

деформированное состояние бетона, а именно – неравномерное многоосное сжатие, создаваемое приложенной нагрузкой и возникающим при этом боковым давлением бетона, расположенного по периметру площади нагружения.

Выполненная согласно положениям [29] оценка надежности методов расчета прочности бетона при местном сжатии показала, что представленный в [28] метод расчета, как правило, дает более высокие значения индекса надежности, чем расчет по [9-11], а, следовательно, обеспечивает более высокую надежность конструкций.

Исходя из обеспечиваемого методами расчета [9-11] и [28] индексов надежности не рекомендуется применять для работающих на местное сжатие конструкций класса надежности RC 2 бетон класса по прочности на сжатие $C^{8/10}$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР.– М: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.– 80 с.
2. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы. Нормы проектирования / Госстрой СССР.– М: ЦИТП Госстроя СССР, 1987.– 199 с.
3. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М: ФГУП ЦПП, 2004. – 53 с.
4. Code-Modele CEB-FIP pour les structures en Beton. (Кодекс-образец ЕКБ-ФИП для норм по железобетонным конструкциям) – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. – 284 с.
5. ENV 1992-1-1:1992. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings – CEN, Brussels, 1991. – 176 pp.
6. EHE. Instruccion de Hormigon Estructural. – Madrid, 2008. – 360 p.
7. NBR 6118:2003. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (Design of structural concrete – Procedure). – ABNT, Rio de Janeiro, 2004. – 221 pp.
8. B4. Concrete Structures, guidelines of the National Building Code of Finland – Helsinki, 2005. – 83 pp.
9. DIN 1045-1:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion – 148 p.
10. EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – CEN, Brussels, 2004. – 225 p.
11. BBK 04. Boverkets handbok om betongkonstruktioner – 2004. – 271 p.
12. PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.– Warszawa, PKN, 2002. – 142 pp.
13. CEB-FIP Model Code 90. – London, Tomas Telford, 1998. – 462 pp.
14. GB 50010-2002. Code for Design of Concrete Structures. – Beijing, China Architecture & Building Press, 2002. – 204 pp.
15. Code 1/87. Iraqi Building Code Requirements for Reinforced Concrete. – Building Research Centre, Baghdad, 1987. – 68 pp.
16. IS 456:2000. Plain and Reinforced Concrete – Code of Practice. – New Delhi, Indian Bureau of Standard, 2000. – 107 pp.
17. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (318-08R). – American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2008. – 443 pp.
18. CIRSOC 201. Reglamento Argentino De Estructuras De Hormigon. – INTI, Buenos-Aires, 2002. – 518 p.
19. NZ 3101.1:2004 (draft). Concrete Structures Standard. – 2004. – 274 p.
20. SBK 304. Structural. Concrete Structures. – The Saudi Building Code National Committee, 2004. – 266 pp.
21. CSA A23.3-04. Design of concrete structures. – Canadian Standard Association, 2004. – 240 pp.
22. AS3600. Concrete structures. – Standards Australia, 2001. – 200 pp.
23. PN-76/B-03264. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.– Warszawa, PKN, 1977. – 64 pp.
24. BAEL 83. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. – Paris, 1984.
25. BAEL 91 révisé 99. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. – Paris, 1999. – 246 pp.
26. СНБ 5.03.01-02 Конструкции бетонные и железобетонные. / МАиС РБ.– Минск, 2003.– 140 с.
27. STR 2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. – Vinius., 2005.
28. ТКП 45-5.03-XX-20XX (02250) Бетонные и железобетонные конструкции. Часть 2. Общие правила проектирования ненапряженных конструкций из тяжелого бетона» (первая редакция). – 227 с.
29. СТБ ЕН 1990-2007 Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций. / МАиС РБ. – Минск, 2008.– 64 с.
30. Рак, Н.А. Совершенствование методики расчета бетонных элементов при местном сжатии с использованием банка экспериментальных данных / Н.А. Рак // Строительная наука и техника.– 2007. – № 5(14). – С. 84-90.
31. EN 206-1:2000. Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. – CEN, Brussels, 2000. – 72 p.
32. СТБ 1178-99. Колонны железобетонные для зданий и сооружений / МАиС РБ. – Минск, 2000.– 13 с.
33. prEN 13369:2003. Common rules for precast concrete products. – CEN, Brussels, 2003. – 64 p.
34. prEN 13225:2004. Precast concrete products – Linear elements. – CEN, Brussels, 2004. – 31 p.

Материал поступил в редакцию 07.04.09

RAK N.A. The generalized analysis of methods of account of concrete elements at local compression on domestic and foreign norms

In clause the classification of methods of account of durability of concrete elements is given at local compression used in the normative documents of the various countries. The estimation of conformity of methods of account to the valid character of the intense condition of concrete is given in the field of local compression. With use of bank of experimental data reliability of methods of account of durability of concrete elements is appreciated at local compression used in the normative documents of the various countries.

УДК 624.012

Тур В.В.

О РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТНЫХ СТРАТЕГИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ЗАЩИТУ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

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 [4–7, 9–14, 31–35]. 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), происшедшей в мае 1968 года, после ввода его в эксплуатацию. Причиной аварии, приведшей к прогрессирующему обрушению жилого здания, явился взрыв природного газа в кухне, расположенной на 18-ом этаже. По результатам работы

Тур Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, проректор по научной работе Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Беларусь, БрГТУ, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

Таблица 1. Некоторые наиболее распространенные определения термина "Прогрессирующее обрушение"

№ п/п	Страна	Нормативный документ	Определение
1	2	3	4
1	США	ASCE/SEI7-05 [15]	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 иницилирующим 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
1	США	US GSA [22] British Code [16] DoD UFC-4-023-4 [10]	– 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
2	ЕС	EC4: EN 1991-1-7 [48]	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
3	РФ	Рекомендации по защите монолитных зданий от прогрессирующего обрушения [3], Рекомендации [7]	"...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"
4	РБ	ТКП 45-3.02-108 [47]	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

комиссии был опубликован заключительный отчет [31], рекомендации которого, направленные на предотвращение прогрессирующего обрушения, были включены в нормы проектирования многих стран [3-7, 9-16, 18, 21-24], включая МГСН 4.19-05[7] и Рекомендации [3-6], утвержденные Москомархитектуры Правительства Москвы.

В табл. 1 представлены наиболее распространенные определения термина "прогрессирующее обрушение", включенные в нормативные документы различных стран.

Как видно из табл. 1, главным признаком прогрессирующего обрушения 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", некоторые авторы и нормативные документы предпочитают либо использовать термин "непропорциональное обрушение", либо вообще не акцентировать внимания на этом термине. Так, например, в евро-

пейской 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 [48] в рамках проверки живучести конструктивной системы в особой расчетной ситуации.

В исследованиях [49], опубликованных в начале 2009 г., 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 характеризуется как непропорциональное, если размеры области результирующего обрушения превышают *допустимые*, установленные соответствующими нормами, стандартам, рекомендациями. В силу этого, критерий непропорциональности может отличаться для различных стран (см. табл. 2) в зависимости от принятого *уровня допустимого риска* [25, 26].

Таблица 2. Критерии ограничения области результирующего обрушения в соответствии с требованиями нормативных документов различных стран

№ п/п	Страна	Нормативный документ	Критерий ограничения области локального разрушения	
			в горизонтальном направлении	в вертикальном направлении
1	2	3	4	5
1	Великобритания	BS5950-1:2000 [16]	менее 15 % от площади перекрытия и не более 100 м ²	уровень начального обрушения плюс один смежный уровень (этаж) вверх или вниз
2	Канада	NBCC 1977 [23]	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
3	США	NYC 1998,2003 [24]	менее 20 % площади перекрытия (покрытия) и не более 100 м ²	не более 3-х этажей
3	США	DoD-UFC-4-023-03 [10]	при удалении наружных элементов: разрушение перекрытия выше удаленного элемента не более 70 м ² и не более 15 % от общей площади перекрытия; при удалении внутренних элементов: не более 140 м ² или 30 % площади перекрытия	перекрытие, располагаемое под удаляемым элементом не должно разрушаться
		GSA 2003 [22]	не более 170 м ² непосредственно над удаленным наружным элементом или не более 330 м ² над удаленным внутренним элементом	уровень начального обрушения плюс один этаж вверх или вниз
4	ЕС	EN 1991-1-7 [48]	не более 70 м ² и 15 % для каждого из перекрытий двух смежных этажей при удалении наружной колонны	уровень начального обрушения плюс один смежный этаж вверх или вниз
5	РФ	МГСН 4.19-05 [7]	Повреждение в круге площадью не более 80 м ²	--/--
6	РБ	ТКП 45-3.02-108 [47]	при удалении наружных элементов: не более 70 м ² и не более 15 % от площади каждого из перекрытий двух смежных этажей; при удалении внутренних элементов: не более 140 м ² и не более 30 % от площади для каждого из перекрытий двух смежных этажей	уровень начального обрушения плюс один смежный этаж вверх или вниз

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

Не пускаясь 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 рас-

четных ситуациях могут реализовываться и другие механизмы, и сценарии распространения разрушений.

Коротко рассмотрим классификацию возможных типов прогрессирующего обрушения.

2. Классификация типов прогрессирующего обрушения.

Обобщая данные, приведенные в обзорной статье [44], характерные типы прогрессирующего обрушения (ПО) могут быть условно объединены в следующие классы:

- Класс А: ПО В результате перераспределения усилий в элементах конструктивной системы при выходе из строя (выключении) ее очередных элементов (сечений);
- Класс Б: ПО, реализуемое в результате трансформации потенциальной энергии в кинетическую (ударный механизм);
- Класс В: ПО в результате потери устойчивости положения (здания в целом) или формы (потеря устойчивости ключевых элементов (КЭ) конструктивной системы);
- Класс Г: ПО в результате реализации перечисленных выше сценариев (типов) обрушения в различных комбинациях. Как правило, каждый из перечисленных классов может быть дополнительно разделен на подклассы.

Так, характерным примером прогрессирующего обрушения подкласса А1, иногда называемого обрушением, ассоциируется с эффектом раскрывающегося "замка-молнии" (англ. "zipper-type collapse") может служить обрушение пролетного строения подвесного моста, вызванное последовательным разрывом соседних канатов. Наглядной иллюстрацией такого типа разрушения является последовательное выключение анкеров, крепящих конструктивный элемент к стене. При выходе из строя одного или нескольких анкеров происходит перераспределение усилий на другие анкера, что приводит к их последовательному выключению. Характерным признаком обрушения подкласса А1 является то, что направление воздействий и направления распространения разрушений перпендикулярны. Подкласс А2 характеризуется тем, что разрушения развиваются по направлению действия усилий.

В общем случае прогрессирующее обрушение класса А характеризуется следующими признаками:

- локальное внезапное разрушение одного или нескольких конструктивных элементов;
- перераспределение усилий, воспринимаемых ранее разрушенными элементами, на оставшиеся элементы конструктивной системы;
- импульсные нагружения в результате внезапности предшествующих отказов;
- динамический отклик элементов конструктивной системы на импульсные нагружения;
- концентрация усилий и отказ элементов, подобных по типу и функциональному назначению и расположенных рядом или в окрестности разрушенных ранее элементов от комбинации статических и динамических воздействий;
- распространение разрушений по направлению, перпендикулярному направлению действия усилия, приводящего к разрушению ключевого конструктивного элемента.

Характерным примером прогрессирующего подкласса Б1, относящегося к классу Б, является обрушение башен Всемирного торгового центра (WTC). В англоязычной технической литературе этот тип обрушения принято называть "pancake-type collapse" (реконструкция по статье Z. Bazant [43]). Механизм прогрессирующего обрушения класса Б характеризуется следующими признаками:

- начальное внезапное разрушение вертикальных несущих элементов;
- частичное или полное отделение части конструктивной системы и ее падение как одного жесткого тела на оставшиеся элементы конструктивной системы;
- трансформация потенциальной энергии в кинетическую;
- разрушение оставшихся вертикальных несущих элементов в результате внезапного приложения ударной нагрузки;
- распространение разрушений в вертикальном направлении.

Тип обрушения подкласса Б2, относящийся к классу Б, называют еще по-другому тип "домино" (англ. "domino-type" collapse). Механизм обрушения этого типа характеризуется следующими признаками:

- начальное опрокидывание одного элемента (как жесткого тела);
- падение этого элемента происходит при неизменной его форме (как жесткого тела) путем поворота вокруг точки, располагаемой на его нижней грани;
- трансформация потенциальной энергии в кинетическую;
- боковой удар падающего элемента по рядом расположенному элементу;
- опрокидывание соседнего элемента и дальнейшее распространение разрушений в направлении поворотов.

Появление ударных усилий указывает на подобие данного типа обрушений типу Б1. С другой стороны, в этом случае главные усилия в падающих элементах ортогональны направлению распространения обрушений.

При реализации обрушений класса В, связанных с потерей устойчивости, выделяют следующие характерные признаки:

- начальное обрушение элемента, который стабилизирует несущие сжатые элементы;
- потеря устойчивости сжатых элементов;

- внезапное обрушение дестабилизированных элементов из-за небольших отклонений (случай эксцентриситетов и начальных имперфекций);
- развитие цепи обрушений.

Более полно примеры прогрессирующих обрушений, относящихся к перечисленным классам, приведены в статье [44].

Предложенная условная классификация типов прогрессирующего обрушения может быть полезна при теоретической трактовке режимов (сценариев) обрушений, а так же при разработке системы соответствующих контрмер. Например, если тип Б1 обрушений может рассматриваться только в детерминистической постановке, то обрушение типа А1 можно исследовать применяя вероятностные подходы.

3. Основы стратегии управления рисками прогрессирующего обрушения.

Как следует из анализа работ [29, 30, 32–37], локальные разрушения (повреждения) могут быть инициированы целым рядом аномальных причин (событий), включая как человеческие ошибки, допущенные в процессе проектирования и возведения здания, так и события, которые могут иметь место (произойти с малой вероятностью) после его возведения в процессе эксплуатации, 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, к которым относятся взрывы (газа, бомбы и т. д.), удары транспортных средств (грузовика, самолета), крупномасштабные пожары, экстремальные климатические или другие аномальные природные воздействия не рассматриваются в рамках традиционного проектирования.

Подобная классификация идентифицированных и неидентифицированных особых воздействий приведена, например, в работе [46].

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:

$$P(F) = \sum P(F|DH_i)P(DH_i|H_i)P(H_i), \quad (3.1)$$

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 $P(F) \approx 10^{-7}/год$).

Одной 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 детона-

* Согласно [27] живучесть – это способность конструктивной системы сохранять свойства, необходимые для выполнения требуемых функций при наличии неблагоприятных воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, вызывающими повреждение (отказы) элементов системы.

ция) 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 ф. (3.1). 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 атаки). Проектная стратегия, направленная на обеспечение сопротивления локальному разрушению, сводится к минимизации вероятности $P(D/H_i)$. Как было показано ранее, эта стратегия может быть труднореализуемой (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 равна:

$$P(F) = P(F/DH_i)P(H_i). \quad (3.2)$$

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 неразрушимости и конструктивной целостности системы до полного расчета поврежденных 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 [28].

Базисные переменные, входящие в вектор X , представляют со-

бой стохастические величины, описываемые функциями распределения. Условную вероятность обрушения $P(F/DH_i)$ находят традиционным способом, интегрируя обобщенную (кумулятивную) функцию плотности вероятностей X для области $G(X) < 0$. Как было показано в работе [28], в целом ряде случаев воспользоваться традиционным подходом, основанном 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 [28] для оценки может быть использован т.н. обобщенный индекс надежности:

$$\beta = \mu_G / \sigma_G, \quad (3.3)$$

где μ_G и σ_G – среднее значение, и стандартное отклонение $G(X)$.

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

$$\beta = \Phi^{-1}[P(F/DH_i)] \quad (3.4)$$

или с учетом того, что $P(H_i) = \lambda_i T$, уравнение (1.12) принимает вид:

$$\beta = \Phi^{-1}[P(F)/\lambda_i T] \quad (3.5)$$

В соответствии с полученными решениями 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 (см. рис. 1).

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



*) низкая восприимчивость конструктивной системы к появлению особого воздействия

Рис. 1. Расчетные стратегии, применяемые при проектировании конструктивных систем в особых расчетных ситуациях

- защита конструктивной системы от эффектов особого воздействия путем снижения особых нагрузок, действующих на конструктивные элементы при устройстве защитных экранов, облочек, барьеров безопасности и т.д.;
- обеспечение необходимой минимальной живучести конструктивной системы с учетом выполнения одного или более из следующих действий:

(а) проектирование выявленных ключевых элементов конструктивной системы из условия восприятия особых нагрузок;

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

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

4. Классификация конструктивных систем по последствия наступления прогрессирующего обрушения. 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, отнести 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 табл. 3.

Рекомендуемые стратегии защиты конструктивных систем от наступления прогрессирующего обрушения для установленных классов в зависимости от прогнозируемых последствий обрушения представлены в табл. 4 и могут быть систематизированы в общем виде:

(а) для зданий класса 1 конструктивная система должна быть рассчитана и законструирована 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 во 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, например, в [48] (единовременно только один элемент для каждого этажа здания), здание сохраняет стабильность, не подвергаясь обрушению, и что любое локальное разрушение не превышает установленных пределов.

Если в результате расчета установлено, что при вынужденном удалении колонн или стен размеры области разрушений превышают установленные граничные значения, удаляемые конструктивные элементы (КЭ) 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 неидентифицированные угрозы. Базовые положения по анализу рисков представлены в разделе 7 и приложении А настоящих Рекомендаций [48].

5. О применимости расчетных методов, содержащихся в актуальных нормах, к проблеме прогрессирующего обрушения. Следует отметить, что подходы, содержащиеся в актуальных нормах

Таблица 3. Категории (классы) зданий и сооружений по последствиям обрушения

Класс		Примеры категорий зданий
1		2
1	$RF < 0,7^*$	Отдельно стоящие жилые дома не более 4-х этажей. Сельскохозяйственные здания. Здания, редко посещаемые людьми, у которых части здания 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 ² 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 ² , но не более 5000 м ² 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 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.

Таблица 4. 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 ² 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 (КЕ)
3	Выполняется систематическая оценка риска для здания, принимаемая для анализа как явные, так и неявные угрозы

проектирования конструкций не вполне применимы при идентификации условий наступления прогрессирующего (непропорционального) обрушения. Анализ, выполненный в работе [46], показал, что можно назвать, по меньшей мере, три основных причины ограниченного применения положений норм:

1. Первая причина заключена 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, определяемых как "системы со сниженной или отсутствующей живучестью", приведет к небезопасным результатам при проектировании.

2. 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 [30] такие упрощения являются необходимой мерой, т.к. статистические данные, полученные из опытов и наблюдений, например, для особых воздействий, практически отсутствуют, и поэтому их моделирование связано с большой неопределенностью. Однако в случае т.н. "неживучих" конструктивных систем такие упрощения становятся недопустимыми.

3. 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. Как видно из анализа, представленного в настоящей статье, в основной стратегии, направленные на защиту конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, концентрируют внимание на трех основных положениях: (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.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. - Мн.: Типпроект, 2003. - 237с.
2. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия. М.: Стройиздат, 1985-79с.
3. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. Москомархитектура. - М.: ГУП НИАЦ, 2005. - 71с.
4. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Москомархитектура. - М.: ГУП НИАЦ, 1999. - 55с.
5. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. Москомархитектура. - М.: ГУП НИАЦ, 2002. - 14с.
6. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения/ Москомархитектура.-М.: ГУП НИАЦ, 2006. - 60с.
7. МГСН 4.19-05. Проектирование высотных зданий- М.: ГУП НИАЦ, 2002 - 97с.
8. СТБ ИСО 2394 (ISO 2394). Общие принципы обеспечения надежности строительных конструкций (проект)- Мн.: Бел НИИС, 2007. - 97с.
9. New York City Code (NYC), 1993.
10. UFC-4-023-03 (Unified Facilities Criteria) – Design of Building to Resist progressive collapse, January, 2005.
11. UFC3-340-01 Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effect, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.
12. UFC 4-010-01 DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.

13. ASI 318-02, Building Code, Requirements for Structural Concrete, P. O. Box 9094, Farmington Hills, 2002.
14. ASI 318-05, Building Code, Requirements for Structural Concrete, ACI, Farmington Hills, Michigan - 2005.
15. ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, Reston, VA 20191-4400, 2000.
16. BS5950-1:2000 Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Construction, 389 Cheswick High Road, London W4 4AL, 1998.
17. 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.
18. EN 1990:2001. Eurocode – Basis of structural design.
19. ENV 1991-1: Eurocode 1 – Actions on Structures, Part 1 – Basic of Design, Brussels, Belgium, 2003.
20. Probabilistic Model Code (12th Draft): Part1 – Basis of Design – Joint Committee of Structural Safety – JCSS – OSTL/DIA/VROU – 10-11-2000. – 57 p.
21. Swedish Board of Housing, Building and Planning – Boverket, 1994, Handbook on Vibration, Induced Deformations and Accidental Loads.
22. General Services Administrations (GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Projects; 2003.
23. National Building Code of Canada (NBCC), part 4, Commentary C, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1985.
24. PCI Committee on Precast Concrete Bearing Wall Building to Withstand Abnormal Loads” PCI Journal, vol. 21., №2, March-April, p. p. 18-51.
25. Перельмутер А. В. О нормировании уровня риска// Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – N2/14(530), апрель – июнь 2007 г – с. 160-169.
26. Перельмутер А. В. Влияние неопределенности исходных данных на оценку проектных решений/ www. SCAD. Soft/
27. Кудишин Ю., Дробот Д. Живучесть конструктивных систем в аварийных ситуациях// Металлические здания, №1, 2008.
28. Тур В. В., Марковский Д. М. Назначение испытательных коэффициентов по результатам статического моделирования// Строительная наука и техника. №5(9), 2006.
29. Д. Д. Сергеев. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне. Обзорная информация №2. М., ГлавАПУ, 1969.
30. Разработка и исследование усовершенствованной системы конструктивных связей между сборными элементами панельных зданий унифицированной конструкции с целью повышения их надежности и улучшения технико-экономических характеристик. Научно-технический отчет МНИИТЭП, шифр НИ-1696М, 1976.
31. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town; MSO, 1968 (НИИС, перевод 18736).
32. Ellingwood B. R. Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design/ Georgia Institute of Tehnology, Atlanta, USA, 2005.
33. Ellingwood B. R., Leyendecker E. V., Approaches for Design against Progressive Collapse/ J. Struct. Div., ASCE 104 (3); 1978: p. 413-423.
34. Ellingwood B. R. Acceptable rick bases for design of Structures/ Progress in Struct. Engrg. and Mat., 2001, 3(2): 170-179 p.
35. Stewart, M. G., Melchers R., E. Probablistic risk assessment of engineering system/ Chapman Hall, London, 1997.
36. Starossec U., Wolf M., Design of Collapse – resistant structure, ICSS and IA BSE Workshop on Robustness of Structure, 2005.
37. 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.
38. Milchers, R. E., Structural reliability – analysis and prediction, John Wiley, 1999.
39. National Workshop on Prevention of Progressive Collapse, the UK and European Regulation for Accidental Actions, D. B. Moore, 2002.
40. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings/ NISTIR/ B. R. Ellingwood, R. Smilowitz, D. Dusenberry, D. Duthinh, August, 2006.
41. Wolinski S. Analiza ryzyka a niezawodnosc konstrukcji budowlanych/ Inzynieria i Budownictwo, №5, 2006 – p. p. 270-274.
42. Li H. X., Yen C. V.: Fuzzy sets and fuzzy decisions – making. CRC Press, Boca Raton, New York, 1995.
43. Bazant Z. Why did the World Trade Center Collapse – Symple Analysis/Journ. Of Engineering Mechanics/January 2002, vol. 128, №1.
44. Тур В.В., Тур А.В., Марковский Д.М. Основы проектных стратегий, применяемых для защиты зданий от прогрессирующего обрушения // Строительная наука и техника.– 2007.– № 6.– с. 11–27.
45. Park S., Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure/ S. Parl, S. Choi, C. Sikorsky, N. Stubbs // International Journal of Solids and Structures.– 2004.– № 41.– p. 4035–5050.
46. Starossek U. Typology of progressive collapse/ U. Starossec // Engineering Structures.– 2007.– vol. 29.– № 9.– pp. 2302–2307.
47. ТКП 45–3.02–108–2008. Высотные здания. Строительные нормы проектирования.– Мн.: Типпроект, 2008.– 178 с.
48. EN 1991–1–7. General Actions – Accidental Actions.
49. Vlassis G. Progressive collapse assessment of tall buildings/ London, 2009.– 416 p.

Материал поступил в редакцию 09.04.09

TUR V.V. Design strategies for defense of structural systems against progressive collapse

This paper present design strategies for defense of structural systems against progressive collapse. Writing classification of progressive collapse types, terms and definitions and classification of buildings.

УДК 624.012

Узунова Л.В.

МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРОЙ

Введение. Задача определения текущего напряженно-деформированного состояния конструкций является важной и актуальной при определении напряжений в бетоне и арматуре как при кратковременном, так и длительном нагружении в процессе оценки состояния эксплуатируемых сооружений, а также при решении вопроса о реконструируемых сооружениях, а также при решении вопроса о реконструкции, когда ожидается увеличение действующей нагрузки, например, при изменении объема здания за счет надстройки или пристройки. Рекомендуемая действующим СНиП методика расчета не позволяет выявить динамику изменения параметров напряженно-деформированного состояния сечений в зависимости от

характера внешних воздействий и особенностей развития неупругих деформаций бетона в состоянии, далеком от разрушения. Установлено, что длительное действие нагрузки существенно влияет на распределение внутренних усилий в бетоне и арматуре. Более того, даже при кратковременной эксплуатационной нагрузке напряженно-деформированное состояние сечений, определенное без учета быстро протекающих деформаций ползучести, не может достоверно отразить фактическую картину распределения усилий между бетоном и арматурой. Использование традиционных для упругих материалов способов определения напряжений, дополненных учетом

Узунова Л.В., доцент ФГОУ ВПО Калининградского государственного технического университета.
Россия, 236000, Калининград областной, Советский просп., 1.