

Проектирование многоэтажных зданий с металлическим каркасом для повышения их сопротивления прогрессирующему обрушению

Н.А. Басалаев

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: Прогрессирующее обрушение - или, в частности, понимание механики данного явления и разработка способов его учета в рамках проектирования конструкций - можно расценивать как относительно новую тему в строительной науке. В статье рассмотрены предпосылки возникновения данной темы, начиная от локальных примеров обрушения зданий и заканчивая общеизвестным обрушением Всемирного Торгового Центра. Проанализированы новейшие мировые исследования в данной области и выявлены противоречия в требованиях нормативной документации и реальной работы каркаса здания при прогрессирующем обрушении.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, живучесть, стальной каркас, многоэтажные здания, жесткость узлов, податливость.

Введение

Развитие строительной науки, как и многих других, носит эволюционный характер. Появление новых материалов и технологий, поиск новых методик расчета является следствием все более требовательных запросов общества. Особенно это проявляется после аварий в зданиях, происходивших из-за обстоятельств, ранее не рассматривавшихся в строительной науке.

До разрушения «Ронан Поинт» в Лондоне в 1968 году, термины живучесть, прогрессирующее обрушение и другие не были частью лексикона инженера-проектировщика. Последствия ущерба, нанесенного этому 22-этажному панельному зданию из-за небольшого взрыва на 18-м этаже, привели к появлению новых положений в строительных нормах Великобритании, запрещающих панельное строительство на многие годы, к сносу нескольких завершенных зданий, временному удалению газа в высотном строительстве и формированию «комитета по безопасности зданий». В конце концов, были признаны преимущества должным образом спроектированных панельных зданий и были разработаны безопасные

методы установки газа, таким образом строительная наука продвинулась на уроках из аварии. Однако руководства по проектированию, подготовленные в то время, которые по-прежнему лежат в основе нынешних положений, являются по существу предписывающими по своему характеру без реальной связи с фактической работой каркаса.

Последующие случаи прогрессирующего обрушения, такие как здание Мэрраг и башни Всемирного Торгового центра, привлекли повышенное внимание к фактическому учету данного явления и к вопросам о том, как его можно разумно предотвратить в тех зданиях, где это считается целесообразным. При этом, конечно же, необходимо включать в расчет как риск инициирующего обрушение инцидента, так и возможные последствия данного инцидента, что накладывает более жесткие требования к конструкции. Несомненно, непропорциональное увеличение сложности и стоимости здания в случаях, когда риски/последствия очень низки или незначительны, может быть столь же некорректным, как и отказ от рассмотрения тех случаев, когда риски/последствия являются серьезными.

В этой статье рассмотрены современные подходы к проектированию многоэтажных зданий со стальным каркасом, для предотвращения прогрессирующего обрушения, используемые в зарубежной и российской практике. Рассмотрена новая методика, разработанная в Imperial College London, целью которой было нахождение простого, отражающего реальную работу конструкции метода, более подходящего для использования в процессе проектирования. Показаны существенные особенности метода, его использование в нескольких примерах, описаны и представлены результаты, чтобы проиллюстрировать, как это ведет к лучшему пониманию как механики прогрессирующего обрушения, так и путей, которыми инженеры-конструкторы могут наилучшим образом обеспечить конструкциям требуемое сопротивление прогрессирующему обрушению.

Проектирование здания на сопротивление прогрессирующему обрушению.

Имеется два наиболее часто используемых подхода к проектированию, предназначенные для решения проблемы живучести зданий:

- Обеспечение достаточных связей между элементами;
- Проверка альтернативных путей распространения нагрузок.

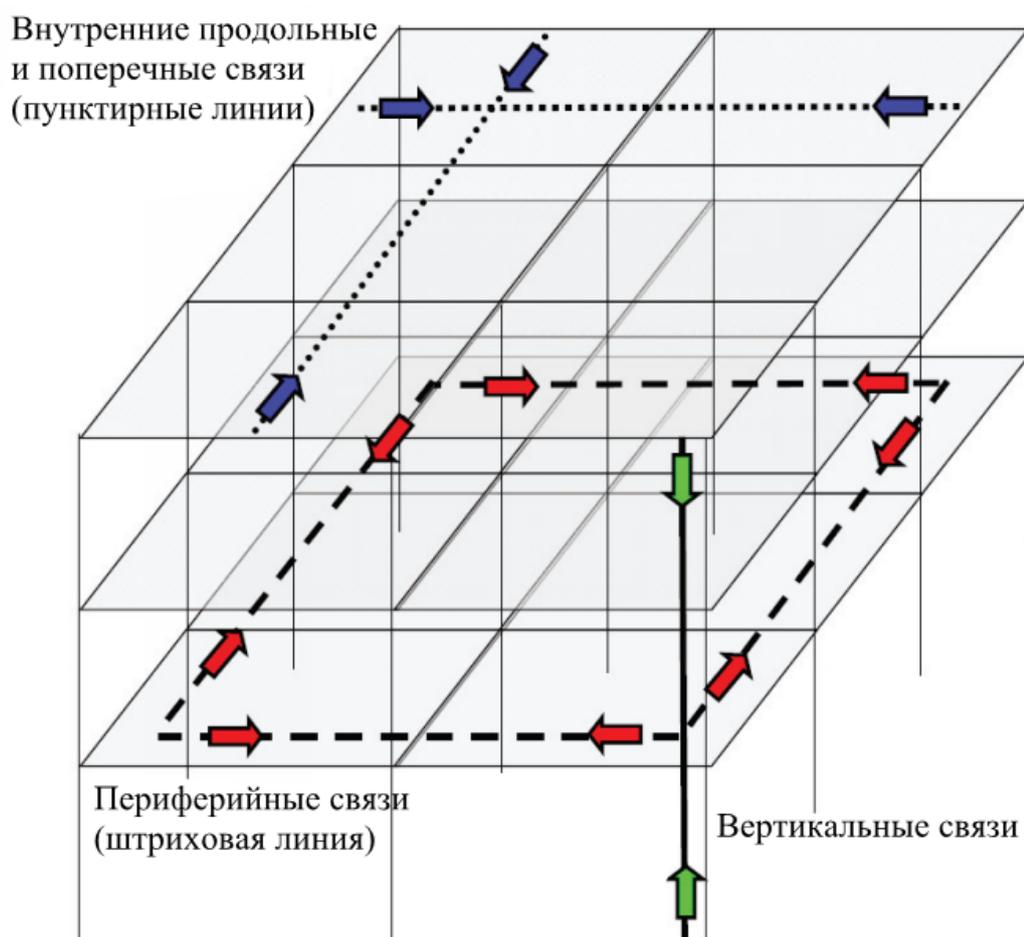


Рис. 1. – Направления усилий в каркасе здания

Первый подход по существу является предписывающим и состоит в том, чтобы балки, колонны, узлы и перекрытия (или покрытие) могли работать совместно, для обеспечения минимального необходимого сопротивления растягивающим усилиям в элементах, для которых требуется фактическое сопротивление в зарубежных руководствах обычно связано с вертикальной нагрузкой. Рисунок 1[1], иллюстрирует принцип данного

подхода. Этот подход прост для понимания, требует минимальных дополнительных расчетов и в ситуациях, когда изначальное решение не удовлетворяет требованиям, можно добиться работы конструкции путем обеспечения более существенных связей в узлах и/или дополнительным армированием в плите перекрытия/покрытия.

Вследствие одного из недавних исследований, в котором признаются осевые закрепления элементов как причина цепной реакции, руководства США [1] ограничивают использование усиленных связей между элементами каркаса ситуациями, когда соединенные элементы могут воспринимать требуемые нагрузки при повороте сечения балки на 0,2 радиана (11,4 градуса). Где это невозможно, связевые усилия должны распределяться между элементами каркаса через перекрытия. Однако, недавние исследования [2, 3] показали, что достаточная несущая способность узлов плохо коррелируется с фактической устойчивостью здания к прогрессирующему обрушению. Более того, будучи предписывающим правилом, оно не допускает значимого сравнения альтернативных механизмов – фундаментной черты инженерного проектирования.

Второй подход к проектированию каркаса, устойчивого к прогрессирующему обрушению, в своей наиболее часто используемой форме предполагает мгновенную потерю одной колонны, а затем требуется подтвердить расчетом, что поврежденная конструкция способна воспринять все действующие на нее нагрузки [4]. Этот подход может быть реализован на разных уровнях сложности с точки зрения расчета. Метод перераспределения усилий также может быть использован в качестве основы для более сложных численных исследований конкретных конструкций и конкретных аварий, например, в судебной экспертизе.

Основные особенности прогрессирующего обрушения

В исследовании [5] были определены три свойства, которые являются существенными компонентами любого, наиболее приближенного к реальности подхода к проектированию зданий на сопротивление прогрессирующему обрушению:

«-Инциденты происходят в очень коротких временных промежутках, поэтому фактически воздействия являются динамическими;

-Появляются значительные деформации, генерирующие значительные напряжения, что приводит к неупругой работе материалов;

-Отказ конструкции в основном соответствует ее неспособности в поврежденном состоянии принять новое положение равновесия без разрыва связующих элементов.» [5]

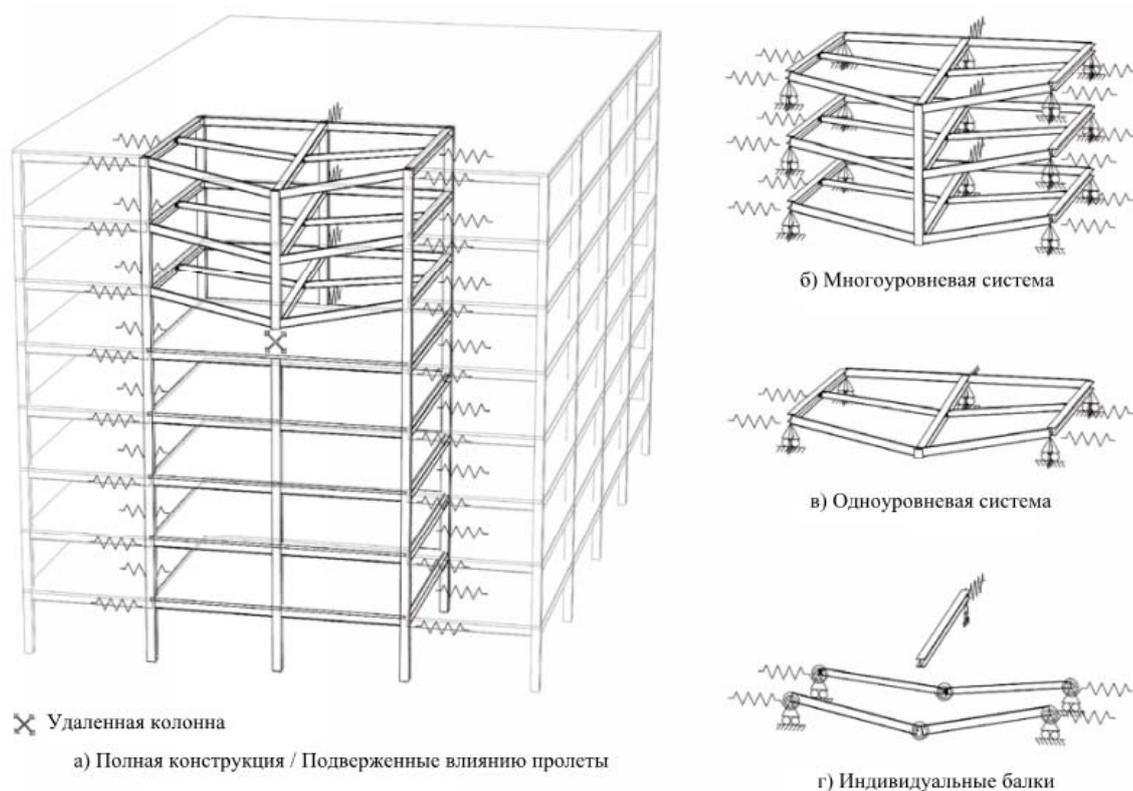


Рис. 2. – Упрощенный многоуровневый подход для оценки устойчивости прогрессирующему обрушению

В приведенном выше исследовании были также предложены дополнительные свойства, призванные сделать данный подход простым для использования в инженерной практике:

«- Процесс расчета должен состоять из серии этапов, которые в целом аналогичны тем, которые используются для типового, без проверки на прогрессирующее обрушение, проектирования конструкций;

- Расчет, предпочтительно, должен быть подходящим к реализации на разных уровнях сложности, с выбором в зависимости от ответственности конструкции;

- Любой требуемый анализ должен использовать известные элементарные методы расчета. Если требуются более сложные вычисления, которые нельзя выполнить вручную, необходимо, чтобы их можно было выполнить на основе широко доступного программного обеспечения;

- Необходимо использовать отражающие реальную работу и понятные критерии определения отказа конструкции;

- Метод расчета должен позволять выявлять причины и следствия и быть подходящим для проведения количественных сравнений параметров каркаса.» [5]

Именно по этим принципам было проведено исследование в Лондонском колледже (Imperial College London) [6-9]. Первоначально был разработан метод, включающий три основных свойства, но с учетом пяти дополнительных характеристик [10]. Данный метод в последствии был усовершенствован. [11]. Хотя основной отправной точкой нового метода было удаление колонн, он содержит ряд отличительных особенностей:

- Для данного метода возможен динамический анализ, но достаточно проведения только статического анализа [6];

- Этот подход может быть реализован на различных уровнях детализации (вся конструкция, часть конструкции, подверженной влиянию

удаленного элемента, балочная клетка в пределах этажа или отдельная балка, см. рис.2);

- Используется доступный критерий отказа конструкции, соответствующий достижению пределов пластичности в узлах конструкции;
- Возможно выполнить количественные сравнения между альтернативными типами конструкции;
- Данный метод может быть реализован с использованием обычных явных формул, тем самым позволяя произвести простой и быстрый ручной расчет.

Полные детали метода, как в его первоначальной форме, использующей ADAPTIC для выполнения расчетов, так и в упрощенной форме, приведены в серии работ [6-9, 12].

Анализ проведенных расчетов

Из анализа существующих международных нормативных документов в области обеспечения сопротивления прогрессирующему сопротивлению зданий [1] следует, что ключом к пониманию сложного взаимодействия основных несущих элементов каркаса во время прогрессирующего обрушения является зависимость прогиба от нагрузок в конкретной балке, что определяет предел, при котором балка начинает работать по принципу ванты. Однако при анализе последних исследований [9, 5], в которых проведены многочисленные исследования различного типа балок и узлов, выявлена недостаточность данного подхода. В приведенных исследованиях рассматривались стальные балки с моментными фланцевыми узлами примыкания к колонне, которые обладают достаточной несущей способностью на действие нормальных сил, обладают нелинейностью в работе материала и возможностью образования больших прогибов. Но в представленных расчетах потеря несущей способности узла (разрушение болтов или фланца) наступала значительно раньше, чем балка могла

деформироваться для перехода в работу по принципу ванты и образования расчетных растягивающих усилий в узлах.

Таким образом, выявляется очевидная особенность – отражающий реальную работу конструкции расчет на прогрессирующее обрушение должен учитывать все формы поведения конструкции, которые не учитываются в традиционных методиках. Интересно, что для отдельной краевой балки конструкции [9] потеря несущей способности, в плане достижения критических деформаций наиболее ответственного узла происходит до того, как появятся какие-либо цепные реакции. Это причина, почему ставится под сомнение релевантность обеспечения достаточных связей между элементами для обеспечения сопротивления прогрессирующему обрушению. В подавляющем большинстве рассмотренных примеров несущие элементы просто не начинают работать по принципу ванты до того, как соединения достигают критического состояния.

Данные результаты, вместе с другими, полученными в сопутствующих исследованиях, продемонстрировали, что сочетание несущей способности узлов по моменту, жесткости и деформативности узлов, а не сопротивление растяжению в узлах в большей степени определяет способность конструкции сохранять устойчивость при внезапном удалении колонны. Поэтому необходима дальнейшая работа по изучению способов балансировки этих характеристик, чтобы обеспечить отвечающую требованиям живучести работу конструкции.

Выводы

Было определено появление темы прогрессирующего обрушения как «новой темы» в рамках инженерной практики, а также рассмотрены аспекты его появления на практике и в нормативной литературе. Избранные результаты мировых исследований были использованы для анализа некоторых особенностей реальной работы стальных перекрытий



многоэтажных каркасных зданий. Эти результаты ставят под сомнение некоторые хорошо разработанные подходы к проектированию, в частности, связь между увеличением осевых раскреплений элементов и фактической устойчивостью к прогрессирующему обрушению, и иллюстрируют важность обеспечения надлежащего баланса между прочностью, жесткостью и пластичностью в соединениях.

Литература

1. SEI Disproportionate Collapse Standards and Guidance Committee. Design Procedures, Draft Committee. 2010. pp. 42-51.
2. Nethercot D.A., Stylianidis P., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y. Resisting Progressive Collapse by the Use of Tying Resistance // 4th International Conference on Steel & Composite Structures Sydney Australia. 2010. pp. 55-72.
3. Nethercot D.A., Blundell D., Stylianidis P. Progressive Collapse Behaviour of Bare Steel Frames // Ivanyi Conference. 2010. pp. 143-178.
4. Gudmundsson G.V., Izzuddin B.A. The Sudden Column Loss Idealisation for Disproportionate Collapse Assessment // The Structural Engineer. 2010. №88. pp. 22-26.
5. Nethercot D.A. Progressive Collapse Analysis of Steel and Composite Frame Structures // AIAS Maratea. 2010. №7 – 10 Sept. pp. 5-15.
6. Радченков А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных зданий из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879.
7. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive Collapse of Multi-Storey Buildings due to Sudden Column Loss - Part I Simplified Assessment Framework // Engineering Structures. 2008. №30. pp. 1308-1318.



8. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive Collapse of Multi-Storey Buildings due to Sudden Column Loss - Part II, Applications // Engineering Structures. 2008. №30. pp. 1424 – 1438.

9. Скачков С.В., Луптаков Р.И. Использование требований норм для расчета на прогрессирующее обрушение стальных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4159

10. Vlassis A.G., Progressive Collapse Assessment of Tall Buildings; PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London. 2007. pp. 93-105.

11. Stylianidis P.M., PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, in Preparation. 2010. pp. 25-32.

12. Nethercot D.A., Stylianidis P., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y. Enhancing the Robustness of Steel and Composite Buildings // ICASS'09 Hong Kong. 2009. pp. 105-122.

References

1. SEI Disproportionate Collapse Standards and Guidance Committee. Design Procedures, Draft Committee. 2010. pp. 42-51.

2. Nethercot D.A., Stylianidis P., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y. Resisting Progressive Collapse by the Use of Tying Resistance, 4th International Conference on Steel & Composite Structures Sydney Australia. 2010. pp. 55-72.

3. Nethercot D.A., Blundell D., Stylianidis P. Progressive Collapse Behaviour of Bare Steel Frames, Ivanyi Conference. 2010. pp. 143-178.

4. Gudmundsson G.V., Izzuddin B.A. The Structural Engineer. 2010. №88. pp. 22-26.

5. Nethercot D.A. AIAS Maratea. 2010. №7 – 10 Sept. pp. 5-15.

6. Radchenkov A.V., Aksenov V.N. Inzenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879.



7. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Engineering Structures. 2008. №30. pp. 1308-1318.
8. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Engineering Structures. 2008. №30. pp. 1424 – 1438.
9. Skachkov S.V., Luptakov R.I. Inzenernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4159
10. Vlassis A.G., Progressive Collapse Assessment of Tall Buildings; PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London. 2007. pp. 93-105.
11. Stylianidis P.M., PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, in Preparation. 2010. pp. 25-32.
12. Nethercot D.A., Stylianidis P., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y. Enhancing the Robustness of Steel and Composite Buildings, ICASS'09 Hong Kong. 2009. pp. 105-122.