

*В последние годы в обществе значительно возросло чувство риска, а также интерес к пониманию его источников, анализу и разработке способов его снижения. Необходимо отметить, что это касается как риска в общем смысле, так и специфических рисков, связанных с техникой, в том числе со строительством. При этом следует различать риски, связанные непосредственно со строительным процессом, и риски, связанные напрямую с безопасностью и надежностью строительных конструкций.*

*В соответствии с классическими представлениями риск – двухэлементная комбинация вероятности и последствий наступления нежелательного события. Оценка риска является в значительной мере субъективной, особенно в общественном восприятии. В некоторых случаях объективно невысокие риски вызывают истерические реакции в обществе, в то время как очень высокие – повсеместно игнорируемые. Поэтому минимизация рисков является общественным приоритетом, а обеспечение надежности конструкции – основной инженерной задачей.*

УДК 624.012

## ОЦЕНКА РИСКОВ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ

*д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР*  
(Брестский государственный технический университет)

*Представлены результаты анализа нормативных документов различных стран, определяющих основные стратегии защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения. Приведены определения терминов, классификация типов прогрессирующего обрушения, классификация зданий. Стратегии, направленные на защиту конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, как показал анализ, в основном концентрируются на ограничении или снижении до приемлемого уровня угроз, обеспечении прочности ключевых элементов системы и ограничении масштабов результирующего обрушения или обеспечении живучести модифицированной конструктивной системы с удаленными элементами.*

**Введение.** Обеспечение надежности конструкции или конструктивной системы является основной задачей инженеров, а минимизация рисков является общественным приоритетом. В действующих (актуальных) строительных нормах, применяемых в практике проектирования, понятие и количественная мера риска не прописаны в явном виде, но опосредованно обеспечение некоторого допустимого (или приемлемого) уровня риска заключено в базовом требовании практически всех норм: «конструкции следует проектировать и изготавливать так, чтобы они в пределах назначенного срока службы (периода эксплуатации) с необходимым уровнем надежности и без чрезмерных эксплуатационных расходов воспринимали все приложенные к ним нагрузки и воздействия...».

Следуя приведенной формулировке, риск становится трехэлементной комбинацией вероятности, стоимости и периода эксплуатации, а выполнение соответствующих условий равнозначно решению задачи многокритериальной оптимизации. Количественный анализ, а далее и оптимизация риска связаны с необходимостью квантификации параметров, проектных (расчетных) переменных, ограничений и критериев оптимизации. Теоретическая основа для решения подобных задач изложена в работах [1, 2].

При расчете рисков, связанных с обрушением конструктивной системы, в частности при действии особых (анормальных) воздействий, наиболее сложной во всех отношениях является стоимостная оценка жизни и здоровья людей, подвергающихся потенциальным угрозам, которая часто отождествляется с ценой, которую общество конкретной страны склонно заплатить за обеспечение безопасности и охрану жизни среднестатистического обывателя.

Как показывает анализ публикаций [3 – 5], в расчетах такого типа в общем случае учитывается достаточно много параметров: экономических, социальных, определяющих качество жизни. К сожалению, необходимые для практических расчетов численные данные в ряде случаев неточные и кроме того они быстро становятся неактуальными (дезактуализируются).

Следует отметить, что методы качественного и количественного анализа рисков являются предметом интенсивных исследований. Среди этих методов при современном состоянии информационной базы наиболее приемлемым, на наш взгляд, является метод построения диаграмм риска, на которых выделяют области допустимого риска, установленные как с учетом последствий обрушения, так и стоимости контрмер, обеспечивающих защиту системы. Диаграммы риска рассчитывают, опираясь на положения теории размытых множеств [6, 7]. Пользуясь размытыми величинами, позволяющими принимать во внимание лингвистические переменные, а также формулируя рекомендации и ограничения посредством обычных лингвистических (языковых) оборотов, можно объединить процессы анализа риска и надежности конструкций.

Назначение допустимого уровня риска, равно как и допустимой вероятности разрушения конструкции, является по-прежнему открытым вопросом, несмотря на обширные исследования, выполняемые в данной области. Это обусловлено в первую очередь тем обстоятельством, что оценки рисков при обрушении ответственных объектов составляют, как правило, комбинацию «очень низкая вероятность/очень высокая стоимость». При этом следует помнить, что наиболее реалистичным методом калибровки допустимой вероятности является строительная практика.

Анализ и калибровка риска обладают преимуществами – допускают или делают возможным учет нескольких критериев, а также синергетических учетных параметров и переменных.

Расчет рисков прогрессирующего обрушения рассматривается при определенном перечне угроз, включающем в общем случае:

- 1) аномальные/особые воздействия (природные или искусственные);
- 2) ошибки при проектировании и возведении;
- 3) нарушения в эксплуатации объекта.

Общая стратегия ограничения опасности (риска) развития прогрессирующего обрушения конструктивной системы должна содержать такие этапы, как:

- 1) оценка риска и вероятностная формулировка конструктивных критериев (например, допускаемая вероятность разрушения конструктивного элемента);
- 2) характеристика аномальных воздействий;
- 3) выработка стратегии ограничения угроз от особых воздействий;
- 4) внедрение в профессиональную практику.

Как видно из описания общей стратегии ограничения опасности прогрессирующего обрушения конструктивной системы, первым и одним из основных элементов стратегии является оценка риска и, соответственно, вероятностная формулировка конструктивных критериев.

**1. К определению термина «прогрессирующее обрушение».** *Прогрессирующее обрушение* (англ. *Progressive Collapse*) является относительно новым термином в теории конструкций и имеет ряд определений, содержащихся в научно-технической литературе [6, 8 – 11, 12 – 17, 18 – 21].

При рассмотрении исторической ретроспективы выясняется, что основные публикации, в которых впервые появляется термин «прогрессирующее обрушение» фокусируются на аварии 22-этажного крупнопанельного жилого здания Ronan Point Tower (Canning Town, London, UK), произошедшей в мае 1968 года, после ввода его в эксплуатацию. Причиной аварии, которая привела к прогрессирующему обрушению жилого здания, явился взрыв природного газа в кухне, расположенной на 18-м этаже. По результатам работы комиссии был опубликован заключительный отчет [18], рекомендации которого, направленные на предотвращение прогрессирующего обрушения, были включены в нормы проектирования многих стран [8 – 11, 12 – 17, 22 – 24, 26 – 29], включая МГСН 4.19-05 [11] и Рекомендации [8 – 10, 22], утвержденные Москомархитектуры Правительства Москвы.

В таблице 1 представлены наиболее распространенные определения термина «прогрессирующее обрушение», включенные в нормативные документы различных стран.

Главным признаком прогрессирующего обрушения, что видно из таблицы, принято считать непропорционально большие масштабы окончательного повреждения здания и соответственно ущерба по отношению к локальному повреждению (разрушению) отдельного конструктивного элемента (или группы конструктивных элементов), инициировавших цепную реакцию обрушения.

Следует отметить, что у такого подхода существуют как сторонники, так и противники, отстаивающие, главным образом, вопросы терминологии.

Принимая во внимание то обстоятельство, что любое разрушение является в определенной степени «прогрессирующим», в работах некоторых авторов и нормативных документах предпочитают либо использовать термин «непропорциональное обрушение», либо вообще не акцентировать внимание на этом термине. Так, например, в европейской практике нормирования отсутствует документ, регламентирующий расчет конструктивных систем на прогрессирующее обрушение, но вместе с тем этот феномен

учитывается в EN 1991-1-7: General Actions – Accidental Actions [30] в рамках проверки *живучести* конструктивной системы в особой расчетной ситуации.

Таблица 1

Некоторые наиболее распространенные определения термина «прогрессирующее обрушение»

Страна	Нормативный документ	Определение
США	ASCE/SEI7-05 [23]	Прогрессирующее обрушение (progressive collapse) – распространение начального локального разрушения от элемента к элементу конструктивной системы, в результате чего происходит обрушение всего здания (сооружения) или непропорционально большой его части
	NIST Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Building	Распространение локального разрушения (повреждения), вызванного иницирующим событием от элемента к элементу конструктивной системы, в результате чего происходит обрушение всего здания или непропорционально большой его части; также известно как непропорциональное (disproportionate) обрушение
	US GSA [27] British Code [24] DoD UFC-4-023-4 [13]	Расчетная ситуация, в которой локальное разрушение главных (имеющих первостепенное значение) конструктивных элементов приводит к обрушению примыкающих элементов, которые, в свою очередь, вызывают дополнительное обрушение. Следовательно, результирующее обрушение является непропорционально большим по отношению к исходной причине
ЕС	EC4: EN 1991-1-7 [30]	Живучесть (robustness) – способность конструкции противостоять таким особым событиям, как пожары, взрывы, удары транспортных средств или последствия человеческих ошибок, не получая повреждений в степени, непропорционально большой по отношению к исходной (оригинальной) причине
Россия	Рекомендации по защите монолитных зданий от прогрессирующего обрушения [22], Рекомендации [11]	«...защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения их несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (пожары, взрывы, ударные воздействия транспортных средств и т.д.). В случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения отдельных вертикальных элементов в пределах одного этажа, но эти первоначальные разрушения не должны приводить к обрушению или разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийными воздействиями»
Беларусь	ТКП 45-3.02-108 [7]	Прогрессирующее или непропорциональное обрушение, обусловленное цепной реакцией разрушений конструктивных элементов системы, распространяющихся вертикально и/или горизонтально, – катастрофическое частичное или полное обрушение здания или сооружения, развивающееся после наступления некоторого исходного события (как правило, аномального воздействия), приводящего к внезапному локальному разрушению отдельного конструктивного элемента (ключевого элемента), которое не может быть в полной мере воспринято или предотвращено за счет начальной неразрезности и деформативности (пластической податливости) конструктивной системы

В исследованиях [31], опубликованных в начале 2009 года, рекомендуется использовать следующие характеристики применительно к анализируемому феномену:

1) *прогрессирующее обрушение* – один или несколько элементов конструктивной системы разрушаются *внезапно* (независимо от причин, вызвавших разрушение), что ведет к перераспределению усилий и очередному выключению (разрушению) других конструктивных элементов до тех пор, пока не будет достигнуто *новое состояние равновесия*, при котором часть, если не все здание, подвергнется обрушению;

2) *непропорциональное обрушение* – прогрессирующее обрушение, характеризующееся как непропорциональное, если размеры области результирующего обрушения превышают *допустимые*, установленные соответствующими нормами, стандартам, рекомендациями. В силу этого критерий непропорциональности может отличаться для различных стран (табл. 2) в зависимости от принятого *уровня допустимого риска* [1, 2].

Таким образом, различные технические нормативно-правовые акты, используя термин «*прогрессирующее обрушение*», в действительности подразумевают «*непропорциональное*» обрушение.

Не вступая в терминологическую полемику, «прогрессирующее обрушение», о котором в основном говорят специалисты, имеет следующие признаки:

- реализация аномального события, вызывающего появление особых (идентифицированных и/или неидентифицированных) воздействий;
- внезапное локальное разрушение отдельного(ых) конструктивного(ых) элемента(ов), провоцирующее обрушение части конструктивной системы;
- непропорционально большие масштабы результирующего обрушения и социально-экономические последствия по отношению к инициировавшему его локальному разрушению, превосходящие нормируемые значения, установленные в зависимости от принятого уровня допустимого риска.

Следует отметить, что в большинстве случаев сценарии развития прогрессирующего обрушения связывают главным образом с перераспределением усилий в модифицированной конструктивной системе, получившей начальные разрушения. Однако в особых расчетных ситуациях могут реализовываться и другие механизмы и сценарии распространения разрушений.

Таблица 2

Критерии ограничения области результирующего обрушения  
в соответствии с требованиями нормативных документов различных стран

Страна	Нормативный документ	Критерий ограничения области локального разрушения	
		в горизонтальном направлении	в вертикальном направлении
Велико-британия	BS5950-1:2000 [24]	Менее 15 % от площади перекрытия и не более 100 м <sup>2</sup>	Уровень начального обрушения плюс один смежный уровень (этаж) вверх или вниз
Канада	NBCC 1977 [28]	Один пролет плюс один элемент в любую сторону; две плиты размером на пролет могут провисать за счет вантового (цепного) эффекта, если удаляется опора с одной стороны	То же
США	NYC 1998, 2003 [29]	Менее 20 % площади перекрытия (покрытия) и не более 100 м <sup>2</sup>	Не более 3-х этажей
	DoD-UFC-4-023-03 [13]	При удалении наружных элементов: разрушение перекрытия выше удаленного элемента не более 70 м <sup>2</sup> и не более 15 % от общей площади перекрытия; при удалении внутренних элементов: не более 140 м <sup>2</sup> , или 30 %, площади перекрытия	Перекрытие, располагаемое под удаляемым элементом, не должно разрушаться
	GSA 2003 [27]	Не более 170 м <sup>2</sup> непосредственно над удаленным наружным элементом или не более 330 м <sup>2</sup> над удаленным внутренним элементом	Уровень начального обрушения плюс один этаж вверх или вниз
ЕС	EN 1991-1-7 [30]	Не более 70 м <sup>2</sup> и 15 % для каждого из перекрытий двух смежных этажей при удалении наружной колонны	То же
Россия	МГЧН 4.19-05 [11]	Повреждение в круге площадью не более 80 м <sup>2</sup>	«-»
Беларусь	ТКП 45-3.02-108 [7]	При удалении наружных элементов: не более 70 м <sup>2</sup> и не более 15 % от площади каждого из перекрытий двух смежных этажей; при удалении внутренних элементов: не более 140 м <sup>2</sup> и не более 30 % от площади для каждого из перекрытий двух смежных этажей	«-»

Рассмотрим классификацию возможных типов прогрессирующего обрушения.

**2. Основы стратегии управления рисками прогрессирующего обрушения.** Как следует из анализа работ [3, 6, 19 – 21, 32 – 34], локальные разрушения (повреждения) могут быть инициированы целым рядом аномальных причин (событий), включая как человеческий фактор (ошибки, допущенные в процессе проектирования и возведения здания), так и события, которые могут иметь место (произойти с малой вероятностью) в процессе эксплуатации здания (после его возведения) и не рассматриваются в традиционных расчетных ситуациях при составлении соответствующих комбинаций воздействий непосредственно на стадии проектирования. Такие события связаны с появлением, как правило, аномальных воздействий, которые традиционно принято называть особыми или чрезвычайными. Эти воздействия – взрывы (газа, бомбы и т.д.), удары транспортных средств (грузовика, самолета), крупно-

масштабные пожары, экстремальные климатические или другие аномальные природные воздействия – не рассматриваются в рамках традиционного проектирования. Подобная классификация идентифицированных и не идентифицированных особых воздействий приведена, например, в работе [5].

В общем случае стратегия управления рисками прогрессирующего обрушения фокусируется на методах расчета, оценивающих способность поврежденной (модифицированной) конструктивной системы сохранять живучесть\* после наступления особого события, связанного с появлением аномального воздействия.

Если каждую из угроз, оговоренных ранее, представить случайным событием  $H_i$ , тогда полная вероятность обрушения конструктивной системы может быть записана следующим образом:

$$P(F) = \sum P(F|DH_i)P(DH_i|H_i)P(H_i), \quad (1)$$

где  $F$  – событие, определяемое как непропорциональное или прогрессирующее обрушение конструктивной системы;  $P(H_i)$  – вероятность появления особого события, связанного с угрозой;  $P(DH_i|H_i)$  – условная вероятность локального разрушения отдельного конструктивного элемента при наступлении особого события;  $P(F|DH_i)$  – условная вероятность наступления прогрессирующего непропорционального обрушения конструктивной системы при условии, что произойдет локальное разрушение отдельного элемента при реализации особого события  $H_i$ .

Термином  $P(F)$  обозначена полная вероятность обрушения здания, которую следует ограничивать некоторым социально приемлемым значением (в большинстве норм  $P(F) \approx 10^{-7}/\text{год}$ ).

Одна из основных проблем, с которой сталкиваются современные нормы, – это то, что они фокусируют внимание на традиционном, исторически выработанном и относительно малом перечне угроз, которые могут воздействовать на эксплуатирующееся здание (климатические воздействия, землетрясения и т.д.). Современная строительная практика, как и социально-политические изменения, показывают рост угроз, которые исторически не рассматривались как существенные в процессе проектирования (например, взрыв или детонация) или исключались скорее системой мер безопасности, чем формальными конструктивными расчетами.

Несложно видеть, что снижение вероятности наступления непропорционального прогрессирующего обрушения конструктивной системы может быть получено снижением либо каждой отдельной или всех трех вероятностей, входящих в формулу (1). При этом вероятность  $P(H_i)$  является независимой при проектировании. Она может контролироваться объемно-планировочным решением или размещением здания, снижением возможных рисков внутри здания при организованных мерах безопасности, обучением персонала и т.д. При реализации таких мер многие риски могут быть эффективно предотвращены (например, террористические акты).

Проектная стратегия, направленная на обеспечение сопротивления локальному разрушению, сводится к минимизации вероятности  $P(D|H_i)$ . Как было показано ранее, эта стратегия может быть трудно-реализуемой (в силу неопределенности величины особых воздействий), содержать значительные риски или изначально давать неэкономичные результаты.

Принимая ситуацию, когда рассматриваемая ситуация последствия прогрессирующего обрушения, т.е.  $P(D|H_i) \approx 1$ , полная вероятность  $P(F)$  будет соответствовать выражению:

$$P(F) = P(F|DH_i)P(H_i). \quad (2)$$

Таким образом, задача проектирования в особой расчетной ситуации сводится, главным образом, к минимизации вероятности  $P(F|DH_i)$ . Эта стратегия должна реализовываться в широком диапазоне: от конструктивных мер, направленных на создание неразрезности и конструктивной целостности системы, до полного расчета повреждений конструктивной системы с учетом эффектов, которые не учитываются при традиционном проектировании (например, мембранные усилия в перекрытиях, большие деформации и перемещения, физическая и геометрическая нелинейность). Для того чтобы определить вероятность  $P(F|DH_i)$ , следует вначале постулировать математическую модель (функцию предельного состояния)  $G(X)$  в соответствии с принципами, установленными в теории надежности [35]. Базисные переменные, входящие в вектор  $X$ , представляют собой стохастические величины, описываемые функциями распределения. Условную вероятность обрушения  $P(F|DH_i)$  находят традиционным способом, интегрируя обобщенную (кумулятивную) функцию плотности вероятностей  $X$  для области  $G(X) < 0$ .

\* Согласно [42] живучесть – это способность конструктивной системы сохранять свойства, необходимые для выполнения требуемых функций при наличии неблагоприятных воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, вызывающими повреждения (отказы) элементов системы.

Как было показано в работе [35], в целом ряде случаев воспользоваться традиционным подходом, основанным на интегрировании, не представляется возможным. В этом случае целесообразно использовать численные симуляционные методы (например, симуляцию Монте-Карло и т.д.).

При альтернативном подходе в рамках FORM [35] для оценки может быть использован так называемый обобщенный индекс надежности:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}, \quad (3)$$

где  $\mu_G$  и  $\sigma_G$  – соответственно среднее значение и стандартное отклонение  $G(X)$ .

Индекс надежности  $\beta$  связан с вероятностью  $P(F/DH_i)$  следующей зависимостью:

$$\beta = \Phi^{-1}[P(F|DH_i)], \quad (4)$$

или с учетом того, что  $P(H_i) = \lambda_i T$ , уравнение принимает вид:

$$\beta = \Phi^{-1}[P(F)/\lambda_i T]. \quad (5)$$

Согласно полученным решениям вероятность наступления предельного состояния (или индекс надежности) должны рассчитываться для конструктивной системы в целом.

Безусловно, что при современном уровне развития строительной науки и доступных компьютерных ресурсах такая оценка является достаточно трудоемкой и сложной в реализации.

В соответствии с приведенными решениями меры по контролю рисков от особых воздействий могут включать одну или более из следующих основных стратегий (рис. 1):

а) предотвращение или снижение до приемлемого уровня вероятности появления и/или интенсивности особого воздействия;

б) защита конструктивной системы от эффектов особого воздействия путем снижения особых нагрузок, действующих на конструктивные элементы при устройстве защитных экранов, оболочек, барьеров безопасности и т.д.;

в) обеспечение необходимой минимальной живучести конструктивной системы с учетом выполнения одного или более из следующих действий:

- проектирование выявленных ключевых элементов конструктивной системы из условия восприятия особых нагрузок;

- проектирование конструктивной системы с включением элементов, имеющих высокую деформативность и способных сопротивляться при больших деформациях без хрупкого разрушения;

- проектирование конструктивной системы, предусматривая резервные (альтернативные) пути передачи нагрузок и усилий после ее модификации (в поврежденном состоянии) в результате наступления особого события.

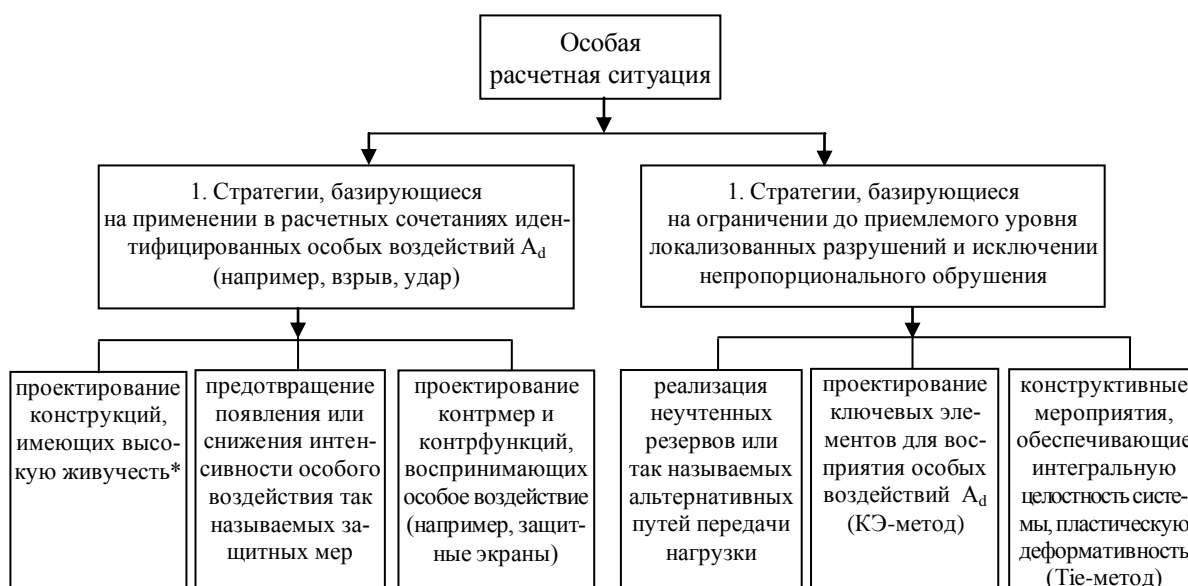


Рис. 1. Расчетные стратегии, применяемые при проектировании конструктивных систем в особых расчетных ситуациях (\* – низкая восприимчивость конструктивной системы к появлению особого воздействия)

**3. Некоторые замечания о допустимом уровне риска.** Базовым вопросом в подходах, принятых практически всеми нормативными документами, содержащими требования расчета на особые воздействия, включая EN 1991-1-7 [30], является следующий: какой уровень риска следует считать допустимым? Базовый документ к ЕС [30] дает количественную основу для выполнения оценок в терминах индивидуального и коллективного (общественного) рисков.

Как показал анализ различных норм [13 – 17, 23, 24, 36], индивидуальный риск имеет достаточно низкие значения и является вполне приемлемым. По результатам оценки для территории Брестской области установленные по методике, принятой МЧС Республики Беларусь, значения индивидуального риска составляют около  $10^{-7}$ /год.

Согласно CIRIA Report 63, допустимое целевое значение коллективного (социального) риска определяют по формуле:

$$p_{ft} = \frac{10^{-4}}{n_r} \cdot k_s \cdot k_d,$$

где  $k_s$  – коэффициент, учитывающий общественные критерии;  $n_r$  – среднее число людей, находящихся внутри здания и/или около него в пределах зоны риска в момент реализации особого события;  $k_d$  – расчетный срок службы здания (в годах).

Здесь, однако, следует отметить, что основой любого количественного оценивания критерия приемлемого риска (целевой вероятности обрушения или целевого индекса надежности) при особых воздействиях является база данных, содержащая сведения о зарегистрированных инцидентах. К сожалению, в настоящее время подобная доступная база данных отсутствует. Несмотря на это некоторые целевые значения внесены в ряд норм, в частности в EN 1991-1-7 [30].

В рамках общепринятой концепции считается, что центральным критериальным значением для предельного состояния по прочности является  $\beta = 3,8$  для расчетного срока эксплуатации. Это дает вероятность разрушения  $p_f = 7 \cdot 10^{-5}$  на весь срок эксплуатации, или  $p_f = 1,3 \cdot 10^{-6}$ /год (для  $T_{ref} = 50$  лет), что соответствует  $\beta = 4,7$ /год. При этом практически не одни нормы не оговаривают, какому сценарию обрушения соответствуют приведенные критериальные значения. По научным отчетам [31] можно судить о том, что приведенные значения связаны с расчетной надежностью отдельного конструктивного элемента, разрушение которого приводит к умеренным (средним) ожидаемым последствиям в рамках классификации EN 1990 [25].

Альтернативные величины индексов надежности назначены для более или менее значимых элементов, т.е. характеризующихся сравнительно большими или меньшими последствиями разрушения.

В CIRIA Report 63 сделана попытка установить некоторые индикативные значения для оценки надежности конструктивных элементов. Следует отметить, что использование приведенных критериев вызывает трудности у практикующих инженеров при реальном проектировании.

При проектировании в постоянных и переходных расчетных ситуациях, когда используются нормативные комбинации нагрузок, ключевым вопросом в достижении требуемого уровня надежности является выбор соответствующего типа нагружения и правильное применение частных коэффициентов безопасности [38 – 41]. Вслед за СТБ ИСО 2394 [37], при отсутствии других данных, принято, что коэффициент чувствительности для доминирующего воздействия составляет:  $\alpha \approx 0,7$ . Соглашаясь с тем, что более обоснованные данные отсутствуют,  $\alpha\beta$  для воздействий составляет  $0,7 \cdot 3,8 = 2,7$  (для всего срока эксплуатации), или вероятность превышения нагрузки  $p_f = 0,6 \cdot 10^{-4}$ /год. Индикативные значения критериальных значений вероятности отказа  $p_f$  и индексов надежности  $\beta_{tag}$  согласно [31] представлены в таблице 3.

Таблица 3

Индикативные значения критериальных значений вероятности отказа  $p_f$  и индексов надежности  $\beta_{tag}$

Последствия разрушения		
малые (незначительные)	умеренные	большие (значительные)
второстепенные элементы	главные балки	колонны
$p_f = 0,7 \cdot 10^{-5}$ /год	$p_f = 1 \cdot 10^{-6}$ /год	$p_f = 1,5 \cdot 10^{-7}$ /год
$\beta_{tag} = 4,3$ /год	$\beta_{tag} = 4,7$ /год	$\beta_{tag} = 5,1$ /год
$\beta_{tag} = 3,3$	$\beta_{tag} = 3,8$	$\beta_{tag} = 4,3$
( $T_{ret} = 50$ лет)	( $T_{ret} = 50$ лет)	( $T_{ret} = 50$ лет)

Принимая базовый период повторяемости для переменных, совпадающий со сроком эксплуатации  $T_{ret} = 50$  лет, характеристическое значение нагрузки имеет годовую вероятность превышения  $0,02/\text{год}$  ( $2 \cdot 10^{-2}/\text{год}$ ).

Переходя к расчетным значениям, характеристические значения умножают на коэффициент безопасности по нагрузке  $\gamma_F$  (например, для постоянных нагрузок  $\gamma_F = 1,35$ ), так что ожидаемая вероятность превышения расчетных нагрузок снижается до  $\Phi(0,7 \times 3,8)$ , т.е.  $\Phi(\beta) = \Phi(2,7)$  – для всего срока службы, или  $p_f = 0,6 \cdot 10^{-4}/\text{год}$ , как было показано выше.

Согласование коэффициента  $\gamma_F = 1,35$  с другим допущением, например, с таким, что коэффициент вариации для воздействия  $v_E = 0,4$  возможен только тогда, если принять, что в  $\gamma_F = 1,35$  включен коэффициент  $\gamma_D = 1,15$ , учитывающий несовершенства, погрешности применяемых расчетных моделей.

Для случая особых расчетных ситуаций, когда действуют аномальные или экстремальные воздействия, превышающие значения расчетных воздействий (характеристические значения для периода повторяемости  $T_{ret} = 50$  лет с умножением на  $\gamma_Q$ ), последние могут рассматриваться как эквивалентные особые нагрузки.

В общих терминах это означает, что «анормальное» переменное воздействие появляется с частотой не более  $10^{-4}/\text{год}$  (что указано в ЕС [25] для особых нагрузок). По концепции ЕС [25] и СТБ ЕН 1990 [37] аномальное переменное воздействие, вызывающее разрушение отдельного элемента, не должно вызывать разрушение системы, т.е. непропорционального/прогрессирующего обрушения.

Нормы [25, 37] не определяют критериальных (образцовых) сценариев для особых воздействий. Обычно принимается, что такие воздействия будут появляться для каждой «конструкции» с вероятностью, близкой к  $10^{-4}/\text{год}$  (т.е.  $5 \cdot 10^{-3}/\text{год}$ , или 0,5 %, на срок службы  $T = 50$  лет), а это означает, что только 1 из 200 конструкций будет подвергаться таким нагрузкам. Единицей в данном случае является конструкция.

Ясно, что пока  $\beta_{tag} = 3,8$  (для всего срока службы) для нормального проектирования, все требования фокусируются на действии особых нагрузок, аномальное воздействие угрожает, как правило, всей конструкции, а не отдельному элементу.

Так, например, экстремальная ветровая нагрузка угрожает всему зданию в целом, а снеговая – главным образом конструкции покрытия. Поэтому необходимо установить связь между выбранным (критериальным) сценарием обрушения и последствиями, которые определяются как «пропорциональные».

Рассмотрим простой случай свободно опертой однопролетной балки. Если балка перегружена, к примеру, на 50 %, то результатом может стать разрушение собственно балки. При этом никакие другие конструктивные элементы разрушению не подвергаются. При принятом значении  $\gamma_F = 1,35$  (для  $T_{ret} = 50$  лет) для перегруженной конструкции имеем  $\gamma = 1,5 \times 1,35 = 2,0$ . Тогда, пользуясь функцией распределения для переменных нагрузок при коэффициенте  $\gamma = 2,0$  (при  $\gamma_D = 1,15$ ), вероятность превышения составит менее чем  $10^{-7}/\text{год}$ . Разрушение элемента при введении коэффициента безопасности  $\gamma = 2,0$  к характеристическому воздействию (при  $T = 50$  лет) может приводить к неблагоприятным последствиям. В этой ситуации речь идет о приемлемом (допустимом) риске (в связи с риском коллективным).

Рассмотрим, являются ли индивидуальный риск на уровне  $10^{-4}/\text{год}$  и соответствующий индекс надежности достаточно безопасными допустимыми значениями.

Примем, что условная вероятность разрушения при наступлении данного события  $p(f|e) = 1,0$

Допустим, что вероятность перегрузки  $10^{-7}/\text{год}$ , вероятность разрушения при особом воздействии тогда составит, очевидно,  $10^{-7}/\text{год}$ .

Мера приемлемого (допустимого) индивидуального риска для одиночного фатального инцидента согласно [37] составляет  $10^{-6}/\text{год}$ .

Так, если  $p(d|f)$  является условной вероятностью, что отдельный человек погибнет при данном обрушении, то целевая вероятность обрушения может быть определена из условия:

$$p_{f,tag} < 10^{-6} / N \times p(d|f) / \text{год},$$

где  $N$  – число людей, подвергающихся риску быть погибшими.



В качестве базового случая можно рассмотреть граничное значение:  $p(d|f) = 1$ ,  $p_{f,tag} = 10^{-7}$ .

$$\text{Получаем} \quad 10^{-7} < \frac{10^{-6}}{N \cdot 1}, \text{ или } N < \frac{10}{p(d|f)}.$$

Это ведет к расчетному критерию  $N$  фатальных исходов, когда  $N < 10$  при разрушении от действия особой нагрузки.

Принимая во внимание отрицательную (практически истерическую) реакцию общества на значительное количество жертв, назначают весовой коэффициент к  $N^\alpha$ , где  $\alpha = 2$  (см. СТБ ИСО 2394 [37]). Тогда число жертв становится равным  $\sqrt{10}$ , т.е.  $\approx 3$ , а не 10.

Так, при разрушении от расчетной нагрузки, действующей в постоянной и переходной ситуации (вероятность инициирующего события  $1 \cdot 10^{-6}$  /год), ограничение получает вид:

$$N < \frac{1}{p(d|f)}.$$

Проектная практика в настоящее время достигла частоты разрушений  $10^{-6}$  /год (для значительных и очень значительных инцидентов). Вместе с тем это намного меньше действующего целевого критерия  $p_f = 10^{-4}$  /год. Значительные (серьезные до очень серьезных) инциденты составляют менее 10 % и их вероятность в районе  $10^{-7}$  /год, при этом анализ аварий показывает:

1) большие расчетные ошибки составляют значительную долю среди причин разрушения и не всегда могут быть перекрыты коэффициентом  $\gamma_D = 1,15$ ;

2) важным вкладом в разрушения является «изменение плана эксплуатации», в результате которого появляются перегрузки в элементах конструктивной системы, не перекрываемые введением коэффициента  $\gamma_Q$ .

#### 4. Проектные стратегии защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения.

Для выбора соответствующей стратегии защиты конструктивной системы от прогрессирующего (непропорционального) обрушения следует произвести первичную оценку здания или сооружения, отнеся его к соответствующему классу по последствиям наступления обрушения. При выполнении таких оценок в соответствии с EN 1991-1-7 рекомендуется выделять три класса:

- класс 1 – конструктивные системы, которые не требуют дополнительных специфических проверок, кроме тех, что предусмотрены действующими ТНПА;

- класс 2 – конструктивные системы, для которых выполняются упрощенные проверки с использованием квазистатических моделей воздействий или предусматриваются дополнительные расчетно-конструкционные меры, направленные на обеспечение их живучести после наступления особого события;

- класс 3 – конструктивные системы, для которых оценка надежности выполняется на основе углубленного расчетного анализа с привлечением нелинейных статических и динамических расчетных моделей. Результатом расчетов в ряде случаев является величина риска.

Классификация конструктивных систем в зависимости от прогнозируемых последствий обрушения представлена в таблице 4.

Рекомендуемые стратегии защиты конструктивных систем от наступления прогрессирующего обрушения для установленных классов в зависимости от прогнозируемых последствий обрушения представлены в таблице 5 и могут быть систематизированы в общем виде:

а) для зданий класса 1 конструктивная система должна быть рассчитана и сконструирована в соответствии с требованиями действующих ТНПА из условий обеспечения требований метода предельных состояний;

б) для зданий класса 2 (пониженный риск) при проектировании конструктивной системы требуется установка эффективных горизонтальных связей, анкеровка перекрытий в стенах в соответствии с указаниями норм;

в) для зданий класса 2 (повышенный риск) при проектировании конструктивной системы требуется постановка эффективных горизонтальных связей, эффективных вертикальных связей по всех поддерживающих колоннах и стенах или альтернативно проверка того, что после вынужденного удаления каждой колонны или балки, поддерживающей колонну, либо любого номинального сечения несущей стены, как это определено в [30] (единовременно только один элемент для каждого этажа здания), здание сохра-

няет стабильность, не подвергаясь обрушению, и что любое локальное разрушение не превышает установленных пределов.

Таблица 4

## Категории (классы) зданий и сооружений по последствиям обрушения

Класс	Примеры категорий зданий
1	$RF < 0,7^*$ Отдельностоящие жилые дома не более 4-х этажей. Сельскохозяйственные здания. Здания, редко посещаемые людьми, части которых не примыкают к другим зданиям или зонам, посещаемым людьми, и располагаются от них на расстоянии не менее 1,5 высоты здания
2	2А группа пониженного риска $0,7 \leq RF < 2$ 5-этажные жилые дома. Гостиницы высотой не более 4-х этажей. Многоквартирные, апартаменты и другие жилые здания не более 4-х этажей. Офисные здания не более 4-х этажей. Одноэтажные образовательные здания. Все здания не более 2-х этажей, у которых площади перекрытий не превышают 2000 м <sup>2</sup> на каждом этаже
2	2Б группа повышенного риска $2 \leq RF \leq 4$ Гостиницы, апартаменты и другие подобные здания более 4-х этажей, но не более 15-ти этажей. Образовательные (учебные) здания более одного этажа, но не более 15 этажей. Больницы не более 3-х этажей. Офисные здания более 4-х этажей, но не более 15-ти этажей. Все здания, в которых допускается появление людей, и имеющие площади перекрытий более 2000 м <sup>2</sup> , но не более 5000 м <sup>2</sup> на каждом этаже
3	$RF > 4$ Все здания, относящиеся к классу 2, но в которых превышены ограничения по площади и количеству этажей. Все здания, в которых наблюдается значительное скопление людей. Зрелищные сооружения с более 500-ми зрителями. Здания, в которых могут быть размещены опасные субстанции и/или технологические процессы
* RF – коэффициент риска, ориентировочные значения которого определяют по п. 2.4 настоящих рекомендаций EN 1991-1-7.	

Таблица 5

## Рекомендуемые стратегии для проверки живучести конструктивных систем с точки зрения восприятия локального разрушения

Класс	Стратегия
1	Конструктивные элементы здания рассчитываются и конструируются в соответствии с правилами, приведенными в традиционных нормах для обеспечения требований первой и второй групп предельных состояний. Никаких дополнительных мер не требуется
2А	В дополнение к стратегии, рекомендованной для класса 1, предусматривается устройство эффективных горизонтальных связей, обеспечение условий анкеровки элементов перекрытий в стенах в соответствии со специальными рекомендациями соответственно для каркасных систем и зданий с несущими стенами
2Б	В дополнение к стратегии, рекомендованной для класса 1, предусматривается устройство горизонтальных связей в соответствии со специальными рекомендациями для каркасных систем и зданий с несущими стенами совместно с выполнением вертикальных связей во всех несущих колоннах и стенах или альтернативно конструктивная система здания должна быть проверена расчетом после вынужденного удаления поддерживающей колонны или каждой балки поддерживающей колонны или любого номинального фрагмента несущей системы (единовременно один элемент) для того, чтобы убедиться, что конструктивная система сохраняет устойчивость и что любое локальное повреждение (разрушение) не превышает установленных граничных значений (рекомендуемое граничное значение не более 15 %, или 70 м <sup>2</sup> , для каждого из перекрытий двух смежных этажей при удалении наружной колонны). Если при вынужденном удалении колонны или фрагмента стены локальные повреждения (разрушения) превышают установленные граничные значения, то элементы, подвергавшиеся удалению, должны проектироваться как «ключевые» элементы (КЭ)
3	Выполняется систематическая оценка риска для здания, принимаемая для анализа как явные, так и не явные угрозы

Если в результате расчета установлено, что при вынужденном удалении колонн или стен размеры области разрушений превышают установленные граничные значения, удаляемые конструктивные элементы следует проектировать как ключевые элементы на восприятие особых воздействий;

г) для зданий класса 3 при проектировании конструктивной системы следует выполнять систематический анализ рисков, принимая в расчет как все идентифицированные угрозы (с учетом сценариев их развития), так и не идентифицированные угрозы. Базовые положения по анализу рисков представлены в разделе 7 и приложении А Рекомендаций EN 1991-1-7 [30].

**5. Применимость расчетных методов к проблеме прогрессирующего обрушения.** Следует отметить, что подходы, содержащиеся в актуальных нормах проектирования конструкций и других источниках [43 – 48], не вполне применимы при идентификации условий наступления прогрессирующего (непропорционального) обрушения. Анализ, выполненный в работе [5], показал, что можно назвать по меньшей мере три основные причины ограниченного применения положений норм:

- первая причина заключается в том, что расчетные положения, содержащиеся в нормах проектирования, концентрируют основное внимание на рассмотрении условий локального разрушения, а не глобального обрушения конструктивной системы. Соответственно, расчетные уравнения метода предельных состояний составляют и применяют для некоторого локального уровня (например, уравнения равновесия, совместности деформаций в критическом сечении или проверка местной устойчивости отдельного конструктивного элемента системы). Поэтому конструктивная безопасность рассчитывается и оценивается только для локального уровня. Глобальная безопасность конструктивной системы, т.е. устойчивость к прогрессирующему обрушению всей системы в целом или ее значительной части, является функцией как сопротивления всех элементов локальному разрушению, так и реакции системы на локальное разрушение.

Как отмечалось выше, положения норм концентрируют внимание исключительно на «локальном сопротивлении», не учитывая реакции конструктивной системы на локальные отказы. Вместе с тем различные конструктивные системы по-разному реагируют на локальное разрушение отдельных элементов. Допущение о том, что уровень безопасности конструктивной системы достигается обеспечением адекватных условий безопасности отдельных конструктивных элементов, в общем случае не является бесспорным. Применение расчетных методов, содержащихся в нормах, к конструктивным системам, определяемым как «системы со сниженной или отсутствующей живучестью», приведет к небезопасным результатам при проектировании;

- вторым недостатком современных расчетных методов, содержащихся в нормах, является то, что они не рассматривают события, имеющие очень низкую вероятность появления, и поэтому особые воздействия природного или искусственного происхождения не принимаются в расчет. В рамках вероятностных методов [33] такие упрощения являются необходимой мерой, так как статистические данные, полученные из опытов и наблюдений, например, для особых воздействий, практически отсутствуют и поэтому их моделирование связано с большой неопределенностью. Однако в случае так называемых «неживучих» конструктивных систем такие упрощения становятся недопустимыми;

- третьей проблемой современных расчетных методов, включенных в действующие нормы проектирования, является то, что вероятностный подход в рамках применяемых положений теории надежности требует нормирования допустимых (приемлемых) вероятностей обрушения. Рассматривая экстремальные значения потерь и убытков (ущерба) от реализации прогрессирующего обрушения, достаточно сложно достичь социально приемлемого консенсуса при назначении допустимой вероятности обрушения, что является особенностью решения задач теории рисков вида «низкая вероятность наступления события/высокие социально-экономические последствия наступления события».

**Заключение.** Стратегии, направленные на защиту конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, в основном концентрируют внимание на трех основных положениях [49]:

- 1) ограничение или снижение до приемлемого уровня угроз;
- 2) обеспечение прочности ключевых элементов системы (главным образом при идентифицированных воздействиях);
- 3) ограничение масштабов результирующего обрушения или обеспечение живучести модифицированной конструктивной системы с удаленными элементами.

С учетом специфики рассматриваемой проблемы положения действующих норм требуют корректировки как в части расчетных методов, определяющих реакцию системы на особые воздействия, так и нормирования собственно воздействий в особых расчетных ситуациях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перельмутер, А.В. О нормировании уровня риска / А.В. Перельмутер // Изв. Орловск. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство и транспорт. – 2007. – № 2/14(530). – Апрель – июнь. – С. 160 – 169.

2. Перельмутер, А.В. Влияние неопределенности исходных данных на оценку проектных решений / А.В. Перельмутер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www. SCAD. Soft](http://www.SCAD.Soft).
3. Progressive Collapse Analysis and design guidelines for new federal office Buildings and major modernization projects, June 2003, U.S. General Service Administration and Applied Research Associates.
4. Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure / S. Park [et al.] // International Journal of Solids and Structures. – 2004. – № 41. – P. 4035 – 5050.
5. Starossek, U. Typology of progressive collapse / U. Starossek // Engineering Structures. – 2007. – V. 29, № 9. – P. 2302 – 2307.
6. Ellingwood, B.R. Acceptable risk bases for design of Structures / B.R. Ellingwood // Progress in Struct. Engrg. and Mat., 2001, 3(2). – P. 170 – 179.
7. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108-2008. – Минск: Типпроект, 2008. – 178 с.
8. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий / Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 1999. – 55 с.
9. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях / Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 2002. – 14 с.
10. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения / Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 2006. – 60 с.
11. Проектирование высотных зданий: МГСН 4.19-05. – М.: ГУП НИИАЦ, 2002. – 97 с.
12. New York City Code (NYC), 1993.
13. UFC-4-023-03 (Unified Facilities Criteria) – Design of Building to Resist progressive collapse, January, 2005.
14. UFC3-340-01 Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effect, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.
15. UFC 4-010-01 DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.
16. ACI 318-02, Building Code, Requirements for Structural Concrete, P.O. Box 9094, Farmington Hills, 2002.
17. ACI 318-05, Building Code, Requirements for Structural Concrete, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2005.
18. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town; MSO, 1968 (НИИС, пер. 18736).
19. Ellingwood, B.R. Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design / B.R. Ellingwood // Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2005.
20. Ellingwood, B.R. Approaches for Design against Progressive Collapse / B.R. Ellingwood, E.V. Leyendecker // J. Struct. Div., ASCE 104 (3). – 1978. – P. 413 – 423.
21. Stewart, M.G. Probabilistic risk assessment of engineering system / M.G. Stewart, R.E. Melchers // Chapman Hall, London, 1997.
22. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения / Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 2005. – 71 с.
23. ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, Reston, VA 20191-4400, 2000.
24. BS5950-1:2000 Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Construction, 389 Cheswick High Road, London W4 4AL, 1998.
25. Eurocode – Basis of structural design: EN 1990:2001.
26. Swedish Board of Housing, Building and Planning – Boverket, 1994, Handbook on Vibration, Induced Deformations and Accidental Loads.
27. General Services Administrations (GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Projects, 2003.
28. National Building Code of Canada (NBCC), Part 4, Commentary C, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1985.
29. PCI Committee on Precast Concrete Bearing Wall Building to Withstand Abnormal Loads // PCI Journal. – V. 21, № 2, March – April. – P. 18 – 51.
30. EN 1991-1-7. General Actions – Accidental Actions.
31. Vlassis, G. Progressive collapse assessment of tall buildings / G. Vlassis. – London, 2009. – 416 p.
32. Сергеев, Д.Д. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне. Обзорная информация № 2 / Д.Д. Сергеев. – М.: ГлавАПУ, 1969.
33. Разработка и исследование усовершенствованной системы конструктивных связей между сборными элементами панельных зданий унифицированной конструкции с целью повышения их надежности и улучшения технико-экономических характеристик: науч.-техн. отчет / МНИИТЭП, 1976. – Шифр НИ-1696М.
34. Starossek, U. Design of Collapse – resistant structure, ICSS and IA BSE Workshop on Robustness of Structure / U. Starossek, M. Wolf, 2005.

35. Тур, В.В. Назначение испытательных коэффициентов по результатам статического моделирования / В.В. Тур, Д.М. Марковский // Строительная наука и техника. – 2006. – № 5(9).
36. EN 1992-1: 2001(Final draft, October, 2001) Eurocode – 2: Design of concrete structures – Part 1: General Rules and Rules for building, Brussels, 2001, October. – 230 p.
37. Общие принципы обеспечения надежности строительных конструкций (проект): СТБ ИСО 2394 (ISO 2394). – Минск: Бел НИИС, 2007. – 97 с.
38. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Типпроект, 2003. – 237 с.
39. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85\*. – М.: Стройиздат, 1985. – 79 с.
40. Eurocode 1 – Actions on Structures: ENV 1991-1, Part 1 – Basic of Design, Brussels, Belgium, 2003.
41. Probabilistic Model Code (12<sup>th</sup> Draft): Part1 – Basis of Design – Joint Committee of Structural Safety – JCSS – OSTL/DIA/VROU-10-11-2000. – 57 p.
42. Кудишин, Ю. Живучесть конструктивных систем в аварийных ситуациях / Ю. Кудишин, Д. Дробот // Металлические здания. – 2008. – № 1.
43. Milchers, R.E. Structural reliability – analysis and prediction / R.E. Milchers, J. Wiley, 1999.
44. National Workshop on Prevention of Progressive Collapse, the UK and European Regulation for Accidental Actions, D.B. Moore, 2002.
45. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings / B.R. Ellingwood [et al.] // NISTIR. – 2006. – August.
46. Wolinski, S. Analiza ryzyka a niezawodnosc konstrukcji budowlanych / S. Wolinski // Inzynieria i Budownictwo. – 2006. – № 5. – P. 270 – 274.
47. Li, H.X. Fuzzy sets and fuzzy decisions – making / H.X. Li, C.V. Yen // CRC Press, Boca Raton. – New York, 1995.
48. Bazant, Z. Why did the World Trade Center Collapse – Symple Analysis / Z. Bazant // Journ. Of Engineering Mechanics. – 2002. – January. – V. 128, № 1.
49. Тур, В.В. Основы проектных стратегий, применяемых для защиты зданий от прогрессирующего обрушения / В.В. Тур, А.В. Тур, Д.М. Марковский // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 11 – 27.

*Поступила 26.05.2009*