

Меркулов С.И., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Курский государственный университет

ЖИВУЧЕСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

mersi.dom@yandex.ru

Рассматриваются подходы к решению проблемы обеспечения живучести строительных конструкций и конструктивных систем при проектировании зданий и сооружений. Приведен обзор некоторых исследований по оценке живучести конструкций. Приведены подходы к предотвращению прогрессирующего обрушения здания и сооружения. Приведены некоторые результаты анализа расчёты живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, конструктивные системы, хрупкое разрушение, прогрессирующее разрушение, живучесть.

В последние годы обозначился интерес к проблеме живучести зданий и сооружений. Во многих отраслях техники сформированы методы и модели оценки живучести сложных систем. Как правило, под живучестью понимают способность системы сохранять заданные параметры при воздействии внешних факторов катастрофического характера. При этом в результате такого воздействия на весь объект или на отдельный элемент возможно снижение эксплуатационных параметров в пределах допустимых значений. В [1] живучесть определена как свойство объекта противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии повреждений определенного вида или при отказе некоторых компонентов.

Применительно к строительным объектам нормативными документами определена надежность объекта, в общепринятой терминологии, как свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые требуют функции объекта в заданных условиях и режимах эксплуатации [1, 2]. Надежность строительного объекта поддерживается обеспечением долговечности и безотказности. При проектировании строительных объектов действующими сводами правил обеспечиваются параметры прочности, жесткости, устойчивости. В настоящее время в связи с учащением разрушительными природными и техногенными катастрофами возрастает актуальность экспериментально-теоретических исследований и обоснования конструктивной безопасности и живучести объектов, снижения рисков.

В строительной науке определены проблемы живучести зданий и сооружений и направле-

ния их решения, формируется терминология по данной тематике, так как в нормативных документах пока отсутствуют понятия и определения по вопросу живучести. С 1970-х годов, когда был впервые предложен термин «прогрессирующее обрушение», к сегодняшнему времени сложилось определение этого термина. В Стандарте [2] дано определение прогрессирующему обрушению как последовательному (цепному) разрушению несущих строительных конструкций и оснований, приводящему к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения. В [3] предложено под живучестью конструкций понимать свойство конструкции сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях, вызванных природными и техногенными воздействиями, по крайней мере, в течение некоторого времени.

В настоящее время исследования живучести конструктивных систем выполняются по двум направлениям. К первому направлению относятся исследования, связывающие живучесть системы с сопротивлением прогрессирующему разрушению (обрушению) при аварийном воздействии, приведшем к разрушению элемента системы. В [4] рассмотрено прогрессирующее обрушение по отношению к локальному разрушению отдельного конструктивного элемента, вызвавшему цепное обрушение, выделяют прогрессирующее обрушение и непропорциональное обрушение. Прогрессирующее обрушение определено как внезапное разрушение, независимо от причины, приведшее к перераспределению усилий и последующему разрушению других элементов до нового состояния равновесия, при котором часть конструктивной системы или все здание будут обрушены. При непропорциональном обрушении область прогрессирующего обрушения превышает допустимые размеры, установленные нормативными документами. Таким образом, при проектировании объектов нормируются расчетные ситуации с

ограниченными областями локальных разрушений. В соответствии с [5,6] зона локального разрушения несущих конструкций ограничивается площадью 80 квадратных метров на одном этаже, и уровень начального обрушения ограничивается одним верхним или нижним этажом. Аналогичные ограничения зон локального разрушения установлены в европейских нормах [7], зона локальных разрушений ограничивается площадью 70 квадратных метров или 15% для каждого из двух смежных этажей при удалении наружной колонны. В нормах США [8] при удалении наружного элемента локальные разрушения перекрытия выше удаленного элемента ограничены площадью 70 квадратных метров или 15% от общей площади перекрытия, при удалении же внутреннего элемента нормативные значения удваиваются.

В исследованиях, относящихся ко второму направлению, причиной прогрессирующего разрушения системы рассматривают отказ одной из несущих конструкций вследствие дегенерационных процессов, как старение, коррозия и другие. В исследования [9, 10] предложено для развития теории живучести строительных конструкций принять принцип энтропийности процессов накопления среднего повреждения, кинетику коррозии нагруженного железобетонного элемента от локального повреждения к лавинообразному разрушению. На конструктивную систему здания оказываю влияние коррозионные повреждения железобетонных конструкций в результате длительной эксплуатации в агрессивных условиях. Коррозионные повреждения приводят к снижению силового сопротивления и жесткости конструкции, к развитию больших деформаций и трещин.

К настоящему времени сформированы определенные подходы и методы оценки возможного прогрессирующего обрушения, способы защиты зданий и сооружений [5, 6, 11-14]. Сформулирована общая методология снижения рисков прогрессирующих разрушений зданий и сооружений [13, 15], основные положения которой следующие:

- предупреждение или полное исключение организационными методами возможности аварийного воздействия;
- уменьшение объёма разрушения объекта конструктивными методами;
- предотвращение прогрессирующего обрушения.

При оценке живучести рассматривается возможность мгновенного удаления одного несущего элемента конструктивной системы здания. Эта ситуация возможна в результате аварийных взрывов, терактов, аварийных ударов,

транспортных аварий. При рассмотрении данной расчетной ситуации необходимо отметить, что первоочередным в обеспечении живучести являются не технические и конструктивные мероприятия, а организационные, направленные на предотвращение указанных аварийных воздействий. Рассматривается выключение элемента, поврежденного коррозией. Такое предположение представляется маловероятным. Так как коррозионные повреждения железобетонных конструкций развиваются во времени и легко диагностируются, а обязательным условием эксплуатации зданий и сооружений является установленная система технического обслуживания и ремонта. Это подтверждается опытом обследования железобетонных конструкций зданий и сооружений [16].

Уменьшить объемы прогрессирующего разрушения возможно за счет их локализации. Каркас здания «разбивается» на отдельные объемы, выход разрушения за пределы которых исключен: в горизонтальном направлении здание разбивается деформационными швами, в вертикальном направлении устраиваются связевые этажи или мощные ригели междуэтажных перекрытий. Другим направлением уменьшения объема разрушения является введение в конструктивную схему дополнительных связей, так [7] рекомендует в несущих каркасах выполнять связи по наружным колоннам, вертикальные связи, контурные связи, внутренние связи. Живучесть здания возможно обеспечить, если для предотвращения прогрессирующего разрушения несущая способность всех элементов системы будет достаточной для восприятия начальных аварийных воздействий. Такое решение значительно увеличивает материалоемкость конструктивного решения. Как показано в [3] армирование, требуемое для восприятия аварийного воздействия и приложенных нагрузок, превышает в 3 – 3,5 раза количество арматуры, требуемое для обеспечения несущей способности конструкций при проектных нагрузках.

Экспериментально – теоретическими исследованиями установлено, что мгновенное разрушение элемента или связи конструктивной системы при действии эксплуатационной нагрузки приводит к динамическому догружению всех остальных элементов системы и, как следствие, к возможному прогрессирующему обрушению [9]. Расчеты конструктивных систем при разрушении элемента и возникновении опасности прогрессирующего обрушения развиваются по направлениям. Первое направление: высокоточный нелинейный динамический расчет; второе направление: приближенный динамический расчет в упруго-линейной постановке;

третье направление: упрощенный расчет, основанный на применении эквивалентных статических нагрузок с введением коэффициента динамичности. В последнее время получили развитие упрощенные методы расчета [9], в которых линейная статическая процедура требует применения повышающего коэффициента к нагрузкам, учитывающего как нелинейные, так и динамические эффекты.

Многочисленные исследования направлены на изучение, анализ и оценку живучести статически неопределимых конструктивных систем зданий и сооружений. Предлагается распространить требование живучести также на отдельные железобетонные конструкции, не включенные в конструктивные системы. В этом случае живучесть можно определить, как свойство конструкции сохранять несущую способность при повреждениях любого характера в течение некоторого времени. Критерием живучести железобетонной в данной постановке является сопротивляемость конструкции хрупкому разрушению. Нужно отметить, что подобный подход реализуется при проектировании изгибаемого элемента недопущением хрупкого разрушения ограничением высоты сжатой зоны. Для чего в своде правил по проектированию железобетонных конструкций введено известное обязательное условие $\xi \leq \xi_R$.

В [17] живучесть железобетонной конструкции рассматривается как остаточный ресурс на конкретном этапе её эксплуатации с учетом выявленных силовых и средовых повреждений. Рассматривается возможность хрупкого разрушения бетона сжатой зоны. За расчетную ситуацию принимается стадия напряженно-деформированного состояния, при которой в сжатом бетоне возникают и развиваются микро-разрушения. Физический смысл ограничения параметра живучести предельным значением заключается в недопущении образования продольных трещин в бетоне сжатой зоны, что определяет хрупкий характер разрушения элемента. Для оценки живучести изгибаемого элемента предложены характеристики – параметр живучести, отражающий напряженно – деформированное состояние элемента, и предельная живучесть. Данные характеристики живучести должны определяться на каждой стадии эксплуатации конструкции с учетом выявленных повреждений. В рамках исследования конструктивной безопасности железобетонных конструкций разработаны методы оценки несущей способности, деформативности и трещиностойкости отдельных конструкций и конструктивных систем в условиях проявления коррозионных повреждений бетона и арматуры, повре-

ждений узлов сопряжений конструкций, изменения конструктивной системы при её усилении. Решения задач конструктивной безопасности основывается на методе предельных состояний. С единых позиций выполнена оценка напряженно-деформированное состояние конструкций и определены резервы на всех этапах жизненного цикла объекта. Исследованы механизмы и предложены модели коррозионного и силового повреждения железобетона с учетом знака и уровня напряжений [9, 10, 18, 19].

Таким образом, живучесть железобетонной конструкции следует рассматривать как свойство противостоять хрупкому разрушению. Живучесть конструктивных систем можно определить, как способность системы противостоять прогрессирующему обрушению при аварийных нагрузках и воздействиях. Расчет живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем полностью вписывается в положения метода предельных состояний. Расчет по первой группе предельных состояний должен обеспечить конструкцию от разрушения любого характера и с учетом в необходимых случаях деформированного состояния конструкции, а конструктивную систему – от локального и прогрессирующего обрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990-07-01. М.: Издательство стандартов, 1990.
2. СТО 36554501. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Введ. 2008-09-23. М.: НИЦ Строительство, 2008.
3. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н.К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях //Строительная механика и расчет сооружений. 2009. №4. С.5-9.
4. Тур, В.В. Проектирование конструктивных систем зданий в особых расчетных ситуациях // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. Курск: КГУ, 2010. С. 166-187.
5. МНСН 4.19-05 Многофункциональные высотные здания и комплексы. М.: Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции г. Москвы, ОАО ЦНИИЭПжилища, 2005.
6. МГСН 4.19-2005 Временные нормы и правила. Проектирование многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в

городе Москве [Текст]. – Введ. 2005-12-28. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, 2005.

7. EN 1991-1-7 Part 1-7: General Actions – Accidental actions. CEN. 2003, pp. 69.

8. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defense, 2003, 176 p.

9. Бондаренко В.М., Ключева Н.В., Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Некоторые результаты анализа и обобщения научных исследований по теории конструктивной безопасности и живучести // Строительство и реконструкция. 2012. №4. С. 3-13.

10. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С.28-31.

11. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. Введ. 2005-05-11. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, МНИИТЭП, НИИЖБ, 2005.

12. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Введ. 1999-08-24. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, МНИИТЭП, 2005.

13. Алмазов В.О., Кхой Као ЗуйДинамика прогрессирующего разрушения монолитных

многоэтажных каркасов: монография. М.: Издательство АСВ. 2013. 128 с.

14. Федоров В.С. Основные положения теории расчета огнестойкости железобетонных конструкций // Жилищное строительство. – 2010. №4. С. 22-32.

15. Тамразян А.Г. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: Научное издание. Под общ. ред. А.Г. Тамразяна. М.: Издательство АСВ. 304 с.

16. Меркулов С.И. Повреждения железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. Курск: КГУ, 2012. С. 147-150.

17. Скоробогатов С.М. Живучесть как основа для определения долговечности изгибаемых железобетонных конструкций при обследовании // Бетон и железобетон. 2006. №5. С. 18-22.

18. Меркулов С.И. О развитии теории конструктивной безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений // РААСН. Вестник отделения строительных наук. 2014. №18. С. 43-46.

19. Меркулов С.И. Конструктивная безопасность эксплуатируемых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №4. С. 53-54.