

Влияние податливости узлов на живучесть зданий и сооружений

И.К. Зыбин, Е.Н. Сорокина

Кубанский государственный технологический университет

Аннотация: Проблема безопасности в строительстве зданий и сооружений всегда являлась и остается весьма актуальной. В наше время активно развивающегося научно-технического прогресса появляются новые факторы риска техногенного характера. Изучение живучести зданий, и, как следствие, и устойчивости зданий к прогрессирующим обрушениям, является весьма важной задачей. В данной статье рассмотрено влияние податливости узловых соединений металлокаркаса на прогрессирующее обрушение.

Ключевые слова: Прогрессирующее обрушение, податливость узлов, металлические конструкции, живучесть, особые воздействия, методика расчета.

Введение

В настоящий момент проблема безопасности остается по-настоящему важной во многих областях жизни человека, в частности, в сфере строительства и последующей эксплуатации различных строительных конструкций. Активный рост научно-технического прогресса в XX веке послужил причиной создания различных технических систем глобального масштаба, обеспечивающих жизнедеятельность многих важных в жизни общества областях [1].

Все они обладают развитыми коммуникационными системами и системами жизнеобеспечения, каждая из которых, по мере их развития, становится все более чувствительней к внешним экстремальным воздействиям (природным катаклизмам или техногенным авариям).

Понятие живучести и ее проблематика в современной строительной практике

Изучение вопросов безопасности возведения и эксплуатации зданий впоследствии привело к появлению понятия живучесть зданий и сооружений. Определение свойства живучести конструкции введено в EN 1991-1-7 Eurocode 1. В соответствии с этим документом, живучесть (robustness) – свойство конструкции противостоять таким событиям, как пожар, взрыв, удар

или результат человеческих ошибок, без возникновения повреждений, которые были бы непропорционально причине, вызвавшей повреждения. И, в соответствии с п. 3.3 EN 1991-1-7 Eurocode 1, основным способом снижения и предупреждения локальных отказов и разрушений является применение расчетно-конструктивных требований, главной задачей которых является обеспечение живучести зданий и сооружений [2]. Следовательно, при проектировании ответственных сооружений необходимо предусматривать мероприятия, по повышению их устойчивости к прогрессирующему обрушению (далее ПО), вызванному локальным разрушением или достижением предельного состояния отдельных несущих конструкций [3].

Под “прогрессирующим” (или “лавинообразным”) разрушением понимается “последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей”.

ПО впервые встречается в строительной терминологии после разрушения 22-этажного здания в Великобритании в 1968 году, вызванным обрушением конструкций, опирающихся на панель, разрушенную взрывом бытового газа. [4-5] Эта трагедия привела к началу исследований проблематики ПО в строительстве [6].

Несмотря на прогресс и активное развитие вопросов, связанных с проектированием зданий и сооружений, внедрение новых конструктивных систем и совершенствовании методов возведения и эксплуатации строительных конструкций, проблема обеспечения живучести зданий в мире далека от своего разрешения. Это обусловлено целым рядом причин. Основной из них является то, что в отечественной (равно как и в зарубежной) практике проектирования зданий отсутствует единый стандарт расчета и конструирования сооружений устойчивых к ПО. Следствием этого является неразвитые нормативная документация в этой области. К примеру, в

нормативной отечественной базе существуют документы, одна часть которых предписывает необходимость расчета на живучесть, например ГОСТ 27751-2014, а другая, например, серия рекомендаций, разработанная МНИИТЭП, используется для выполнения большинства расчетов на ПО при проектировании. Эти рекомендации не носят обязательного характера, а следовательно, специалисты вынуждены работать вне правового поля.

Кроме того, вопрос о внесении в технические нормативно-правовые акты положений о строгой необходимости учета ПО при проектировании вызывает серьезные дискуссии в профессиональной среде. Противники данных изменений ссылаются на то, что это приведет к значительному увеличению материалоемкости конструкций, при этом проблема является еще весьма малоизученной. Абсолютная защита конструкции невозможна, а попытки свести вероятность ее обрушения к нулю будет приводить к многократному увеличению стоимости строительства (вплоть до бесконечности). Исходя из этого, можно выделить ряд вопросов, разрешения которых необходимо, для прихода к консенсусу по этой теме:

- определение четкого перечня сооружений, проектирование которых ведется с учетом возникновения возможных особых ситуаций, а также назначение необходимого уровня надежности.
- какие неидентифицированные особые воздействия будут учитываться при расчетах данных конструкций.
- достаточны ли меры, предлагаемые современными нормативными документами для защиты конструкций от особых воздействий и обеспечения их живучести.
- какова методика расчета конструкций на прогрессирующее обрушение в условиях запредельных нагрузок.

Еще одной проблемной областью данной темы является вопрос терминологии и ее запутанности. В отечественной и иностранной литературе

существует колоссальное многообразие вариантов определений и терминов, составляющих языковую структуру складывающейся теории живучести. Все эти термины нуждаются не только в уточнении и конкретизации, но и четком разграничении их смыслового использования. К примеру, термин «прогрессирующее обрушение» является калькой с английского языка, и многими специалистами предлагается заменить его на цепное или лавинообразное обрушение.

Однако все эти утверждения несостоятельны, поскольку любое разрушение является прогрессирующим, представляя собой последовательность частных повреждений на микро- или макроуровне. В то же время лавинообразность (мгновенность) также не является обязательной характеристикой, поскольку разрушение конструкций может произойти за достаточно продолжительный период времени и быть вызвано медленной цепочкой отказов.

Исходя из всего вышесказанного, тема обеспечения устойчивости зданий и сооружений к ПО нуждается в тщательном рассмотрении и изучении. Необходима разработка новых и конкретизация существующих методик расчета зданий и требований к конструированию.

Авторами данной статьи проведен анализ влияния учета податливости узловых соединений на устойчивость конструкций к ПО. По нашему мнению, эта тема очень важна, так как податливость узлов может вносить существенные изменения в напряженно-деформированное состояние системы.

Податливость узловых соединений и ее влияния на напряженно-деформированное состояние системы

Податливость узловых соединений представляет собой способность конструкций приобретать угловые перемещения в результате деформаций элементов, составляющих узел. Из-за этих деформаций жесткие соединения

не способны полностью воспринимать изгибающие моменты, в то время, как шарнирные соединения могут принимать определенное количество изгибающего момента. Это приводит к тому, что конструкции узлов не всегда соответствуют идеализированной модели узла, что, в свою очередь, может изменить характер работы расчетной схемы.

Определение значений податливости узла и их учет при расчете напряжений конструктивных элементов является трудоемкой задачей для ручного расчета. Однако в настоящее время существует целый ряд расчетных комплексов, существенно упрощающих решение этих задач.

Влияние учета податливости узлов изучалось во многих работах. В 1990 г. Колмогоровым Юрием Ивановичем был разработан экспериментально-теоретический метод определения податливости узлов для уточнения расчетных схем рам эксплуатируемых промзданий [7].

Суть эксперимента заключалась в том, что при помощи тензодатчиков фиксировались изменения напряжений в раме транспортной галереи. После разгрузки рамы проводился контроль ее остаточной деформации.

В итоге при сравнении полученных при расчете без учета податливости узловых соединений значений изгибающих моментов прослеживалась существенные отличия в найденных расчетных усилиях. К примеру, изгибающие моменты в узлах соединения ригелей и стоек уменьшаются в 1,73-1,89 раза. При этом наблюдалось уменьшение изгибающих моментов на 4,3% в правом верхнем узле и увеличение на 1,1% в левом при действии распределенной по ригелю нагрузки.

Также в рамках рассмотрения этой темы можно обратить внимание на статью, опубликованную в 2014 г. в Приволжском научном журнале. В этом труде была проанализирована работа стальных ферм из гнутых тонкостенных профилей на самонарезающих винтах, а также была предложена методика их

расчета с учетом податливости узлов[8]. Результаты, полученные в данной работе, приведены на рис. 2.

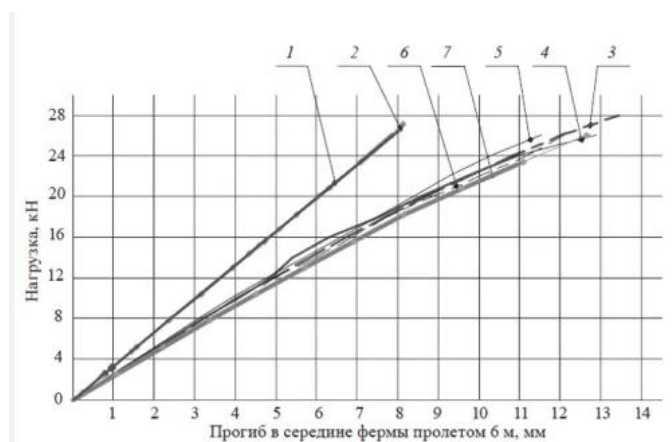


Рис. - 2. Сводный графики зависимости вертикальных прогибов в середине фермы пролетом 6 м [8]

Исходя из данных трудов, можно сделать вывод о существенном влиянии податливости узловых соединений на работу конструкции, а следовательно, будет оказывать влияние на конструкции в условиях прогрессирующего обрушения.

Методика расчета конструкций на прогрессирующее обрушение

Есть два распространённых подхода расчетов: pushdown и pulldown (см. рис.3).

К примеру, в стандартах США по проектированию зданий для сопротивления воздействию ПО (UFC 4-023-03-2016, GSA2003-2016) для проведения квазистатических расчетов широко используется метод частичного pushdown-анализа. Суть данного метода заключается в увеличении нагрузок на горизонтальные конструкции над удаляемым элементом.

В российской инженерной практике распространено применение частичного силового pulldown-анализа, который включает в себя умножение действующих усилий с обратным знаком в удаляемом элементе на коэффициент динамичности.

Основным нормативным документом, нормирующим расчет конструкций на ПО в нашей стране, является СП 385.1325800.2018. Этот свод правил устанавливает основные положения по проектированию зданий и сооружений классов КС-2 и КС-3 различных в целях обеспечения их защиты от ПО.

Устойчивость системы к ПО по данному нормативному документу считается обеспеченной в том случае, если для любого элемента системы или их соединений выполняется следующее условие:

$$F \leq S,$$

где F - усилия в конструктивных элементах или их соединениях, определяемые расчетом;

S -несущая способность конструктивных элементов и их соединений.

Важное условие для определения несущей способности в данном случае то, что нагрузки на систему и характеристики материалов, из которых она состоит, принимаются равными нормативным значениям, а не расчетным.

Основной метод оценки устойчивости конструкций к ПО включает в себя начальное определение внутренних напряжений и деформаций в элементах первичной расчетной схемы, которая принимается для нормальной эксплуатации здания или сооружения в соответствии со стандартом СП 20.1333.2016. После этого несущий элемент или элементы аутригренных конструкций исключаются из первичной расчетной схемы, и проводится повторный расчет данной вторичной схемы.

Для расчета зданий и сооружений необходимо использовать пространственную расчетную модель. При этом в расчете могут учитываться ненесущие элементы, которые в случае локальных воздействий включаются в работу расчетной схемы [9].

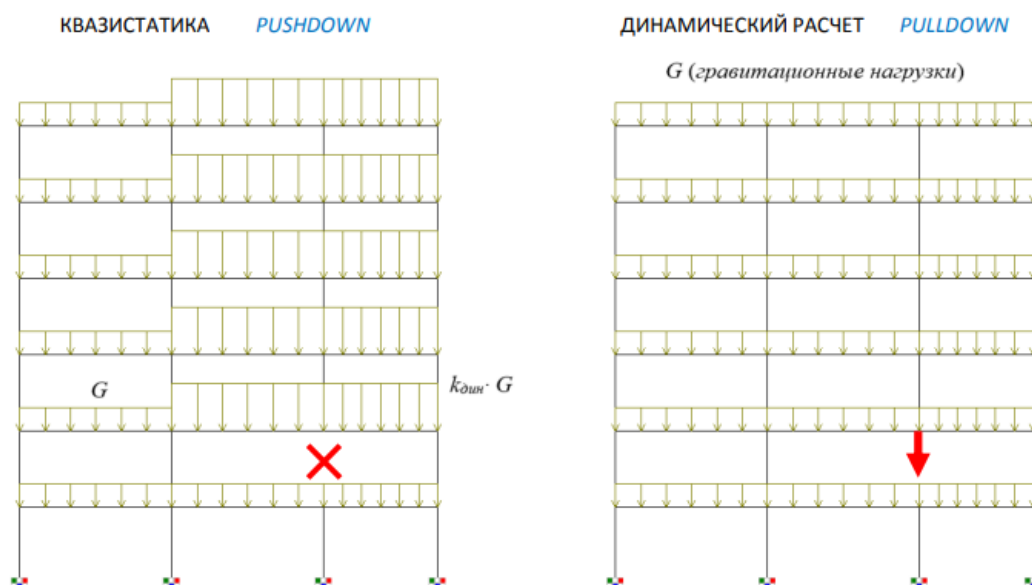


Рис. 3. – Примеры расчетных схем при Pushdown и Pulldown анализах [10].

Далее в статье рассмотрим результаты расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению с учетом пластичности узлов.

Анализ будет проводиться на примере металлического каркаса производственного назначения в г. Краснодар. Расчет будет выполнен в программном комплексе ЛИРА-САПР. Расчет жестких узловых соединений - в программе IdeaStatica.

На рассматриваемый каркас прикладываем нагрузки от снегового покрова, ветрового давления и веса ограждающих конструкций из профлиста ПК-35. Моделирование ПО будет проводиться в ситуации выключения крайней (наиболее загруженной по результатам предварительного расчета) колонны (см. рис. 4).

Податливость узлов в расчетной схеме будет учтена путем назначения в узлах упругих шарниров, с угловой жесткостью, определенной заранее в программе IdeaStatica.

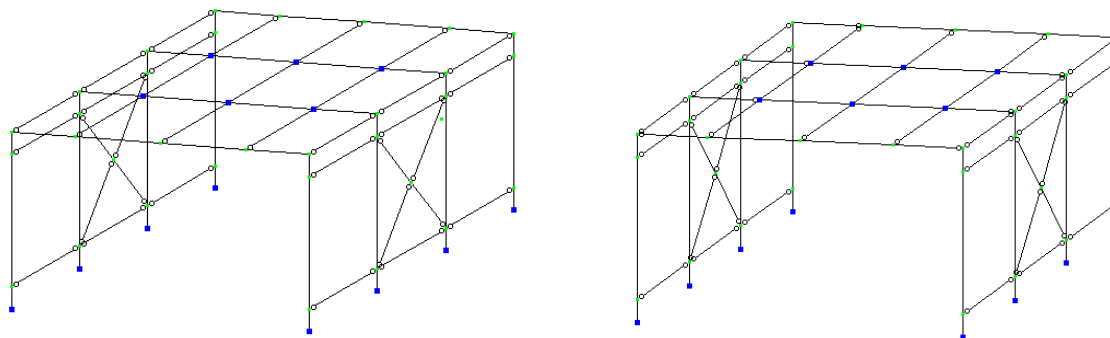


Рис. 4. – Первичная и вторичная расчетные схемы

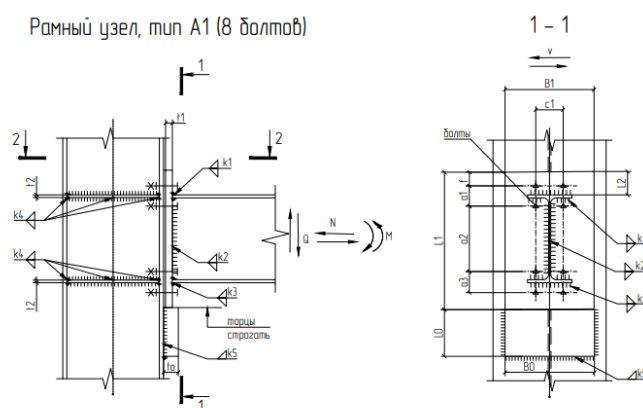


Рис. 5. – Исполнение жестких узлов

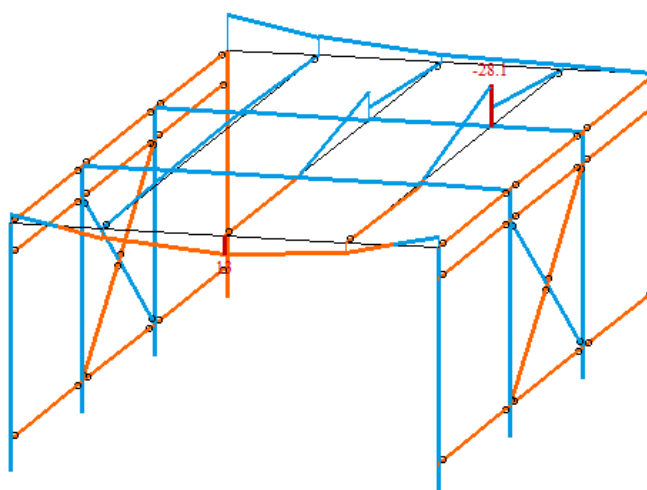


Рис. 6. – Эпюра моментов M_u в расчетной схеме без учета податливости узлов

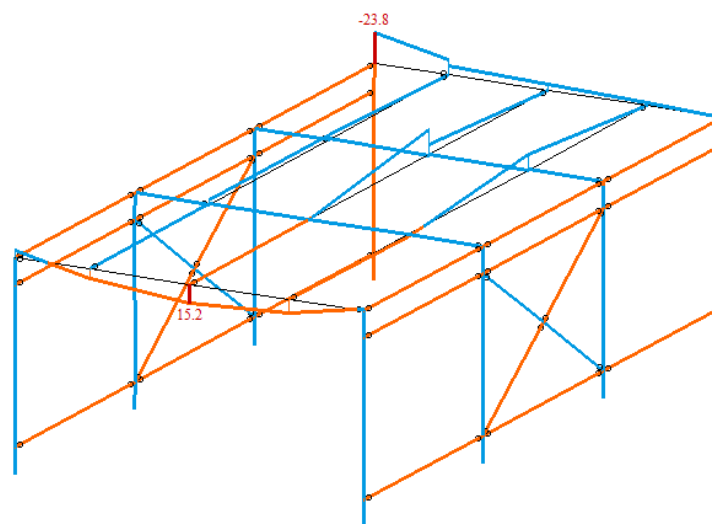


Рис. 7. – Эпюры моментов M_u в расчетной схеме с учетом податливости узлов

По результатам расчета (рис.6-7) мы видим, что учет податливости узлов вносит существенные изменения в напряженно-деформированное состояние системы при прогрессирующем обрушении, а значит, может осуществить влияние на живучесть здания в запредельных состояниях. В дальнейшем считаем необходимым подробное изучение данной тематики и разработку методик расчета живучести зданий и сооружений при запредельных нагрузках с учетом податливости узловых соединений.

Литература

1. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // Металлические здания. Часть 1, – 2008. – № 4 (8). – С. 20 — 22. Часть 2, – 2008. – № 5 (9). – С. 21 — 33.
2. Городецкий А. С., Цымбалевиц Т., Тур А. В. Живучесть строительных конструкций в особых расчетных ситуациях // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия:

Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 167–171 : ил. – Библиогр.: с. 171

3. Седегова Л.Н. Особенности строительства гражданских зданий в сложившейся городской застройке // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1698.

4. Crowder B. Devil in details. Navfac. 2005. 12 p.

5. Crowder B. Definition of progressive collapse. Navfac. 2005. 10 p.

6. 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.

7. Колмогоров Ю. И. Экспериментально-теоретический метод определения податливости узлов для уточнения расчетных схем рам эксплуатационных промзданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Колмогоров Юрий Иванович. — Ленинград.: ЛИСИ, 1990. — 185 с.

8. Лапшин А. А., Морозов Д. В., Колесов А. И. Методика проектирования стальных конструкций из гнутых тонкостенных профилей с учетом податливости узловых соединений на самонарезающих винтах // Приволжский научных журнал. — 2014. — № 3 (31). — С. 16–25.

9. Рекомендации по защите зданий от прогрессирующего обрушения. Москва. ГУП МНИИТЭП. 2006. С. 59.

10. Водопьянов Р. Ю., Губченко В. Е. Новый функционал ПК ЛИРА-САПР 2020 для расчета на устойчивость к прогрессирующему (лавинообразному/цепному) обрушению / сопровождение ПК ЛИРА-САПР. Москва, 2020. 79 с.

References

1. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. Metallicheskie zdaniya. Chast` 1, 2008. № 4 (8). p. 20-22. Chast` 2, 2008. № 5 (9). pp. 21-33.

2. Gorodeczkij A. I., Cymbalevich T., Tur A. V. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2011. № 1. pp. 167–171: il. Bibliogr.: p. 171.

3. Sedegova L.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1698.

4. Crowder B. Devil in details. Navfac. 2005. 12 p.

5. Crowder B. Definition of progressive collapse. Navfac. 2005. 10 p.

6. Skachkov S.V., Luptakov R.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4159.

7. Kolmogorov Yu. I.: E`ksperimental`no-teoreticheskij metod opredeleniya podatlivosti uzlov dlya utochneniya raschetny`x sxem ram e`kspluatacionny`x promzdanij [Experimental-theoretical method for determining the compliance of nodes to clarify design diagrams of frames for operational industrial buildings] dis. ... kand. texn. nauk: 05.23.01 Kolmogorov Yuriy Ivanovich. Leningrad. LISI, 1990 p.185.

8. Lapshin A. A., Morozov D. V., Kolesov A. I. Privolzhskij nauchny`x zhurnal. 2014. № 3 (31). pp. 16–25.

9. Rekomendacii po zashhite zdanij ot progressiruyushhego obrusheniya [Recommendations for protecting buildings from progressive collapse]. Moskva. GUP MNIITE`P. 2006. p. 59.

10. Vodop`yanov R. Yu., Gubchenko V. E. Novy`j funkcional PK LIRA-SAPR 2020 dlya rascheta na ustojchivost` k progressiruyushhemu (lavinoobraznomu/cepnomu) obrusheniyu [New functionality of PC LIRA-SAPR 2020 for calculating resistance to progressive (avalanche/chain) collapse] soprovozhdenie PK LIRA-SAPR. Moskva, 2020. p. 79.

Дата поступления: 6.02.2023

Дата публикации: 21.03.2024
