

УДК 624.07

Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях

Виталий Михайлович БОНДАРЕНКО, академик РААСН, доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства»,
109029 Москва, ул. Средняя Калитниковская, 30, e-mail: GDSH_faculty@rambler.ru

Виталий Иванович КОЛЧУНОВ, академик РААСН, доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – Учебно-Научно-Производственный комплекс»,
320030 г. Орел, ул. Московская, 77, e-mail: skimkafedra@yandex.ru

Аннотация. Проанализированы подходы к решению проблемы противодействия локальным и прогрессирующим разрушениям. Сформулированы основные положения новой концепции конструктивной безопасности сооружений при силовых и коррозионных воздействиях. Даны предложения по развитию теории живучести конструктивных систем в запредельных состояниях.

Ключевые слова: конструктивная безопасность сооружений, коррозионное повреждение, экспозиция живучести, силовые воздействия.

THE CONCEPT AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF THE THEORY OF STRUCTURAL SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF FORCE AND ENVIRONMENTAL FACTORS

Vitaly M. BONDARENKO, Vitaly I. KOLCHUNOV

Abstract. Approaches to solving the problem of resistance to local and progressive destructions are analyzed. Basic provisions of the new concept of structural safety of structures under force and corrosion influences are formulated. Proposals for the development of the theory of survivability of structural systems in the out-of-limit state are made.

Key words: structural safety of structures, corrosion damage, survivability exposure, force action.

Традиционное решение задач конструктивной безопасности основывается на методе предельных состояний. При этом существует несколько подходов к решению проблемы противодействия локальным и прогрессирующим разрушениям [1–5]: обеспечение ключевых элементов от разрушения путем увеличения их прочности или применение защитных мероприятий; повышение общей структурной целостности, пластичности, неразрезности, добавление лишних связей; расчеты на адаптационную приспособляемость при воображаемом удалении каждого несущего элемента и изменении силовых потоков в сооружении. Последний подход – наиболее распространенная форма защиты эксплуатируемых зданий и сооружений при проектировании, так как при этом расчетом проверяются все возможные опасные варианты локальных повреждений и их влияние на конструктивную безопасность сооружения.

Возникновение запредельных состояний возможно на любом этапе

эксплуатации конструкции, в том числе и после длительного воздействия факторов, снижающих прочностные характеристики материалов конструкции. В этой связи при оценке конструктивной безопасности возникает проблема учета экспозиции живучести при одновременном проявлении средовых воздействий и силового сопротивления конструктивных элементов [6]. Коррозионные повреждения сопровождаются уменьшением ресурса силового сопротивления конструкций и их отказами по первому или по второму предельным состояниям. В первом случае это приводит к разрушению конструкций, а для статически неопределимых систем и к внезапным догрузениям и изменению расчетных схем сооружений, во втором – к снижению жесткости конструкций, развитию больших деформаций и трещин, затрудняющих или исключаящих дальнейшую эксплуатацию строительных объектов.

К настоящему времени накоплены значимые результаты исследований в теории силового сопротивле-

ния железобетона (В. О. Алмазов, Т. И. Баранова, В. М. Бондаренко, П. И. Васильев, Г. А. Гениев, А. Б. Голышев, А. С. Залесов, А. И. Звездов, Н. И. Карпенко, Вл. И. Колчун, В. И. Мурашев, Г. В. Мурашкин, Е. Н. Пересыпкин, Б. С. Расторгуев, В. И. Римшин, Р. С. Санжаровский, В. С. Федоров, В. П. Чирков и др.). Это создает хорошую основу для развития коррозионной диспозиции силового сопротивления и живучести строительных конструкций при запроектных воздействиях. Физической основой создания такой теории может стать специфическая посылка о феноменологическом единобразии кинетики неравновесных процессов повреждений и развития нелинейных деформаций, а также о константности режимных, физико-механических и термодинамических факторов внешних воздействий на бетон [4, 6].

Междисциплинарный характер рассматриваемой проблемы обусловил малоизученность задач совместного проявления средового и силового сопротивления железобетона в

пределных и тем более в запрельных состояниях. В ущерб надежности проектных решений или же с неоправданным запасом прочности комплексный подход к оценке силового сопротивления железобетонных элементов силовым и средовым воздействиям заменяется преимущественно решением отдельных, хотя и важных, но задач частного характера.

Исследованиями РААСН, выполненными в последнее десятилетие [7–11], установлено, что опасным становится не только разрушение выключаемого из работы системы несущего элемента, но и возникающий при этом эффект динамического воздействия на другие элементы конструкции. В этом случае возможно как локальное, так и прогрессирующее (лавинообразное) разрушение всей конструктивной системы. Для оценки таких изменений конструктивной системы в работах [8–9] предложена методика количественной оценки характеристики живучести с помощью обобщенного параметра λ . В качестве λ принята величина, равная значению нагрузки, при которой в рассматриваемой конструктивной системе начинается процесс структурных преобразований, вызывающих последовательное изменение ее статической неопределимости от выключения первой связи до затухания процесса изменения статической неопределимости системы или до превращения системы в изменяемую.

При расчете параметра живучести конструктивной системы λ необходимо определять коэффициент динамичности в конкретном расчетном сечении ее элементов. Его значения могут быть получены с помощью нелинейного динамического расчета, который при проектировании железобетонных конструкций достаточно сложен для практического применения. В этой связи при проведении расчетов сложных конструктивных систем можно использовать более эффективный метод квазистатического расчета [10]. Как показали исследования [7, 9, 10], значение коэффициента динамичности в разных сечениях статически неопределимых конструктивных систем из железобетона при внезапном выключении

одного из ключевых элементов зависит от уровня нагружения системы проектной нагрузкой, топологии конструкции, наличия трещин и других параметров. Очевидно, что определение значения этого коэффициента — одна из ключевых задач при проведении расчета конструкций на прогрессирующее разрушение. В этой связи идея энергетического подхода для оценки динамических догрузений элементов стержневых систем из хрупких материалов, впервые высказанная Г. А. Гениевым [12], и методы ее реализации для железобетона (В. И. Колчунов, Е. А. Ларионов, Н. В. Клюева, К. П. Пятикрестовский) могут стать одними из наиболее приемлемых для практического использования.

В формулировках физической стороны задачи экспозиции живучести перспективными могут оказаться принцип энтропийности процессов накопления средового повреждения и сформулированный В. М. Бондаренко критерий трансформации уравнений, моделирующих кинетику коррозии нагруженного железобетонного элемента из траектории координатных повреждений в лавинообразные.

Концептуально теория конструктивной безопасности зданий и сооружений состоит в формулировании, разработке требований и удовлетворении следующих условий:

- в режиме «медленного времени» — геометрической неизменяемости как предпосылки живучести строительного объекта и устойчивости его напряженно-деформированного состояния (НДС) на всех этапах существования;
- в режиме «быстрого времени» — асимптотической стабилизации на фиксированных уровнях неравновесных факторов силового сопротивления элементов конструкции (ползучесть, коррозионные повреждения), гарантирующей сохранение геометрической неизменяемости и живучести в режиме «быстрого времени» на заданный период при неустойчивых процессах силового сопротивления или для вычисляемой продолжительности — экспозиции живучести, в течение которой сохраняется геометрическая неизменяемость

здания или сооружения в целом и прочность их элементов в частности.

В связи со сказанным приведем пояснения к следующим терминам:

- «геометрическая неизменяемость» — по кинематическому признаку стержневые системы сгруппированы по трем группам: геометрически изменяемые, или кинематически подвижные (механизмы не могут выступать в качестве строительных конструкций), геометрически неизменяемые, или кинематически неподвижные (в том числе строительные конструкции) и мгновенные изменяемые системы, в которых возможны перемещения без деформации элементов [13];
- «живучесть» — живучесть как способность системы распределять нагрузку между остальными элементами в случае повреждения или ослабления одного из элементов (коррозия, внезапное выключение «лишних» элементов статически неопределимых схем) [14]. Здесь появляется равновесная с точки зрения силового сопротивления постановка задачи, включая пластическую приспособляемость статически неопределимых систем;
- «медленное время» и «быстрое время»: медленное время — временной режим естественного изменения механических свойств бетона; быстрое время — время режимного изменения влияния воздействий и их следствий [15];
- «экспозиция живучести» — при неравновесной постановке задачи (наложение во времени деформаций ползучести и коррозионных повреждений) продолжительность сохранения потенциала живучести строительной системы во времени разрушительным воздействиям агрессивной среды с выключением из системы конструктивных элементов, ответственных за геометрическую неизменяемость сооружения [13];
- «устойчивость напряженно-деформированного состояния» — структура бетона зависит от уровня действующих напряжений; при увеличении напряжений от нуля до границ условно линейной деформируемости от уплотнения, его проницаемость изменяется и одновременно уменьшается его ползучесть и коррозионная повреждаемость. НДС устойчиво. С ростом напряжения

плотность бетона уменьшается, его пористость и проницаемость увеличиваются, и соответственно растет коррозионная повреждаемость. Однако до тех пор, пока напряжения не достигнут предела длительной упругости, НДС остается устойчивым. При дальнейшем увеличении напряжений поры и трещины увеличиваются, объединяются в магистральные трещины; ползучесть и продвижение коррозионного фронта из затухающего превращается сначала в незатухающий, а затем и в лавинный, это и представляет собой неустойчивое НДС [17].

В целом геометрическая неизменяемость и, следовательно, конструктивная безопасность зданий и сооружений обеспечиваются достаточным качеством, количеством и прочностью элементов — связей (для статически неопределимых систем — степенью «неопределимости»). Под влиянием силовых и несиловых факторов выключение (разрушение) связей может лишить кинематическую схему геометрической неизменяемости, а здания и сооружения — конструктивной безопасности.

Таким образом, геометрическая неизменяемость исходной конструктивной схемы здания, сооружения и достигнутое силовое сопротивление конструктивных элементов и связей в течение расчетного времени эксплуатации или в ожидаемое время экспозиции живучести — это условия и концептуальные требования конструктивной безопасности строительных объектов.

В связи с изложенным очевидно значение силового сопротивления элементов строительной системы, ответственных за обеспечение геометрической неизменяемости.

К настоящему времени разработаны и опубликованы базовые решения по оценке прочности железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям, устойчивости, деформируемости таких элементов при нагружении. Эти решения учитывают анизотропию, нелинейность, неравновесность и необратимость деформирования таких элементов при силовом нагружении. Причем указанные решения относятся как к первоначальному проектированию, т. е. без учета повреждений, связанных с

агрессивным воздействием среды, так и к оценке ресурса силового сопротивления конструкций, получивших в процессе эксплуатации повреждения, прежде всего коррозионные, которые, в свою очередь, не только нелинейно связаны с действующими напряжениями, но и меняются по координатам пространства (вдоль пролета и по высоте сечения). При этом сечения элемента с наибольшими коррозионными повреждениями могут не совпадать с наибольшими внутренними усилиями, в том числе с изгибающими моментами. Последнее обстоятельство осложняет реализацию нового подхода к формулированию очередных задач научных исследований.

Исходя из вышеизложенного можно считать актуальными такие дальнейшие направления исследований по теории силового сопротивления конструкций и конструктивной безопасности зданий и сооружений, как поиск и оценку сечений конструкций по прочности, определенной с учетом влияния знака и уровня действующих усилий и закономерностей повреждений, в частности коррозионных, а именно:

- разработку методик построения эпюр предельных силовых сопротивлений (эпюры материалов), эпюр повреждений, функций изменения характеристик жесткостей и характеристик прочности;
- исследование специфики трещиностойкости железобетонных элементов применительно к различным вариантам коррозионных повреждений;
- формирование и решение задач живучести и экспозиции живучести в нелинейной, неравновесной и диссипативной постановках;
- построение расчетных моделей, подготовку методов расчета энергостерезисного гашения динамических импульсов, в том числе сейсмических воздействий;
- выявление специфики и введение в практику расчета и проектирования, а также в технологии строительства методов восстановления деформированных состояний железобетонных элементов, получивших необратимые перемещения;
- накопление соответствующих статистических данных об особенностях аварий сооружений при отказе

отдельных конструкций или их элементов и анализ данных результатов обследования эксплуатируемых сооружений;

- разработку методик, постановку и проведение целенаправленных экспериментальных исследований по установлению альтернативных путей динамического нагружения элементов конструктивных систем после внезапных локальных повреждений и закономерностей статико-динамического деформирования железобетонных элементов в статически неопределимых конструктивных системах при различных режимах догружений, а также для изучения закономерностей внезапных структурных перестроек систем от эволюционирующих во времени повреждений;
- моделирование и исследование кинетики неравновесных процессов продвижения повреждений в нагруженных элементах конструктивных систем, а также изучение механизмов прогрессирующего обрушения конструкций зданий и сооружений при совместном проявлении средовых повреждений и силовых воздействий;
- создание методов синтеза адаптационно-приспосабливаемых конструктивных систем, эффективно работающих при их внезапных структурных перестройках. При этом реализацию методов защиты сооружения можно рассматривать в двух направлениях. Первое — это так называемая пассивная защита от внезапных запроектных воздействий, обеспечиваемая резервированием несущей способности конструкций. Второе — гашение дополнительно возникающих при внезапных структурных перестройках сил инерции гасителями колебаний;
- совершенствование нормативной базы в области конструктивной безопасности зданий и сооружений при запроектных воздействиях. При этом, по-видимому, целесообразно ввести новое (третье) предельное состояние, что уже в ближайшем будущем позволит нормировать параметры локального и прогрессирующего разрушения в запредельных состояниях.

Таким образом, сформулированы предложения и намечены некоторые направления исследований в теории конструктивной безопасности зданий и сооружений.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (соглашение № 14.В.37.21.0292).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. 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.
2. Травуш В. И. Безопасность и устойчивость в приоритетных направлениях развития России // Academia. 2006. № 2. С. 10–15.
3. Алмазов В. О. Проектирование железобетонных конструкций по евронормам: науч. изд. М. : АСВ, 2007. 216 с.
4. Бондаренко В. М., Колчунов В. И., Ключева Н. В. Еще раз о конструктивной безопасности и живучести зданий // РААСН. Юбил. вып. к 15-летию РААСН. Вест. отд-ния строит. наук. 2007. № 11. С. 81–86.
5. Тамразян А. Г. Ресурс живучести – основной критерий решений высотных зданий // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 15–18.
6. Бондаренко В. М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5. С. 13–17.
7. Колчунов В. И., Осовских Е. В. Расчет динамических догрузений в элементах железобетонных призматических складок при запроектных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2010. № 3/29. С. 7–14.
8. Ключева Н. В., Ветрова О. А. К оценке живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапных запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 11. С. 56.
9. Гениев Г. А., Ключева Н. В. Экспериментально-теоретические исследования неразрезных балок при аварийном выключении из работы отдельных элементов // Изв. вузов. Сер. Стр-во. 2000. С. 24–26.
10. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева [и др.]. М. : АСВ, 2004. 216 с.
11. Бондаренко В. М., Ключева Н. В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений // Изв. вузов. Сер. Стр-во. 2008. № 1. С. 4–12.
12. Гениев А. Г. О динамических эффектах в стержневых системах из физически нелинейных хрупких материалов // Промышленное и гражданское строительство. 1999. № 9. С. 23–24.
13. Леонтьев Н. Н., Соболев Д. Н., Амосов Э. П. Основы строительной механики стержневых систем. М. : АСВ, 1996. 542 с.
14. Рабинович И. М. Основы строительной механики стержневых систем. М. : Госстройиздат, 1960. 516 с.
15. Митропольский Ю. Э. Нестационарные процессы в нелинейных колебательных системах. Киев : Изд-во АН УССР, 1995. 284 с.
16. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона. Новосибирск : Изв. вузов. Сер. Стр-во. 2007. № 5. С. 4–8.
17. Бондаренко В. М. К вопросу об устойчивом и неустойчивом силовом сопротивлении железобетонных конструкций. Орел : Изв. ОрелГТУ. Сер. Стр-во и транспорт. 2009. № 3. С. 9–18. ■