

Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 153–158.

Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 153–158.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 624.075

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158

Прогрессирующее обрушение: факты, возможные причины, оценка методов анализа по расходу материалов

Абдуллах Хуссейн (Екатеринбург). Кафедра САПР объектов строительства Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19. УрФУ). Эл. почта: hussein.abdallah.1996@gmail.com

Алехин Владимир Николаевич (Екатеринбург). Кандидат технических наук, доцент. Кафедра САПР объектов строительства Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19. УрФУ). Эл. почта: referetsf@yandex.ru

Плетнёв Максим Валерьевич (Екатеринбург). Кандидат технических наук. Кафедра САПР объектов строительства Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19. УрФУ). Эл. почта: pletnev.mv@yandex.ru

Аннотация. В этой статье представлен обзор причин, механизмов и последствий прогрессирующего обрушения конструкций. В статье также обсуждаются различные стратегии проектирования и меры по смягчению последствий, которые можно использовать для предотвращения или минимизации риска прогрессирующего обрушения в соответствии с различными спецификациями и стандартами. Также в статье будут описаны некоторые примеры отказов и причин, приведших к полному или частичному обрушению конструкций, будет проведён сравнительный анализ различных методов расчёта на основе трёхмерной численной модели 11-этажного здания с металлическим каркасом, их оценка с точки зрения расхода материалов.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, металлические конструкции, жёсткость, устойчивость конструкций, Лира-софт

Для цитирования. Абдуллах Х., Алехин В.Н., Плетнёв М.В. Прогрессирующее обрушение: факты, возможные причины, оценка методов анализа по расходу материалов // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 4. – С. 153–158. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158.

Progressive Collapse: Facts, Potential Causes, Evaluation of Analysis Methods by Materials Consumption

Abdullah Hussein (Ekaterinburg). Department of CAD Systems in Civil Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin (620002, 19 Mira street, Ekaterinburg, Russia. UrFU). E-mail: hussein.abdallah.1996@gmail.com

Alekhin Vladimir N. (Ekaterinburg). Candidate of Sciences in Technology, Professor. Department of CAD Systems in Civil Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin (620002, 19 Mira street, Ekaterinburg, Russia. UrFU). E-mail: referetsf@yandex.ru

© Абдуллах Х., Алехин В.Н., Плетнёв М.В., 2023.

Статья написана по материалам доклада на VIII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Россия, Тамбов, 17–21 мая 2023 года

Pletnev Maxim V. (Ekaterinburg). Candidate of Sciences in Technology, Professor. Department of CAD Systems in Civil Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, 19 Mira street, Ekaterinburg, Russia. UrFU). E-mail: pletnev.mv@yandex.ru

Abstract. This article provides an overview of progressive collapse in structures, including its causes, mechanisms, and consequences. The article also discusses various design strategies and mitigation measures that can be employed to prevent or minimize the risk of progressive collapse according to different specifications and standards. Also, the article will provide some examples of this kind of failure and the causes which led to full or partial collapse of the structures. Finally, will be carried out comparative analysis of various analysis methods based on a 3D numerical model for a 11-story steel structure, their evaluation by materials consumption.

Keywords: progressive collapse, steel structures, rigidity, stability of structures, Lira soft

For citation. Abdullah H., Alekhin V.N., Pletnev M.V. Progressive Collapse: Facts, Potential Causes, Evaluation of Analysis Methods by Materials Consumption. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 4, pp. 153–158, doi: 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158.

Введение

Интерес к прогрессирующему обрушению возник после знаменитого обрушения в 1968 году здания «Ронан Пойнт» (Ronan Point) (рис. 1), построенного из сборного железобетона. Оно частично обрушилось после взрыва газа на кухне 18-го этажа. Взрывом вынесло наружную стеновую панель, затем обрушение распространилось вверх на крышу и вниз почти до уровня земли.

После обрушения этого здания некоторые страны, таких как Великобритания и Канада, были приняты нормативные документы для предотвращения прогрессирующего обрушения. В 1976 году Британский строительный кодекс требовал, чтобы степень обрушения здания не превосходила (была соразмерна) первопричину. Нормативно-правовые акты требуют, чтобы проектируемые здания выдерживали непропорциональные отказы за счёт соединения элементов конструкции, добавления избыточных элементов и предполагаемые аномальные нагрузки. Считается, что учёт этих требований обеспечивает создание более прочных и пластичных конструкций, способных перераспределять нагрузки.

В 1980-е годы стандарты проектирования США (American National Standards Institute ANSI 1982) начали включать требования «общей структурной целостности», чтобы обеспечить номинальную устойчивость к прогрессирующему разрушению. В настоящее время типовые строительные нормы и стандарты США не содержат конкретных положений, обеспечивающих устойчивость к прогрессирующему обрушению. Однако некоторые стандарты на строительные материалы, такие как ACI 318 (ACI 2005 American Concrete Institute) и Руководство PCI Precast/Prestressed Concrete Institute для сборных железобетонных зданий с несущими стенами (PCI 1976 Precast/Prestressed Concrete Institute), содержат положения о минимальных уровнях структурной целостности.

Ещё одним известным случаем прогрессирующего обрушения сооружений, вызвавшим новую волну исследований в области надёжности зданий и сооружений и сделавшим более

популярным термин «прогрессирующее обрушение», является событие, произошедшее 11 сентября 2011 года в США – разрушение зданий Всемирного торгового центра в Нью-Йорке, произошедшее из-за теракта (рис. 2). Результатом анализа этих событий стала разработка дополнительных требований к надёжности зданий и сооружений и соответствующих рекомендаций по расчёту и проектированию [1].

Сравнение российских и зарубежных норм проектирования для защиты от прогрессирующего обрушения

Первым нормативным документом Российской Федерации, установившим чёткие границы рекомендаций и необходимость расчётов на прогрессирующее обрушение, стал Федеральный закон № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»¹. Данным нормативным актом впервые вводится понятие механической безопасности зданий, определяющее её как «состояние строительных конструкций и основания здания

¹ <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/>.

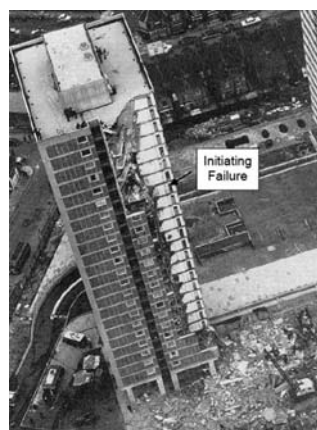


Рис. 1. Обрушение здания Ronan Point (источник: [1])



Рис. 2. Момент столкновения самолета UA-175 с WTC 2 (источник: [1])

или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений вследствие разрушения или потери устойчивости здания, сооружения или их части», и устанавливаются общие условия соблюдения требований механической безопасности строительных конструкций, полностью соответствующих основным принципам Градостроительного кодекса Российской Федерации, а также необходимость принятия специальных мер, в том числе по выбору материалов и конструктивных решений, не приводящих к прогрессирующему обрушению в аварийной ситуации, указаны в [I–III].

Основные положения по проектированию зданий и сооружений различных конструктивных систем для обеспечения их защиты от прогрессирующего обрушения рассмотрены в действующем СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Нормы проектирования. Основные положения» [IV].

В зарубежных нормативных документах расчёт на прогрессирующее разрушение обязателен. Одними из действующих норм, согласно которым в США осуществляется проектирование зданий, устойчивых к прогрессирующему обрушению, являются UFC 4-023-03 «Унифицированные критерии сооружений. Проектирование зданий, устойчивых к прогрессирующему обрушению» [V] и GSA «Альтернативный путь». Руководство по анализу и проектированию для защиты от прогрессирующего обрушения» [VI]. Сфера применения UFC – это в основном объекты Минобороны и

других правоохранительных органов, GSA – федеральные административные здания и крупные проекты модернизации. В UFC 2016 конструкции делятся на четыре группы риска. В ASCE 7-16 [VII] категории риска зависят от количества людей, чья жизнь может оказаться под угрозой или чьё благополучие пострадает в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Великобритания была первой страной, включившей в свои стандарты положение о прогрессирующем обрушении. Необходимость в такого рода правилах возникла после частичного обрушения здания «Ронан-Пойнт». Общая информация о том, как спроектировать конструкцию, не подверженную прогрессирующему обрушению, приведена в BS 6399 [VIII], а конкретные положения для стальных, бетонных и каменных конструкций приведены в BS 5950 [IX], BS 8110 [X] и BS 5628 [XI] соответственно.

В таблице 1 показаны некоторые сравнительные аспекты анализа прогрессирующего обрушения по российским и американским нормам.

Сравнение методов расчёта по СП 385 и GSA (UFC) по расходу материалов

Для экспериментальной части была построена трёхмерная полномасштабная конечно-элементная модель 11-этажного здания с металлическим каркасом и композитными стальными перекрытиями (рис. 3). Анализ выполнен в программе Лира нелинейным статическим методом (квазистатическим).

Для нелинейного анализа были применены нелинейные свойства материалов для стали S345 и бетона B25 с арматурными стержнями из стали A500.

Таблица 1. Сравнение российских и американских норм проектирования

Отдельные показатели норм проектирования	Нормативный документ		
	UFC	GSA	СП 385
Уровень защиты от прогрессирующего обрушения	RC I RC II RC III RC IV	FSL I и II FSL III и IV FSL V	KC-1 KC-2 KC-3
Методы расчета	– линейный статический – нелинейный статический – нелинейный динамический		– кинематический – квазистатический – динамический
Место отказа	Наружные колонны/стены: средние по длинной стороне, средние по короткой стороне, угловые. Внутренние колонны/стены: средние по длинной стороне, средние по короткой стороне, угловые на любом этаже.		конкретного указания нет. (на любом этаже)
Нагрузка для статического расчёта	LIF или DIFx (1,2 D+0,5 L или 0,2 S) для площадей пола над удалённой колонной или стеной (1,2 D+0,5 L или 0,2 S) – для участков пола, удалённых от удалённой колонны или стены		(1,0D+0,5S+0,35L) – для всей конструкции
Нагрузка для динамического расчёта	1,2 D +(0,5 L или 0,2 S) - для всей конструкции		не регламентируется (используется комбинация для статического расчёта)

Модель включает нелинейное геометрическое поведение и нелинейные характеристики материала. Свойства материалов всех компонентов конструкционной стали моделировались с использованием модели упруго-пластического материала из СП 16.13330.2017 [XII]. Согласно СП 385.1325800.2018, включение нелинейности материала в модель программы Ли́ра требует использования зависимости истинного напряжения от пластической деформации, это должно быть определено из зависимости напряжение–деформация. Предполагается, что зависимость напряжения от деформации при сжатии и растяжении для стали одинакова. Классическая модель пластичности металлов определяет поведение после достижения предела текучести для большинства металлов. Ли́ра аппроксимирует плавное поведение материала при напряжении–деформации серией прямых линий, соединяющих заданные точки, определяющие данные, чтобы имитировать фактическое поведение материала.

Можно использовать любое количество точек. Таким образом, можно получить близкое приближение к реальному поведению материала. Материал будет вести себя как линейно-эластичный вплоть до достижения предела теку-

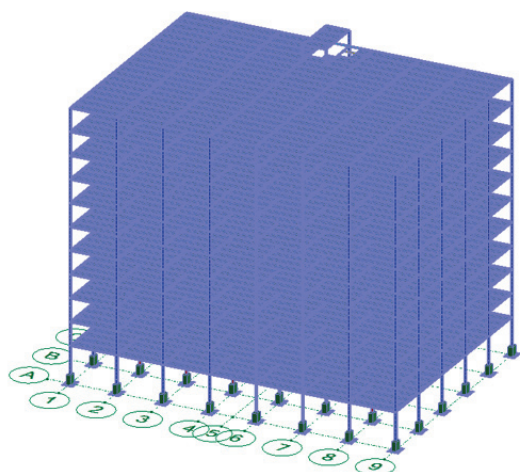


Рис. 3. Трёхмерная модель, используемая для расчёта на прогрессирующее обрушение. Рисунок авторов статьи

чести материала. После этого этапа он переходит в стадию деформационного упрочнения до достижения предельного напряжения (рис. 7).

Бетон был смоделирован с использованием модели пластичности бетона. Прочность на сжатие принималась номинальной – 18,5 МПа. Кривая текучести при сжатии принята как для типового бетона из СП 63.13330.2018 [XIII]. Напряжение растрескивания при растяжении принималось равным номинальному значению 1,55 МПа. После растрескивания при растяжении соотношение напряжение–деформация при растяжении смягчается, поскольку предполагается, что нагрузка передаётся на арматуру. Предел прочности бетона при растяжении после пластического растрескивания бетона не учитывается.

Согласно приложению Б СП 385 [IV], коэффициент динамического увеличения равен 2. Однако GSA рекомендует рассчитывать это значение по таблице № 5.

Для проведения расчёта было решено рассмотреть следующие сценарии отказов:

- удалена наиболее нагруженная колонна первого этажа по оси 2/Е (рис. 4).
- удалена наиболее нагруженная угловая колонна первого этажа по оси 1/А (рис. 5).
- удалена наиболее нагруженная колонна в районе середины длинной стороны первого этажа по оси 3/А (рис. 6).

Результаты

Результатами расчёта является определение усилий, моментов перемещения и мест образования пластических шарниров, которые не были выявлены в трёх сценариях обрушения. Результаты расчёта для каждого сценария обрушения представлены в таблице 2 и сравниваются со значениями первичной схемы (до разрушения).

Вывод

С помощью программного комплекса Ли́ра на примере трёхмерной модели с использованием нелинейного статического метода было показано поведение многоэтажных зданий при мгновенном удалении колонн. Модель учитывает

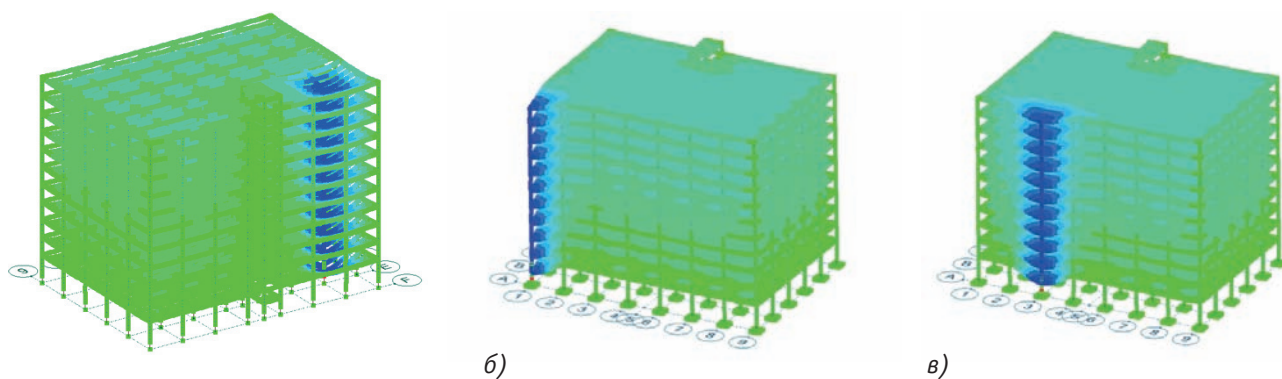


Рис. 4. Деформация конструкции: а) после первого сценария отказа; б) после второго сценария отказа; в) после третьего сценария отказа. Рисунок авторов статьи

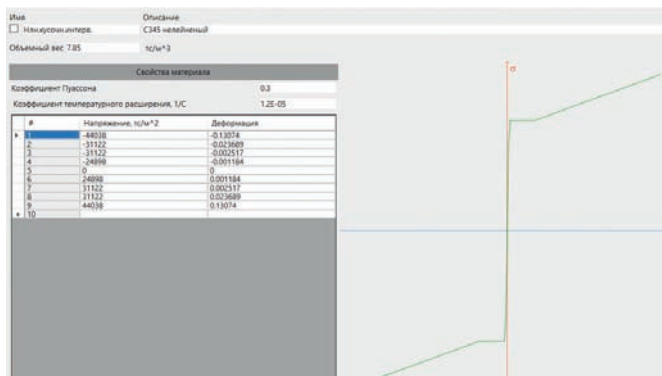


Рис. 5. Принимаемые свойства стали С345 в программном комплексе Лира

нелинейные характеристики материала и нелинейное геометрическое поведение.

Результаты показывают, что использование Руководства GSA [VI] даёт более экономичное решение для расчёта на прогрессирующее обрушение по сравнению с СП 385 [IV]. Можно сделать вывод, что расчёт по Руководству GSA обеспечивает значительную экономию материалов, так как значения результатов меньше, что свидетельствует о перерасходе материала.

Более того, было отмечено, что при расчёте на прогрессирующее обрушение особое внимание уделяется коэффициенту динамического увеличения (динамическому коэффициенту).

В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют нормы, обосновывающие значение динамического коэффициента, чтобы его можно было принять в качестве исходных данных при расчёте. А так как коэффициент нигде не регулируется, определить его значение становится затруднительно.

Таким образом, анализ по Руководству GSA [VI] с использованием нелинейного статического метода даёт меньшие значения коэффициента динамического увеличения (динамического коэффициента) для различных сочетаний жёсткости сечения, которые были определены, – он не превышал значения 1,76. Из этого следует, что коэффициент динамического увеличения равный 2 (который используется в СП 385) показывает неточный результат – перерасход материалов.

Список нормативных источников и документов

I. [ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2015.

II. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. – Москва : Минстрой России, 2017.

III. СП 267.1325800.2016 Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. – Москва : Минстрой России, 2016.

IV. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – Москва : Минстрой России, 2018.

V. UFC 4-023-03 (Including Change 3, 2016) Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse.

VI. GSA "Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance". – October 2016.

VII. ASCE standard. SEI/ASCE 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Washington, DC: American Society of Civil Engineers; 2016.

VIII. BS 6399, Part 1. Loading for buildings – Part 1: Code of Practice for Design and Construction. – London : British Standards Institution, 1996.

IX. BS 5950. Structural use of steelwork in building: Code of Practice for Design and construction. – London : British Standards Institution, 1990.

X. BS 8110, Part 1. Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction. – London : British Standards Institution, 1997.

XI. BS 5628. Code of practice for use of masonry: Code of practice for design and construction. – London : British Standards Institution, 1992.

XII. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Москва : Минстрой России, 2017.

XIII. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / ОАО «НИЦ «Строительство». – Москва, 2018.

Список источников

1. Bruce, R. Ellingwood. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings / Bruce R. Ellingwood, Robert Smilowitz, Donald O. Dusenberry, Dat Duthinh [et al.]. – U.S. Department of Commerce, 2007.

2. World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 403 /May 2002, New York.

3. Roytman, V.M. The Concept of Evaluation of Building Resistance against Combined Pazardous Effects "Impact-

Таблица 2. Результаты расчёта

Сценарий	Первичная схема			GSA(UFC)			СП 385		
	№1	№2	№3	№1	№2	№3	№1	№2	№3
$N_{max}, т$	210,67	216,07	210,95	344,93	224,2	261,65	393,68	239,59	286,94
M_{max} в колонне, т.м	1,27	1,27	1,26	5,66	1,87	2,53	7,38	3,21	3,01
M_{max} в балке, т.м	2,77	2,78	2,78	19,29	9,71	11,99	23,17	10,95	13,99
перемещения Z, мм	5,57	5,49	4,99	44,4	36,98	35,21	48,9	40,05	39,28

Explosion-Fire" after Aircraft Crash / V.M. Roytman, H.J. Pasman, I.E. Lukashevich. – Текст : непосредственный // Fire and Explosion Hazards : Proceedings of the Fourth International Seminar, 2003. – Londonderry, NI, UK, pp. 283–293.

4. *Abruzzo, J.* Study of Mitigation Strategies for Progressive Collapse of a Reinforced Concrete Commercial Building / J. Abruzzo, A. Matta, G. Panariello. – Текст : электронный // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2006. – № 20 (4). – P. 384–390. – URL: https://www.researchgate.net/publication/239388140_Study_of_Mitigation_Strategies_for_Progressive_Collapse_of_a_Reinforced_Concrete_Commercial_Building (дата обращения 16.10.2023).

5. *Agarwal, J.* Vulnerability of Structural Systems / J. Agarwal, D. Blockley, N. Woodman. – Текст : электронный // Structural Safety. – 2003. – № 25. – P. 263–286. – URL: https://www.researchgate.net/publication/222334967_Vulnerability_of_structural_systems (дата обращения 16.10.2023).

6. *Agnew, E.* Dynamic Analysis Procedures for Progressive Collapse / E. Agnew, S. Marjanishvili. – Текст : электронный // Structure magazine. – 2006. – P. 24–27. – URL: https://www.researchgate.net/publication/288863166_Dynamic_analysis_procedures_for_progressive_collapse (дата обращения 16.10.2023).

7. *Baker, J.W.* On the Assessment of Robustness / J.W. Baker, M. Schubert, M.H. Faber. – Текст : электронный // Structural Safety. – 2008. – № 30. – P. 253–267. – URL: https://www.researchgate.net/publication/222334967_Vulnerability_of_structural_systems (дата обращения 16.10.2023).

References

1. Bruce R. Ellingwood Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings / Bruce R.

Ellingwood, Robert Smilowitz, Donald O. Dusenberry, Dat Duthinh, H.S. Lew, Nicholas J. Carino. – U.S. Department of Commerce, 2007. (In Engl.)

2. World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 403 / May 2002, New York. (In Engl.)

3. Roytman V.M., Pasman H.J. and Lukashevich I.E. The Concept of Evaluation of Building Resistance against Combined Hazardous Effects "Impact-Explosion-Fire" after Aircraft Crash. In: *Fire and Explosion Hazards*, Proceedings of the Fourth International Seminar, 2003. Londonderry, NI, UK, pp. 283–293. (In Engl.)

4. Abruzzo J., Matta A., and Panariello G. Study of Mitigation Strategies for Progressive Collapse of a Reinforced Concrete Commercial Building. In: *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006, no. 20 (4), pp. 384–390 (Accessed 10/16/2023). (In Engl.)

5. Agarwal J., Blockley D. and Woodman N. Vulnerability of Structural Systems. In: *Structural Safety*, 2003, no. 25, pp. 263–286. URL: https://www.researchgate.net/publication/222334967_Vulnerability_of_structural_systems (Accessed 10/16/2023). (In Engl.)

6. Agnew E., Marjanishvili S. Dynamic Analysis Procedures for Progressive Collapse. In: *Structure Magazine*, 2006, pp. 24–27. https://www.researchgate.net/publication/288863166_Dynamic_analysis_procedures_for_progressive_collapse (Accessed 10/16/2023). (In Engl.)

7. Baker J.W., Schubert M., Faber M.H. On the Assessment of Robustness. In: *Structural Safety*, 2008, no. 30, pp. 253–267. URL: https://www.researchgate.net/publication/222334967_Vulnerability_of_structural_systems (Accessed 10/16/2023) (In Engl.)