

УДК 624.046

**Ю.П. НАЗАРОВ, д-р. техн. наук, проф., А.С. ГОРОДЕЦКИЙ, д-р. техн. наук, проф.,
В.Н. СИМБИРКИН, канд. техн. наук**

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва, НИИАСС, г. Киев

К ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения живучести строительных конструкций при проектировании зданий и сооружений с учетом аварийных воздействий и ситуаций. Представлены подходы по предотвращению «прогрессирующего» разрушения несущих конструкций сооружений. Предложена методика прочностного расчета конструкций при аварийных воздействиях, основанная на моделировании многостадийного процесса нагружения конструкций с учетом изменения конструктивной схемы и эффектов геометрической и физической нелинейности.

Ключевые слова: строительная конструкция, живучесть, аварийное воздействие, «прогрессирующее» разрушение, нелинейный расчет.

В последние годы существенно возрос интерес к проблеме обеспечения живучести (жизнестойкости) строительных конструкций при аварийных ситуациях.

В нормативных документах термин «живучесть» используется, в основном, применительно к объектам машиностроения и ряду инженерных систем (например, систем тепло-, газо- и электроснабжения). При этом «под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов» [1].

В то же время общепринятого термина «живучесть конструкции» не существует. Под «живучестью конструкции» предлагается подразумевать ее свойство сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях, вызванных природными и техногенными воздействиями, по крайней мере, в течение некоторого времени.

К этой проблеме непосредственно примыкает обеспечение устойчивости конструкций зданий и сооружений к «прогрессирующему» разрушению при запроектных аварийных повреждениях и локальных разрушениях конструкций. Под «прогрессирующим» (или «лавинообразным») разрушением понимается «последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей» [2].

Внесение в нормативные документы [2-6] и др. определенных положений о необходимости учета при проектировании этой проблемы вызывает у некоторых специалистов возражения. Эти возражения, в основном, сводятся к тому, что потребуется значительное увеличение материалоемкости конструкций и, вообще, проблема еще мало изучена и еще рано привлекать к ней внимание проектировщиков.

Вместе с тем, проблема обеспечения живучести сооружений в чрезвычайных ситуациях изучается уже давно [7], и серьезные исследования, примыкающие к ней, проводятся примерно с 1990 г. Так, в [8] дается серьезный анализ этой проблемы, а в перечне ссылок приводится более пятидесяти работ по рассматриваемому вопросу. Проводятся соответствующие исследования и в СНГ, среди которых наиболее известными являются работы Ю.М. Стругацкого, П.Г. Еремеева, Г.А. Гениева, Ю.И. Кудишина, Г.И. Шапиро и др. [9-25]. В результате этих исследований для некоторых видов сооружений сделаны определенные рекомендации, касающиеся установления параметров аварийных воздействий и конструктивных мероприятий, препятствующих «прогрессирующему» разрушению. Эти рекомендации, в основном, сводятся к следующему:

- аварийные воздействия принимаются в виде стартовых локальных повреждений конструкции, для которых определены рекомендуемые ограничения;

- поскольку аварийная ситуация характеризуется малой вероятностью и небольшой продолжительностью, а также требуемая продолжительность обеспечения несущей способности сооружения ограничена, расчет конструкции в этом состоянии должен выполняться при действии нормативных длительных нагрузок только по первому предельному состоянию, т.е. допускаются большие перемещения и трещины, которые могут привести к потере эксплуатационных качеств, не нарушив при этом общую несущую способность конструкции;
- предпочтение следует отдавать конструктивным решениям, повышающим степень «неразрезности» и статической неопределимости системы здания;
- конструктивные элементы и узлы их соединения не должны быть подвержены хрупкому разрушению. Эти рекомендации направлены на то, чтобы в результате возможных больших перемещений конструкция могла приспособиться к новой ситуации, изменив в некоторых случаях схему своей работы под нагрузкой.

При проектировании большепролетных сооружений, согласно [22], следует разработать систему превентивных мер безопасности, снижающих опасность аварийных воздействий. Кроме того, необходимо выявить «ключевые» несущие элементы конструкции, выход из строя которых неизбежно влечет за собой лавинообразное разрушение сооружения, и обеспечить способность таких элементов воспринимать аварийные воздействия без разрушения.

Обоснование способности конструкций противостоять «прогрессирующему» разрушению осуществляется на основании расчета, однако вопрос о способе расчета является открытым. В постановочном смысле наиболее точен нелинейный динамический расчет конструкций, однако его выполнение при массовом проектировании в настоящее время не представляется возможным ввиду большой сложности и ресурсоемкости расчета. Так же, по нашему мнению, несостоятельна попытка моделирования процесса «прогрессирующего» разрушения конструкции на основе линейно-упругого статического расчета, предпринятая в некоторых работах и программных средствах.

В данной работе расчет конструкций на устойчивость к «прогрессирующему» разрушению предлагается проводить по следующей схеме. На первом этапе выполняют расчет конструкции в эксплуатационной стадии (или в нескольких монтажных и эксплуатационных стадиях, с учетом истории возведения и нагружения конструкции), предшествующей локальному разрушению, с учетом физической и геометрической нелинейности. Напряженно-деформированное состояние первого этапа является стартовым для второго этапа, на котором выполняют расчет схемы с выключенными из работы (удаленными) элементами. Нагрузкой на втором этапе являются усилия в удаленных элементах, увеличенные на коэффициент, учитывающий динамику процесса. Расчет также проводят с учетом физической и геометрической нелинейности. Если при этом окажется, что некоторые элементы модели не удовлетворяют условию прочности (т.е. разрушаются), то расчет продолжается аналогичным образом на следующей стадии без таких элементов. Расчет будет завершен либо локализацией процесса разрушения, либо полным разрушением несущей системы. Однако следует заметить, что в большинстве случаев для предотвращения «прогрессирующего» разрушения конструкции необходимо обеспечить несущую способность всех ее элементов при начальных аварийных повреждениях. В этих случаях расчет будет остановлен на первой стадии второго этапа расчета и моделирование процесса «прогрессирующего» разрушения не потребуется.

Предлагаемая методика расчета, по сути, является компьютерным моделированием форс-мажорной ситуации и позволяет проследить приспособление конструкции к новой ситуации на основе изменений конструктивной схемы. Конструктор на основе такого расчета имеет возможность наметить ряд конструктивных мероприятий, чтобы организовать работу конструкции по новым схемам.

В [26] приведен пример расчета высотного здания при локальном разрушении, вызванным удалением средней колонны каркаса. Перекрытие над удаленной колонной в связи с большими перемещениями работает, как мембрана. Такой расчет подсказывает конструктору, что путем небольшого увеличения количества арматуры в плите (нижняя арматура плиты не должна прерываться над колоннами) можно обеспечить устойчивость конструкции здания к «прогрессирующему» разрушению при аварийном выходе из строя одной из колонн каркаса здания.

Аналогичный эффект продемонстрируем на более простом примере. На рис. 1 представлена многопролетная шестиэтажная рама. Условно ее можно рассматривать как фрагмент пространственного каркаса здания. Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6 м и толщиной 0.2 м. Сечение колонн 0.5x0.5 м. Кроме собственного веса, на ригели приложена равномерно распределенная вертикальная нагрузка. Полное расчетное значение нагрузки составляет 36 кН/п.м, нормативное длительное значение – 22.2 кН/п.м, что примерно соответствует уровню нагружения перекрытий этажей жилых и административных зданий. Работа рамы в составе каркаса обеспечивается закреплением узлов 1÷12 от горизонтальных перемещений и углов поворота.

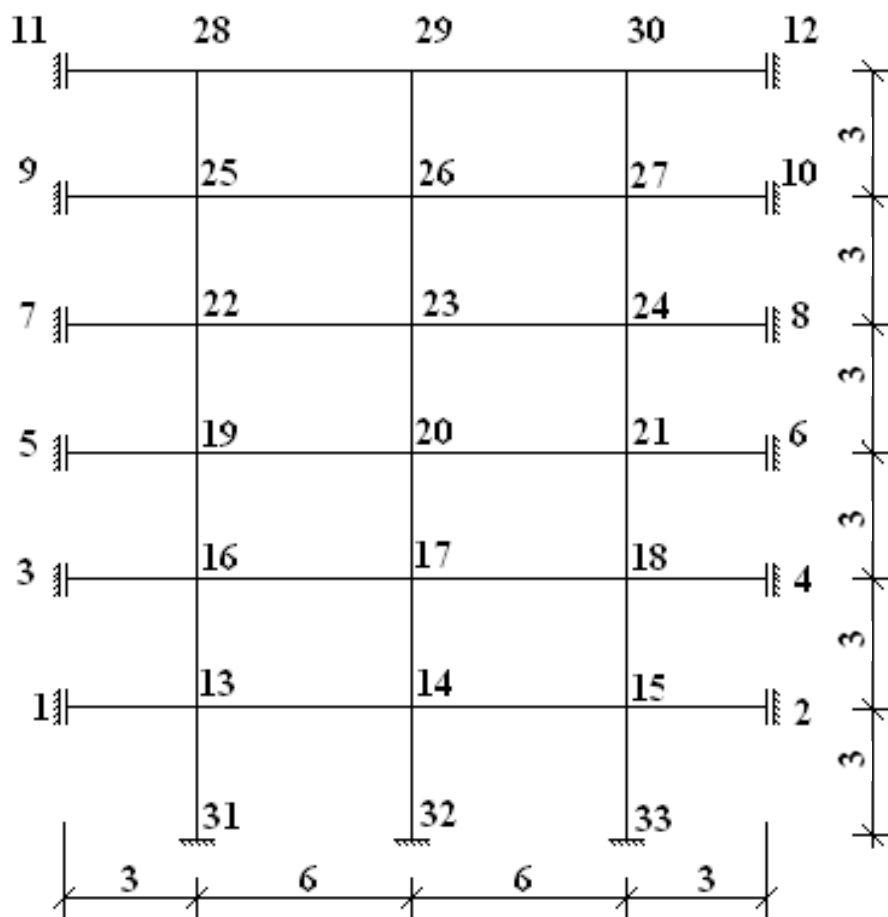


Рис. 1. Геометрическая схема рамы с номерами узлов (размеры указаны в метрах)

В табл. 1 представлены результаты расчетов как в проектном состоянии рамы (графы 1-2), так и в запроектом состоянии с учетом аварийного выхода из строя колонны 32-14 (графы 3-5). При расчете рамы на аварийное воздействие были учтены нормативные длительные нагрузки на раму. Динамический эффект, вызванный внезапным удалением из расчетной схемы колонны 32-14, не учитывался. Графа 3 соответствует линейно-упругому расчету без колонны 32-14. Графа 4 соответствует одностадийному расчету рамы с учетом физической и геометрической нелинейности, при котором и эксплуатационная нагрузка, и аварийное выключение из работы колонны 32-14 учитывались одновременно. Графа 5 соответствует двухстадийному расчету, выполненному по описанной выше схеме: на первой стадии рассчитывается вся рама с учетом физической и геометрической нелинейности; на второй стадии расчет выполняется без колонны 32-14 на силу, приложенную в узле 14 и равную усилию в колонне 32-14, полученному расчетом на первой стадии. Напряженно-деформированное состояние конструкции, полученное на первой стадии, является стартовым для второй стадии расчета. Программный комплекс ЛИРА позволяет выполнять расчеты такого рода.

Таблица 1

Параметры напряженно-деформированного состояния	Расчет при проектных воздействиях		Расчет при аварийном выходе из строя колонны 32-14		
	Линейно-упругий расчет при полной расчетной нагрузке	Линейно-упругий расчет при нормативной длительной нагрузке	Линейно-упругий расчет	Одностадийный расчет с учетом физической и геометрической нелинейности	Двухстадийный расчет с учетом физической и геометрической нелинейности
	1	2	3	4	5
Наименьший (опорный) момент в ригеле 13-14, кНм	-205.1	-163.7	-691.2	-537.5	-487.7
Наибольший момент в ригеле 13-14, кНм	102.5	81.8	403.2	315.2	305.3
Нормальное усилие в колонне 32-14, кН	-2563	-2066	-	-	-
Нормальное усилие в ригеле 13-14, кН	0	0	25.9	1012	1074
Перемещение узла 14, мм	-1.0	-0.8	-31.6	-192.1	-210.3
Расчетная площадь сечения продольной арматуры ригелей, см ²					
- верхней	38		126	92	79
- нижней	18.5		68.6	60	60

Анализируя результаты расчетов, можно констатировать, что двухстадийный расчет, который, по сути, является компьютерным моделированием процесса внезапного удаления средней колонны 32-14, показывает, что опорный и пролетный изгибающие моменты в ригеле почти в 1.5 раза меньше, чем те же моменты, полученные на основе линейно-упругого расчета. Этот эффект обусловлен работой конструкции по новой схеме: узел 14 получает большое вертикальное перемещение, ригели (полосы перекрытий) начинают работать по схеме нити, в результате чего в них возникают растягивающие усилия. Эти усилия, как правило, воспринимаются имеющейся арматурой в перекрытиях. Горизонтальные усилия в пространственном каркасе передаются на систему вертикальных диафрагм жесткости здания или «замыкаются» в диске перекрытия.

По линейно-упругому расчету, количество продольной арматуры ригелей, требуемое для восприятия аварийного воздействия и приложенных к его моменту нагрузок, примерно в 3.5 раза превышает количество арматуры, требуемое для обеспечения несущей способности ригелей при проектных нагрузках и воздействиях. В результате двухстадийного расчета рамы с учетом геометрической и физической нелинейности требуемой арматуры ригелей получилось на 29% меньше. Одностадийный нелинейный расчет показал результаты, схожие с результатами двухстадийного расчета, однако требуемое количество арматуры ригелей оказалось на 10% больше.

Таким образом, тщательный расчетный анализ несущей системы здания позволяет вскрыть дополнительные резервы ее несущей способности, и при определенных конструктивных мероприятиях (в данном случае необходимо не прерывать нижнюю арматуру над колоннами), требующих некоторого увеличения материалоемкости, можно обеспечить устойчивость здания к «прогрессирующему» разрушению. Кроме того, снизить материалоемкость несущих конструкций здания можно за счет учета в расчете на запроектные аварийные воздействия тех конструкций, которые в проектном состоянии здания, при незначительных деформациях, не являются несущими, а при значительных деформациях несущей системы, обусловленных аварийным воздействием, могут включаться в работу на восприятие действующих на здание нагрузок.

Еще раз нужно отметить, что, говоря об устойчивости конструкций к «прогрессирующему» разрушению, под аварийным воздействием всегда подразумевается только локальное повреждение. Его определение, безусловно, зависит от типа конструкций. В вантовых конструкциях это может быть одна или две ванты, в структурах – один или два раскоса, но ни в коем случае основные опоры моста, или ядро жесткости высотного здания. Характер локальных повреждений может быть определен в регламентирующих документах, а для конкретных ответственных сооружений, не имеющих аналогов, определен проектировщиком и согласован с заказчиком. Во всяком случае, проектировщик всегда должен думать о том, что случится, если по каким-либо причинам выйдет из строя какой-либо элемент, необязательно самый ответственный, проектируемой им конструкции.

В заключение следует отметить, что обеспечение устойчивости конструкций к «прогрессирующему» разрушению является частью общей проблемы живучести сооружения. Сюда примыкает проблема огнестойкости несущих конструкций, а также проблема удовлетворения требованиям сейсмостойкости даже в случае строительства ответственных сооружений в районах со слабой сейсмической активностью. И если риск землетрясения недостаточно велик, при проектировании таких сооружений было бы целесообразно использовать подходы, характерные для обеспечения устойчивости конструкций к «прогрессирующему» разрушению, т.е. допускать потерю эксплуатационных качеств конструкций, но не их обрушение.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-89 «НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ». – М.: Издательство стандартов, 1990.
2. СТО 36554501-014-2008 «НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОСНОВАНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ». – М.: НИЦ «Строительство», 2008.
3. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87) «НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОСНОВАНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ». – М.: Издательство стандартов, 1988.
4. МГСН 3.01-01 «ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ». – М., 2001.
5. МГСН 4-19-2005 «ВРЕМЕННЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И ЗДАНИЙ-КОМПЛЕКСОВ В ГОРОДЕ МОСКВЕ». – М.: Москомархитектуры, 2005.
6. СП 52-103-2007 «ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ МОНОЛИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ». – М.: НИЦ «Строительство», 2007.
7. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town. – MSO, 1968 (ЦИНИС, перевод 18736).
8. Kirk A. Marchand, Farid Alfawakhive. Blast and Progressive Collapse. – AISC, 2005.
9. Ю.М. Стругацкий. Обеспечение прочности панельных зданий при локальных разрушениях их несущих конструкций. Сб.: Исследования несущих бетонных и железобетонных конструкций сборных многоэтажных зданий. – М.: МНИИТЭП, 1980, с. 3-19.
10. Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85), (Приложение 2, Рекомендации по обеспечению устойчивости крупнопанельных зданий при аварийных воздействиях. Ю.М. Стругацкий, Ю.А. Эйсман). – М.: ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры, 1989, с. 232-268.
11. Ю.М. Стругацкий, Г.И. Шапиро. Безопасность московских жилых зданий массовых серий при чрезвычайных ситуациях. – ПГС, №8, 1998, с. 37-41.
12. «Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий». Ю.М. Стругацкий, Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман. – М.: Москомархитектуры, 1999.
13. «Рекомендации по защите жилых зданий стеновых конструктивных систем при чрезвычайных ситуациях». Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман, Ю.М. Стругацкий. – М.: Комплекс архитектуры, строительства, реконструкции и развития города, 2000.
14. «Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях». Г.И. Шапиро, В.С. Коровкин, Ю.А. Эйсман, Ю.М. Стругацкий. – М.: Москомархитектуры, 2002.
15. «Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях». Г.И. Шапиро, В.С. Коровкин, Ю.А. Эйсман, Ю.М. Стругацкий. – М.: Москомархитектуры, 2002.

Опубликовано: 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.

16. Гениев Г.А. и др. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.
17. «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения». Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман, А.С. Залесов. – М.: Москомархитектуры, 2005.
18. «Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения». Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман, В.И. Травуш. – М.: Москомархитектуры, 2006.
19. Еремеев П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях. – Строительная механика и расчет сооружений, №2, 2006, с. 65-72.
20. Тихонов И.Н., Козелков М.М., Демидов А.Р. К проектированию зданий из железобетона с учетом защиты от прогрессирующего обрушения. – Бетон и железобетон, №6, 2006, с. 6-10.
21. Пятикрестовский К.П., Лебедева И.В. Исследования живучести панели и цилиндрических оболочек из дерева на статические и динамические запроектные воздействия. – Строительная механика и расчет сооружений, №2, 2007, с. 56-61.
22. МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». – М.: НИЦ «Строительство», 2008.
23. В.О. Алмазов. Аварии и мониторинг. – М.: МГСУ, 2008.
24. Кудишин Ю., Дробот Д. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях. – Металлические здания, №4[8], 2008, с. 20-22, №5[9], 2008, с. 21-23.
25. Белостоцкий А.М. и др. Расчеты зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения с учетом физической и геометрической нелинейностей. – Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции, М.: МГСУ, 2008, с. 183-193.
26. А.С. Городецкий и др. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. – Киев: ФАКТ, 2004.