. NISTIR 7396. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings / National Institute of Standards and Technology (NIST). – USA : Department of Commerce, 2007. – 126 p. – Text : direct. (in English)
  35. ASCE SEI/ASCE 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures / Structural Engineering Institute. – Washington : American Society of Civil Engineers, 2005. – 408 p. – Text : direct. (in English)
  36. Agarwal, J.; England, J. Recent developments in robustness and relation with risk. – Text : direct. – In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. – 2008. – Volume 161, Issue 4. – P. 183–188. (in English)

24. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А. В. Перельмутер. – Москва : АСВ, 2007. – 256 с. – Текст : непосредственный.
25. Кудишин, Ю. И. К вопросу о живучести строительных конструкций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 2. – С. 36–43.
26. Свентиков, А. А. Оценка прогрессирующего разрушения пространственных висячих стержневых покрытий / А. А. Свентиков. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 5. – С. 34–38.
27. Райзер, В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2010. – 384 с. – Текст : непосредственный.
28. Назаров, Ю. П. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / Ю. П. Назаров. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4. – С. 5–9.
29. Тихонов, И. Н. Расчет и конструирование железобетонных монолитных перекрытий зданий с учетом защиты от прогрессирующего обрушения / И. Н. Тихонов, М. М. Козелков. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 2009. – № 3. – С. 2–8.
30. Starossek, U. Robustness of structures / U. Starossek, M. Haberland. – Текст : непосредственный // International Journal of Lifecycle Performance Engineering. – 2012. – № 1. – P. 3–21.
31. Перельмутер, А. В. Об оценке уязвимости строительных конструкций / А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering. – 2014. – № 5. – С. 5–15. – doi: 10.5862/MCE.49.1.
32. Starossek, Uwe. Approaches to measures of structural robustness / Uwe Starossek, Marco Haberland. – Текст : непосредственный // Structure and Infrastructure Engineering. – 2011. – Volume 7, № 7. – P. 625–631. – DOI: 10.1080/15732479.2010.501562.
33. Haberland, Marco. Progressive Collapse Nomenclature / Marco Haberland, Uwe Starossek. – Текст : непосредственный // Structures. – 2009. – Volume 1. – P. 1886–1895.
34. NISTIR 7396. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings / National Institute of Standards and Technology (NIST). – USA : Department of Commerce, 2007. – 126 p. – Текст : непосредственный.
35. ASCE SEI/ASCE 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures / Structural Engineering Institute. – Washington : American Society of Civil Engineers, 2005. – 408 p. – Текст : непосредственный.
36. Agarwal, J. Recent developments in robustness and relation with risk / J. Agarwal, J. England. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. – 2008. – Volume 161, Issue 4. – P. 183–188.
37. Canisius, T. D. G.; Sorensen, J. D.; Baker, J. D. Robustness of structural system. – A new focus for the Joint Committee on Structural Safety (JCSS). – Text : direct. – In: *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering : Proceedings of the 10th International Conference*. – Tokyo : CRC Press, 2007. – 632 p. (in English)
38. Gross, J. L.; McGuire, W. Analysis for Progressive Collapse Resistant Design. – Text : direct. – In: *Journal of Structural Engineering, ASCE*. – 1983. – Volume 109, № 1. – P. 1–15. (in English)
39. SP 16.13330.2017. Steel structures. – Moscow : Rosstandart, 2017. – 139 p. – Text : direct. (in Russian)
40. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Accidental actions. – Moscow : Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation, 2017. – 28 p. – Text : direct. (in Russian)

37. Canisius, T. D. G. Robustness of structural system. – A new focus for the Joint Committee on Structural Safety (JCSS) / T. D. G. Canisius, J. D. Sorensen, J. D. Baker. – Текст : непосредственный // Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering : Proceedings of the 10th International Conference (31 July–3 August, 2007). – Tokyo: CRC Press, 2007. – 632 p.
38. Gross, J. L. Analysis for Progressive Collapse Resistant Design / J. L. Gross, W. McGuire. – Текст : непосредственный // Journal of Structural Engineering, ASCE. – 1983. – Volume 109, №. 1. – P. 1–15.
39. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции = Steel structures : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : актуализированная редакция СНиП II-23-81\* : дата введения 2017-08-28 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва : Росстандарт, 2017. – 139 с. – Текст : непосредственный.
40. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия = Buildings and structures. Accidental actions : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 августа 2017 г. № 1105/пр : введен впервые : дата введения 2018-02-04 / разработан АО «НИЦ «Строительство». – Москва : Минстрой России, 2017. – 28 с. – Текст : непосредственный.

**Мушанов Владимир Филиппович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики; проректор по научной работе ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Заслуженный строитель ДНР. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Мушанов Володимир Пилипович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки; проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Заслужений будівельник ДНР. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Mushchanov Vladimir** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Honored Builder of the DPR. Scientific interests: the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.