2024. 2(6). 3–11

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

REINFORCED CONCRETE STRUCTURES (ZHELEZOBETONNYYE KONSTRUKTSII)

ISSN 2949-1622 (PRINT)
ISSN 2949-1614 (ONLINE)
HTTPS://G-B-K.RU

УДК 624.012
DOI: 10.22227/2949-1622.2024.2.3-11

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Прогрессирующее разрушение конструктивных систем зданий с учетом силовых и коррозионных повреждений

С.И. Меркулов[1*]

[1] *Курский государственный университет, Курск, Российская Федерация*

* mersi.dom@yandex.ru

Ключевые слова: конструктивная безопасность зданий, напряженное состояние, коррозионные повреждения, конструктивная система, прогрессирующее разрушение

История статьи
Поступила в редакцию: 01.05.2024
Доработана: 14.06.2024
Принята к публикации: 19.06.2024

Для цитирования
Меркулов С.И. Прогрессирующее разрушение конструктивных систем зданий с учетом силовых и коррозионных повреждений // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 3–11.

Аннотация. Сформулированы основные направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений. Предложен иерархический подход к оценке конструктивной безопасности объектов при коррозионных повреждениях от материалов конструкций до конструктивной системы. Определены особенности коррозионной повреждаемости бетона железобетонных конструкций, проанализированы механизмы силовых и коррозионных воздействий и их влияние на прогрессирующее разрушение конструктивных систем эксплуатируемых зданий.

Progressive Collapse of Structural Systems Considering Force and Corrosion Damage

Sergei I. Merkulov[1*]

[1] *Kursk State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Kursk, Russian Federation*

* mersi.dom@yandex.ru

Keywords: structural safety of buildings, stress state, corrosion damage, structural system, progressive failure

Article history
Received: 01.05.2024
Revised: 14.06.2024
Accepted: 19.06.2024

For citation
Merkulov S.I. Progressive Collapse of Structural Systems Considering Force and Corrosion Damage. *Reinforced Concrete Structures.* 2024; 2(6):3-11.

Abstract. The main directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures have been formulated. A hierarchical approach to the assessment of structural safety of objects under corrosion damage from structural materials to structural system is proposed. Peculiarities of corrosion damageability of concrete of reinforced concrete structures are determined, mechanisms of force and corrosion effects and their influence on progressive destruction of structural systems of exploited buildings are analyzed.

Сергей Иванович Меркулов, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, Курский государственный университет, 305000, г. Курск, ул. Радищева, д. 33; eLIBRARY AuthorID: 382671, Scopus: 55917127800, E-mail: mersi.dom@yandex.ru

© Меркулов С.И., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач при обеспечении безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений является оценка конструктивной безопасности строительных конструкций и конструктивных систем, подверженных повреждениям. Длительный срок эксплуатации зданий и сооружений при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий приводит к появлению и развитию различных повреждений строительных конструкций, узлов сопряжений конструкций. В настоящее время выполнены экспериментальные и теоретические исследования, направленные на изучение влияния силовых и средовых повреждений на прочностные и деформативные параметры отдельных конструкций и конструктивных систем.

Конструктивная безопасность конструкций и конструктивных систем определяется соответствием параметров эксплуатируемых конструкций проектным значениям. Такой подход к оценке конструктивной безопасности основан на методе предельных состояний, что согласуется с нормативными положениями проектирования строительных конструкций. При этом также соблюдается единая методология как проектирования конструкций, так и при оценке конструктивной безопасности эксплуатируемых конструкций.

МЕТОД

Конструктивная система здания или сооружения представляет сложную структуру от материалов конструкций до конструктивной системы, имеющую иерархический характер и включающую следующие уровни: материалы, элементы конструкций, конструкции, узлы и сопряжения конструкций, конструктивные системы.

Основным фактором, влияющим на конструктивную безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений, являются силовые и коррозионные повреждения [1–3]. Оценку конструктивной безопасности зданий и сооружений необходимо выполнять с учетом коррозионных повреждений материалов конструкций с учетом напряженного состояния [4, 5]. Протекание коррозионных процессов в бетоне железобетонной конструкции зависит от знака действующих напряжений. Так, при сжатии в бетонных образцах эффективный коэффициент диффузии углекислого газа понижается на порядок, а при растяжении увеличивается на один-два порядка. Также противокоррозионная стойкость бетона зависит от уровня сжимающих напряжений. При сжимающих напряжениях, не превышающих нижней границы микротрещинообразования бетона, пористость бетона заметно снижается, происходит уплотнение структуры бетона, что снижает скорость проникновения в материал химически агрессивных реактивов по сравнению с ненагруженным бетоном. При более высоких сжимающих напряжениях в структуре бетона начинается процесс образования, накопления и развития микроповреждений, структура бетона разрыхляется, скорость проникновения агрессивных сред в структуру бетона возрастает. Таким образом, в этом случае процессы коррозионного и силового влияния носят взаимно усиливающий характер.

В железобетонных конструкциях коэффициенты температурного расширения для стали и бетона практически равны по величине. Но при коррозионных процессах химической и физико-химической природы происходит расширение бетона, а стальная арматура не обнаруживает собственных деформаций. Но при температурных воздействиях на такие конструкции арматура испытывает собственные деформации, противоположные деформациям бетона [5]. В этой ситуации железобетонные конструкции получают специфические повреждения, а методика определения собственных напряжений в железобетоне, основанная на равенстве усилий и неразрывности деформаций бетона и арматуры, нуждается в уточнении.

Sergei I. Merkulov, Corresponding member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Civil Engineering, Kursk State University, 33 Radishcheva street, Kursk, 305000, Russian Federation, eLIBRARY AuthorID: 382671, Scopus: 55917127800, E-mail: mersi.dom@yandex.ru

Коррозионные повреждения элементов и конструкций приводят к снижению их ресурса силового сопротивления. Прежде всего, коррозия снижает поперечное сечение элементов, но кроме такого прямолинейного последствия повреждения, вызванного агрессивными воздействиями, проявляются более сложные схемы. Коррозионные изменения прочностных и деформативных параметров бетона сжатой зоны, коррозия стержней растянутой арматуры с нарушением сцепления стержней с бетоном приводят к нарушению нормативного условия ограничения высоты сжатой зоны, что делает возможным хрупкое разрушение изгибаемых железобетонных статически определимых конструкций с коррозионными повреждениями при проектной нагрузке. Коррозионные повреждения приводят к образованию и развитию трещин, к снижению жесткости конструкций, к развитию значительных деформаций. При разработке теории силового сопротивления строительных конструкций с коррозионными повреждениями принята предпосылка об условно равномерном характере воздействия агрессивной среды по пролету и по высоте сечения конструкции. При такой постановке силовое сопротивление конструкции с коррозионным повреждением определяется в сечении с наибольшими внутренними усилиями. Однако из опыта обследования строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в агрессивных средах, следует, что зоны конструкций с наибольшими коррозионными повреждениями не совпадают с участками действия наибольших внутренних усилий. Отмеченные обстоятельства требуют развития теории силового сопротивления конструкций с определением опасных сечений с точки зрения коррозионных повреждений, направленности и уровня действующих усилий.

Конструктивная безопасность зданий и сооружений в значительной степени обеспечивается целостностью узлов сопряжений и связей конструктивной статически неизменяемой системы. При проектировании зданий и сооружений предпочтительно должны закладываться конструктивные решения, повышающие степень статической неопределимости системы здания. Другим условием обеспечения конструктивной безопасности зданий и сооружений является проектирование узлов соединения конструкций, не подверженных хрупкому разрушению [6]. Коррозионные повреждения узлов сопряжения конструкций в составе конструктивной системы приводят к изменениям граничных условий конструкций, к перераспределению усилий между элементами конструктивной системы. В первом случае, например, для каркасного железобетонного здания при коррозионном повреждении жестких узлов сопряжения ригеля с колоннами расчетная схема ригеля меняется с жестко защемленной по концам на схему шарнирно опертой балки, что приводит к снижению силового сопротивления ригеля вдвое. Во втором случае в результате перераспределения внутренних усилий между конструкциями возможны случаи возникновения в отдельных конструкциях усилий, превышающих проектные, и как следствие развитие в этих конструкциях деформаций недопустимой величины.

Относительно конструктивных систем зданий и сооружений конструктивная безопасность определяется способностью сохранять системой необходимую степень статической неопределимости, обеспечивающую восприятие проектных нагрузок при силовых и коррозионных повреждениях отдельных конструкций, узлов сопряжений и связей.

Предлагаемый иерархический подход в оценке конструктивной безопасности строительных материалов, элементов конструкций, конструкций, узлов и сопряжений конструкций, конструктивной системы требует системного подхода к созданию для рассматриваемых процессов физической, расчетной и математической моделей [7]. Остается актуальной задача разработки физической модели коррозионного повреждения железобетона с учетом режимов нагружения, изменчивости напряженного состояния, необходимости преобразования физических моделей на основе принятия мотивированных гипотез и предпосылок разработки расчетных моделей. Отсюда имеется необходимость в разработке методики и в проведении экспериментальных исследований строительных конструкций и конструктивных систем для изучения закономерностей совместного силового и коррозионного воздействия, а также ме-

ханизмов трансформирования конструктивных систем вследствие их структурных изменений (изменение граничных условий, изменение жесткости узлов и других).

Теория конструктивной безопасности зданий и сооружений должна с единых позиций описывать напряженно-деформированное состояние и оценивать резервы по первой и второй группам предельных состояний на всех этапах жизненного цикла здания и сооружения на принципах учета силовых, средовых и временных факторов, технологических воздействий, конструктивной трансформации и других факторов. Теория конструктивной безопасности является основой для разработки эффективных методов реновации, реконструкции зданий и сооружений, усиления строительных конструкций, для разработки теории живучести зданий и сооружений.

Выполненные на сегодняшний день исследования, в основном, направлены на оценку конструктивной безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений и на усиление отдельных конструкций, если в этом возникает необходимость. Причем напряженно-деформированное состояние конструкции учитывается на конкретном этапе эксплуатации объекта. Необходимо отметить, что коррозионные повреждения элементов и узлов сопряжений в конструктивных системах носят длительно развивающийся характер, сопровождающийся перераспределением усилий и изменением статической схемы. При коррозионных повреждениях в конструктивных системах практически отсутствуют случаи внезапного выключения элементов системы [8]. В конструктивных системах параллельно с коррозионными повреждениями, как уже отмечалось, протекает процесс перераспределения внутренних усилий между элементами усилий, происходит адаптация системы к изменившимся условиям эксплуатации с саморегулированием жесткостей и внутренних усилий в элементах системы. В современной строительной науке не изучены механизмы саморегулирования конструктивных систем под воздействием изменяющихся параметров эксплуатации, при возникновении коррозионных повреждений, а также при изменении граничных условий в процессе эксплуатации и реконструкции. В то же время создание теории и на ее основе практических методов, позволяющих управлять конструктивной безопасностью конструктивных систем зданий и сооружений с учетом их генезиса, обеспечит надежное и в то же время оптимальное проектирование зданий и сооружений как на стадии проектирования новых объектов, так и на стадии проектирования реконструкции и реновации.

Дальнейшее развитие теории конструктивной безопасности зданий и сооружений с учетом концепции иерархического построения следует рассматривать по следующим направлениям:

- исследование механизмов повреждения железобетона от силовых и коррозионных воздействий с учетом знака и уровня напряжений;
- выполнение экспериментально-теоретических исследований несущей способности, деформативности и трещиностойкости отдельных конструкций и конструктивных систем в условиях проявления коррозионных повреждений бетона и арматуры, повреждений узлов сопряжения конструкций, изменения системы при ее усилении;
- разработка положений теории управления конструктивной безопасностью зданий и сооружений, отражающей генезис конструктивных систем, квазистационарность эксплуатации, реконструкцию и реновацию объектов;
- разработка модели адаптационной эволюции адекватной квазистационарности конструкций и конструктивных систем.

Столь пристальное внимание к силовым и коррозионным повреждениям объясняется тем, что подобные повреждения отдельных элементов конструктивных систем зданий могут быть причинами прогрессирующих разрушений эксплуатируемых зданий [9].

При проектировании объектов с поврежденными конструкциями не выполняется расчет на возможное прогрессирующее разрушение, и для оценки локального разрушения необхо-

димо достоверно оценить влияние подобных повреждений, обеспечить конструктивную безопасность конструкции и в конечном счете предотвратить возможное прогрессирующее разрушение [10, 11].

В настоящее время ряд методик оценивает ситуации с ограниченными областями локальных разрушений с точки зрения возможного их развития по схеме прогрессирующего разрушения [12–14]. Принята общая методология снижения рисков прогрессирующих разрушений зданий:

- предупреждение или полное исключение организационными методами возможности аварийного воздействия, например взрывов в результате теракта, а именно рассматривается такая расчетная ситуация, при которой из конструктивной системы мгновенно удаляется один или несколько элементов;
- уменьшение объема разрушения объекта конструктивными методами: создание общей конструктивной неразрезности каркасов, введение в конструктивную схему дополнительных связей, непрерывное армирование элементов монолитных железобетонных перекрытий, исключение хрупкого разрушения отдельных элементов и узлов их сопряжения и другие;
- предотвращение прогрессирующего обрушения: на основании анализа выявляются конструктивные элементы, разрушение которых неизбежно приводит к прогрессирующему обрушению и причинению наибольшего ущерба объекту, персоналу и оборудованию. При проектировании обеспечивается «абсолютная» прочность данного элемента на действие аварийных нагрузок.

Наиболее распространенным методом защиты от прогрессирующего разрушения проектируемых зданий является уменьшение объемов прогрессирующего разрушения за счет его локализации. Каркас здания «разбивается» на отдельные объемы, выход очага разрушения за пределы которых исключен, для чего 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 рекомендуется в каркасах выполнять связи по наружным колоннам, вертикальные связи, контурные связи, внутренние связи. Безопасность проектируемого здания можно 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 [6], армирование, требуемое для восприятия аварийного воздействия и приложенных нагрузок, превышает в 3–3,5 раза количество арматуры, необходимое из расчета для обеспечения несущей способности конструкций при проектных нагрузках. Таким образом, при рассмотрении различных вариантов возможного прогрессирующего разрушения анализируются все возможные варианты локальных повреждений. Но при этом параллельно необходимо решать задачу экономичности полученного технического решения.

Варианты реализации прогрессирующего разрушения конструктивных систем:

1) локальное разрушение поврежденной конструкции при проектных нагрузках, приводящее к перераспределению усилий в элементах системы с возможным последующим прогрессирующим разрушением конструктивной системы;

2) локальное разрушение отдельного элемента при аварийном воздействии, приводящее к лавинообразному разрушению конструктивной системы;

3) потеря устойчивости элемента конструкции, приводящая к лавинообразному разрушению конструктивной системы;

4) комбинация факторов, приводящих к прогрессирующему разрушению конструктивной системы.

Локальное разрушение конструкции при проектных нагрузках, приводящее к перераспределению усилий в элементах системы с возможным последующим прогрессирующим разрушением конструктивной системы, возможно вследствие таких деградационных процессов, как старение, коррозия и других. В этом случае речь идет о разрушении конструкций, эксплуатирующихся длительное время в условиях, снижающих проектную несущую способность конструкций.

Причинами такого снижения несущей способности являются силовые повреждения, а также средовые повреждения (коррозионные, температурные и другие). Наиболее сложной является задача учета эксплуатационных повреждений для предотвращения прогрессирующего разрушения конструктивных систем зданий и сооружений с железобетонными элементами. Прогрессирующее разрушение железобетонного каркаса с эксплуатационными повреждениями конструкций возможно при проектных нагрузках или даже при нагрузках меньшей величины. Конструктивная система здания или сооружения представляет сложную структуру, имеющую иерархический характер от материалов конструкций до конструктивной системы: материалы; элементы конструкций; конструкции; узлы и сопряжения конструкций; конструктивные системы. При выявлении возможного прогрессирующего разрушения конструктивной системы необходим также иерархический подход в оценке значимости эксплуатационных повреждений.

В случае коррозионных повреждений элементов конструктивной системы или узлов сопряжений элементов реализуются схемы прогрессирующего разрушения конструктивных: систем:

- локальное разрушение поврежденной конструкции, приводящее к перераспределению усилий в элементах системы до величин, превышающих расчетные значения;
- потеря устойчивости элемента конструкции вследствие повреждения элемента или узла сопряжения, приводящая к лавинообразному разрушению конструктивной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существующие документы, содержащие положения по защите зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения, направлены на проектирование объектов, а не на решение подобной задачи для эксплуатируемых зданий и сооружений, и не учитывают эксплуатационные повреждения отдельных элементов и узлов конструктивной системы.

Достоверно оценить эксплуатационные повреждения железобетонных элементов конструктивных систем позволит теория конструктивной безопасности, позволяющая описать с единых позиций напряженно-деформированное состояние и оценить резервы конструкции на всех этапах жизненного цикла здания и сооружения на принципах учета силовых, средовых и временных факторов, технологических воздействий, конструктивной трансформации и других факторов [13].

Дальнейшее развитие теории конструктивной безопасности зданий и сооружений следует рассматривать по следующим направлениям:

- исследование механизмов повреждения железобетона от силовых и коррозионных воздействий с учетом знака и уровня напряжений с позиций возможности локального разрушения отдельной конструкции как причины прогрессирующего разрушения конструктивной системы;
- разработка положений теории управления конструктивной безопасностью зданий и сооружений, отражающей генезис конструктивных систем, квазистационарность эксплуатации;
- определение критерия конструктивной безопасности систем с учетом композиционного и силового управления конструкциями и конструктивными системам зданий и сооружений;

- разработка модели адаптационной эволюции адекватной квазистационарности конструкций и конструктивных систем.

Реализация сформулированных направлений исследования и развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений позволит получить решения, открывающие возможность управления конструктивной безопасностью объектов, и решение задачи противостояния прогрессирующему разрушению конструктивных систем эксплуатируемых зданий и сооружений.

Анализом экспериментально-теоретических исследований 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, в расчетных методиках это явление называют «динамическим эффектом». В настоящее время сформировались направления расчета конструктивных систем при разрушении элемента и возникновении опасности прогрессирующего обрушения. 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, в которых линейная статическая процедура требует применения повышающего коэффициента к нагрузкам, учитывающего как нелинейные, так и динамические эффекты. Для оценки динамического эффекта в практических расчетах применяют коэффициент динамичности по нагрузке. Во многих методиках коэффициент динамичности по нагрузке принят равным 2,0 при упругом расчете конструктивной системы, величина коэффициента снижается, если расчет системы выполняется с учетом пластических деформаций. Введение коэффициента динамичности позволило упростить учет динамического эффекта при мгновенном разрушении одного из элементов конструктивной схемы, а именно динамический расчет привести к статическому расчету. Основной задачей для эффективного применения этого метода является установление дифференцированных коэффициентов динамичности, учитывающих работу конструктивной системы при динамических аварийных воздействиях, нелинейный характер деформирования материалов, геометрически нелинейное деформирование конструктивной системы в целом. Разработанные на сегодняшний день методы предотвращения прогрессирующего разрушения условно можно разделить на три группы. Первую группу составляют методы «возможных повреждений». В соответствии с этими методами при проектировании зданий и сооружений к расчету на проектные нагрузки выполняют динамический расчет на особые нагрузки. При этом учитываются изменения прочностных и деформативных характеристик материалов в условиях кратковременного динамического нагружения. В расчетной ситуации не выполняется исключение одного или нескольких несущих конструктивных элементов в зоне локального разрушения.

Вторую группу составляют методы, в которых проектируют «ключевые элементы» на восприятие особых воздействий, что исключает возникновение локального разрушения, или выполняют оценку перераспределения внутренних усилий в системе при удалении элемента (или нескольких элементов). В обоих случаях расчетные значения усилий и перемещений не должны превышать допустимых значений. Данные методы базируются на вероятностном подходе к построению на стадии проектирования сценария прогрессирующего разрушения конструктивной системы, по которому назначают «ключевой элемент» или группу «ключевых элементов», ответственных за противостояние прогрессирующему разрушению. То есть задача решается только в рамках предложенного сценария. Проявление чрезвычайной ситуации, вызывающей локальное разрушение отдельной конструкции и как следствие прогрессирующее разрушение, носит случайный характер как по схеме приложения, так и по величине аварийной нагрузки. Указанные методы ограничены в применении, например, практически невозможно определить прогрессирующее разрушение высотного каркасного здания связе-

вой системы в случае разрушения одной из колонн. Метод «ключевого элемента» эффективен в том случае, когда однозначно на стадии проектирования известно место приложения и величина внешней особой нагрузки. Например, в случае проектирования объекта, в отдельном помещении которого по технологическим условиям возможен взрыв газовоздушной среды. Проектирование «ключевых элементов» конструктивной системы приводит к повышению материалоемкости проектного решения.

Третья группа методов ограничивает зону локального разрушения вследствие удаления элемента (или нескольких элементов) конструктивными методами — постановкой системы горизонтальных и вертикальных связей. Эти методы реализуются устройством в конструктивной системе высотных зданий связевых этажей, применением в конструктивной схеме мощных нижних ригелей, применением в несущих каркасах вертикальных и горизонтальных связей с заанкериванием связей в смежных конструкциях. Также известен метод разделения конструктивных систем, когда статически неопределимые конструктивные системы каркасного здания разделяются на независимые блоки шарнирными вставками. В этом случае при разрушении одного элемента динамический эффект локализуется в пределах одного блока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация сформулированных направлений исследования и развитие теории конструктивной безопасности зданий и сооружений позволят получить решения, открывающие возможность управления конструктивной безопасностью объектов, отражающую генезис конструктивных систем, квазистационарность эксплуатации, реконструкцию и реновацию объектов, на основании критерия конструктивной безопасности систем с учетом композиционного и силового управления конструкциями и конструктивными системам зданий и сооружений.

Приведенные методы противодействия прогрессирующему разрушению относятся к особо опасным, технически сложным и уникальным объектам. Однако с учетом риска чрезвычайных ситуаций оправдано защищать от возможного прогрессирующего разрушения и здания массовой застройки. В жилых зданиях наиболее вероятным случаем прогрессирующего разрушения является обрушение плит перекрытий. При проектировании узла опирания плит в стыках необходимо обеспечить сохранность узла при действии возможных аварийных нагрузок.

Представленный анализ показал, что защита конструктивных систем от прогрессирующего обрушения реализуется по трем основным направлениям: снижение до приемлемого уровня рисков аварийных воздействий; обеспечение абсолютной несущей способности «ключевого элемента» на восприятие особых воздействий; ограничение масштабов прогрессирующего обрушения с удалением отдельного элемента локальной зоной. Эти методы не позволяют решить проблему прогрессирующего разрушения конструктивных систем эксплуатируемых зданий и сооружений при наличии повреждений. С учетом специфики рассматриваемых вопросов положения расчетных методов требуют соответствующей корректировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Merkulov S.I.* Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures in Service // World Applied Sciences Journal. 2013. № 25 (12). С. 1747–1750.

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

3. *Бондаренко В.М., Меркулов С.И.* Методологические основы теории конструктивной безопасности реконструированного железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С. 77–80.

4. *Бондаренко В.М.* Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5. С. 13–17.

5. *Подвальный А.М.* Физико-химическая механика — основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона // Бетон и железобетон. 2000. № 5. С. 23–27.

6. *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.

7. *Бондаренко В.М., Федоров В.С.* Модели в теориях деформации и разрушения строительных материалов // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 2. С. 103–106.

8. *Меркулов С.И.* Основы теории реконструкции железобетона. Курск : Курск. гос. тех. ун-т., 2009. 248 с.

9. *Merkulov S.I., Tatarenkov A.I., Lesovik R.V.* Assessment of progressive collapse of operated buildings and structures based upon structural damage // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME). AER-Advances in Engineering Research. 2017. Т. 133. С. 409–413.

10. *Булгаков С.Н., Тамразян А.Г., Рахман И.А., Степанов А.Ю.* Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера : научное издание. Под общ. ред. А.Г. Тамразяна. М. : Издательство АСВ, 2012. 304 с.

11. *Merkulov S.I., Lesovik R.V., Metrohin A.A., Kalashnikov N.V.* Development of Theory of Structural for Buildings and Construction // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 31. № 4. Pp. 531–533.

12. МНСН 4.19–05. Многофункциональные высотные здания и комплексы. М. : Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции г. Москвы, ОАО ЦНИИЭПжилища, 2005. 70 с.

13. МГСН 4.19–2005. Временные нормы и правила. Проектирование многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве. Введ. 2005-12-28. М. : Правительство Москвы, Москомархитектура, 2005.

14. EN 1991-1-7. Part 1-7: General Actions — Accidental actions. CEN. 2003, p. 69.

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

REFERENCES

1. Merkulov S.I. Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures in Service. *World Applied Sciences Journal*. 2013. No. 25 (12). Pp. 1747-1750.

2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Concepts and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under force and environmental influences. *Industrial and civil construction*. 2013. No. 2. Pp. 28-31.

3. Bondarenko V.M., Merkulov S.I. Methodological foundations of the theory of structural safety of reconstructed reinforced concrete. *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2008. No. 3. Pp. 77-80.

4. Bondarenko V.M. Corrosion damage as a cause of avalanche destruction of reinforced concrete structures. *Structural mechanics and design of structures*. 2009. No. 5. Pp. 13-17.

5. Podvalny A.M. Physico-chemical mechanics — the basis of scientific ideas about the corrosion of concrete and reinforced concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 2000. No. 5. Pp. 23-27.

6. Nazarov Yu.P., Gorodetsky A.S., Simbirkin V.N. On the problem of ensuring the survivability of building structures under emergency impacts. *Structural mechanics and design of structures*. 2009. No. 4. Pp. 5-9.

7. Bondarenko V.M., Fedorov V.S. Models in theories of deformation and destruction of building materials. *Academia. Architecture and construction*. 2013. No. 2. Pp. 103-106.

8. Merkulov S.I. *Fundamentals of the theory of reinforced concrete reconstruction*. Kursk : Kursk. state those. Univ., 2009. 248 p.

9. Merkulov S.I., Tatarenkov A.I., Lesovik R.V. Assessment of progressive collapse of operated buildings and structures based upon structural damage. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME). AER-Advances in Engineering Research*. 2017. Vol. 133. Pp. 409-413.

10. Bulgakov S.N., Tamrazyan A.G., Rakhman I.A., Stepanov A.Yu. *Reducing risks in construction during natural and man-made emergencies: Scientific publication*. Under general ed. A.G. Tamrazyan. Moscow : ASV Publishing House, 2012. 304 p.

11. Merkulov S.I., Lesovik R.V., Metrohin A.A., Kalashnikov N.V. Development of Theory of Structural for Buildings and Construction. *World Applied Sciences Journal*. 2014. Vol. 31. No. 4. Pp. 531-533.

12. MNSN 4.19–05. Multifunctional high-rise buildings and complexes. Moscow : Department of Urban Policy, Development and Reconstruction of Moscow, OJSC TsNIIEPzhilishcha, 2005. 70 p.

13. MGSN 4.19–2005. Temporary norms and rules. Design of multifunctional high-rise buildings and building complexes in Moscow. Enter. 2005-12-28. Moscow : Government of Moscow, Moskomarkhitektura, 2005.

14. EN 1991-1-7. Part 1-7: General Actions — Accidental actions. CEN. 2003, p. 69.

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