

В.И. КОЛЧУНОВ¹, Т.А. ИЛЬЮЩЕНКО^{1,2}, Н.В. ФЕДОРОВА¹,
С.Ю. САВИН¹, В.В. ТУР³, А.А. ЛИЗОГУБ³

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

²Курский государственный университет, г. Курск, Россия

³Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

ЖИВУЧЕСТЬ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Проблеме живучести конструктивных систем зданий и сооружений уделяется все больше внимания во всем мире. Предлагаемая обзорная статья направлена на систематизацию, обобщение и анализ новых результатов исследований по вопросам, относящимся к разработке расчетных моделей статического, динамического и статико-динамического сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений в условиях особых и аварийных воздействий, а также критериев, применяемых при проверках их живучести в особых расчетных ситуациях. Приведен критический обзор-анализ зарубежных и отечественных публикаций по вопросам, касающимся постановочных и концептуальных подходов к оценке механической безопасности зданий и сооружений на этапах жизненного цикла и при аварийных ситуациях, силовых и средовых факторов сопротивления конструктивных систем зданий при динамических нагрузках в аварийных ситуациях, а также расчетных моделей сопротивления несущих систем в целом. Особое внимание уделено анализу работ, относящихся к оценке живучести конструктивных систем зданий и сооружений полу вероятностными (детерминированными), вероятностными методами и методом оценки рисков. В заключении статьи сформулированы основные выводы и возможные направления развития исследований.

Ключевые слова: живучесть, особое предельное состояние, критерии особого предельного состояния, механическая безопасность, оценка риска

V.I. KOLCHUNOV¹, T.A. ILIUSHCHENKO^{1,2}, N.V. FEDOROVA¹,
S.Y. SAVIN¹, V.V. TUR³, A.A. LIZAHUB³

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Kursk State University, Kursk, Russia

³Brest State Technical University, Brest, Belarus

STRUCTURAL ROBUSTNESS: AN ANALYTICAL REVIEW

Abstract. The problem of robustness of structural systems of buildings and structures is receiving more and more attention in the publications of Russian and foreign authors. In this regard, the presented review article is aimed at systematizing, summarizing and analyzing new research results on issues related to the development of calculation models of static, dynamic and static-dynamic resistance of buildings structural systems under conditions of special and emergency impacts, as well as criteria, used when testing their robustness in special design situations, seems relevant. To achieve this goal, a critical review and analysis of foreign and domestic publications is provided on the issues of formulation and conceptual approaches to assessing the mechanical safety of buildings and structures at the stages of the life cycle of buildings and in emergency situations, force and environmental resistance factors of buildings structural systems under dynamic loads in emergency situations as well as calculation models of the resistance of load-bearing.

Particular attention in the scientific review is paid to the analysis of works related to assessing the robustness of buildings structural systems using semi-probability (deterministic), probabilistic methods and risk assessment methods. The main conclusions and possible directions for the development of these studies are formulated in the conclusion of the article.

Key words: robustness, special limit state, criteria for special limit state, mechanical safety, risk assessment.

© Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А., 2024

Введение

Проблема обеспечения живучести конструктивных систем зданий и сооружений в особой расчётной ситуации и разработка методов их защиты от прогрессирующего (непропорционального) обрушения являются новым направлением общей теории конструктивной безопасности. В последние два-три десятилетия после ряда аварий, вызванных особыми воздействиями природного, техногенного и террористического характера, исследования в этом направлении все более интенсивно проводятся во всем мире. Одним из *первых* зарегистрированных примеров прогрессирующего обрушения было разрушение колокольной башни при соборе *St Mark's Campanile* в июле 1902 года из-за появления трещин в каменной кладке вследствие пожара. А одним из самых *известных* – обрушение части здания *Ronan Point* (Лондон, 1968г.) из-за взрыва бытового газа в квартире на 18 этаже. Среди других случаев прогрессирующего обрушения можно отметить следующие:

- разрушение федерального здания имени Альфреда Мара (*Murrah Federal Office Building*) в Оклахома-Сити, США 19 апреля 1995 г. из-за взрыва заминированного грузовика вблизи от здания, в результате чего элементы несущей системы получили серьезные повреждения (168 погибших);
- обрушение Квебекского моста в 1907 году в Канаде из-за ошибок, допущенных при расчетном обосновании проектных решений (75 человек погибло, 11 пострадало),
- разрушение кровли на Таганрогском металлургическом заводе в 1995 году в Ростовской области, в результате нарушения норм строительства, допущенных при возведении предприятия (14 человек погибло, 17 пострадало);
- обрушение покрытия «Трансвааль-парка» на юго-западе Москвы в 2004 году, вызванное ошибками, допущенными при проектировании (28 погибших);
- обрушение покрытия Басманного рынка в 2006 году из-за ошибок при проектировании, нарушений при эксплуатации здания (68 погибших);
- разрушение комплекса *Rana Plaza* в Бангладеше в 2013 году из-за нарушений при строительстве и эксплуатации (1134 погибших);
- обрушение 12-этажного отеля в *Surfside Beach*, Флорида в 2021 году из-за нарушений при эксплуатации и коррозионного повреждения конструкций (98 погибших).

В результате расследования причин этих и других обрушений были накоплены знания о феномене прогрессирующего обрушения. Опубликованы российские и зарубежные обзорно-аналитические работы [1,2,3], в которых выполнена систематизация и обобщение используемой терминологии, классификация типов прогрессирующего обрушения, анализ существующих концептуально-методологических подходов к обеспечению конструктивной безопасности, представлены экспериментально-теоретические исследования сопротивления железобетонных конструктивных систем локальным повреждениям и отказам.

В то же время, постоянно появляются новые виды угроз, приводящих к локальным повреждениям и разрушениям в несущих системах зданий. В связи с отмечаемым в последние годы применением в вооруженных конфликтах беспилотных летательных аппаратов возрастает актуальность решения задач защиты от прогрессирующего обрушения несущих систем существующих зданий и сооружений. В частности, обрушение секции жилого здания в Белгороде (рисунок 1) является не только результатом террористической атаки, но и следствием отсутствия специальных конструктивных мероприятий по защите от прогрессирующего обрушения, поскольку здание было спроектировано и построено до введения соответствующих нормативных документов. Всё это требует переосмысления имеющегося опыта, выработки новых и совершенствования существующих подходов к обеспечению механической безопасности конструктивных систем зданий при особых

воздействиях с учетом возможности появления новых угроз в течение срока эксплуатации зданий и сооружений.



Рисунок 1 – Общий вид разрушенной секции жилого здания по ул. Щорса в г. Белгороде в результате террористической атаки 12 мая 2024 г.

В научной литературе и нормативных документах выделяется несколько подходов к решению проблемы снижения риска прогрессирующего разрушения. Согласно [7], можно выделить прямой и не прямой (косвенный) методы проектирования для обеспечения живучести конструктивных систем зданий. Прямое проектирование можно разделить на метод альтернативного пути передачи нагрузки (*Alternate load path method*), при котором конструктивная система должна сохранить живучесть после выключения одного из несущих элементов. В нормах некоторых зарубежных стран также используется метод локального сопротивления (*Specific load resistance method*), при котором ключевые элементы должны сохранить несущую способность после аварийного воздействия на них.

Непрямые методы включают превентивные мероприятия, предусматриваемые при проектировании зданий и сооружений и способствующие повышению защиты от прогрессирующего обрушения, в том числе контроль доступа, специальные устройства, ограничивающие подъезд к зданиям автомобилей и другой техники и др.

В исследованиях [8,9] рассмотрены различные методы и подходы прямого проектирования, используемые для предотвращения прогрессирующего обрушения вследствие отказа или повреждения одной из несущих конструкций. В [10] рассмотрено усиление элементов каркаса здания с помощью стальных пластин для обеспечения живучести конструктивной системы при отказе одной из колонн. В [11] показано, что конструктивные мероприятия по обеспечению сейсмостойкости несущих систем зданий оказывают благоприятное влияние и на сопротивление прогрессирующему обрушению.

Применительно к железобетонным каркасам многоэтажных зданий существует несколько подходов к решению проблемы обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения. К ним относятся увеличение сечений несущих элементов каркаса здания [12], интенсивности и схемы их армирования [13], постановка дополнительных элементов в виде системы связей [5, 14, 15], исключение односторонних связей в соединениях элементов [16] и др.

Разработка теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений связана с накоплением статистических данных об особенностях отклика сооружений при отказе

отдельных конструкций или их элементов, с проведением и анализом результатов экспериментальных и численных исследований.

В связи с этим в настоящей статье приведен обзор-анализ результатов исследований (1) в области концептуальных подходов к оценке механической безопасности зданий и сооружений на этапах жизненного цикла и при аварийных ситуациях; (2) в области учета силовых и средовых факторов сопротивления конструктивных систем зданий динамическим догрузениям в аварийных ситуациях; (3) особенностей построения расчетных моделей сопротивления элементов, узлов и конструктивных систем в целом. Особое внимание в обзоре уделено анализу новых интенсивно развивающихся исследований, относящихся к оценке живучести конструктивных систем зданий и сооружений полувероятностными (детерминированными), вероятностными методами и методом оценки рисков.

Расчетные ситуации и методы защиты конструктивных систем зданий от прогрессирующего обрушения

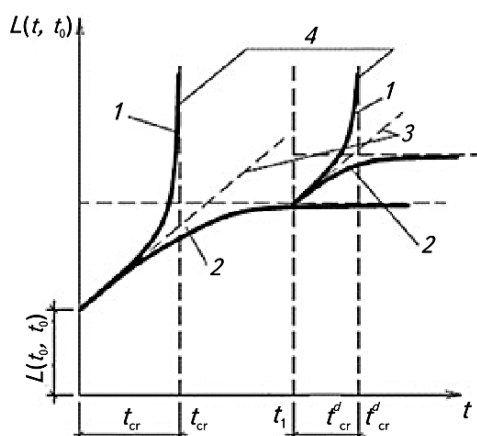
Согласно исследованиям [2, 7, 17] прогрессирующее обрушение может быть вызвано целым рядом угроз, включая ошибки при проектировании, строительстве и эксплуатации, деградацию свойств материалов под воздействием окружающей среды и др. В работе [18] приведен анализ аварийных воздействий, согласно которому основными причинами, приводящими к прогрессирующему обрушению, являются нарушение правил эксплуатации, большие человеческие ошибки при проектировании и возведении, низкое качество изготовления строительных конструкций.

В настоящее время существует два подхода к проверке сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений особым или аварийным воздействиям. Первый подход – традиционный, применяется, когда известна или установлена величина и место приложения особого воздействия (проектный сценарий, основанный на идентифицированных воздействиях). Для этого случая разработана методика и исходные данные приведены в нормативном документе [19]. Однако в связи с постоянным ростом потенциального числа угроз, приводящих к начальному локальному разрушению/отказу этот подход не представляется перспективным. Второй и наиболее часто встречающийся подход – проектирование защиты от прогрессирующего обрушения, когда величина, направление, время приложения и продолжительность действия особого или аварийного воздействия неизвестны. Применительно к этому случаю принят ситуационный подход, предполагающий рассмотрение вторичной расчетной схемы сооружения, в которой рассматривается по отдельности последовательное удаление одного из несущих элементов. При этом проверка живучести поврежденной конструктивной системы должна показать, что не произойдет разрушения в «зоне возможного локального разрушения» [20] и тем более прогрессирующего (непропорционального) обрушения всего здания или большей его части. При таком расчете проверяется соответствие конструкций требованиям и критериям особого предельного состояния. Расчетный анализ защиты от прогрессирующего обрушения согласно [20, 21, 22, 23] может быть произведен в статической постановке (NLS-нелинейная статика), либо кинематическим методом теории предельного равновесия, а также в динамической постановке (NLD- нелинейная динамика).

В работе [24] показано, что при проверке особого предельного состояния эксплуатируемых зданий и сооружений появляется необходимость учета дополнительных особенностей, таких как изменение свойств материалов, схем приложения воздействий, длительности эксплуатации конструктивных систем, наличия сформировавшегося напряженно-деформированного состояния в несущих элементах к моменту реализации особой расчетной ситуации. К исследованиям в этом направлении можно отнести публикации Г.А. Гениева, А.В. Забегаева, Э.Н. Кодыша, В.И. Колчунова, А.Г. Тамразяна, Н.В. Федоровой, Bažant Z.P., Li S. В них рассматриваются вопросы статической и динамической прочности,

устойчивости и надежности железобетонных конструкций. При этом в качестве наиболее часто применяемых физических моделей силового сопротивления железобетона здесь используются модели жесткопластического типа, каркасно-стержневые, блочные и другие. В работе [25] сформулированы отдельные направления развития деформационных моделей теории железобетона при особых воздействиях, представлена общая модель кинетики неравновесных процессов деформирования бетона при внезапных структурных перестройках, связанных с внезапным изменением уровня напряженного состояния (рисунок 2).

В исследованиях В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунова [26] развивается общая теория расчета железобетонных конструкций с учетом совместного влияния различных факторов. В этом направлении можно также отметить работы [27,28], в которых предложена достаточно эффективная расчетная модель квазисплошного тела, обеспечивающая устранение разрыва в функции жесткости после образования трещин в железобетоне. За расчетное принимается не сечение с трещиной, а сечение между трещинами с линейным распределением деформаций в сечении по его высоте. Однако данные модели не учитывают специфику поведения конструкций при особых и аварийных воздействиях, когда возникает запредельное или, следуя российским нормам, особое предельное состояние в конструктивных системах. Учет режима нагружения при структурной перестройке, вызванной начальным повреждением или разрушением выполнен в работе [3]. В зарубежных исследованиях [29,30] оценивается также влияние мембранного, цепного эффекта при внезапном удалении из конструктивной системы несущей колонны.



1 – кинетика неустойчивого состояния $m < 0$ и $\sigma_b > R_f$; 2 – кинетика безразличного состояния $m = 0$ и $\sigma_b = R_f$; 3 – область устойчивого состояния $m \geq 1$ и $\sigma_b \leq R_f$; 4 – асимптота по L

Рисунок 2 - Схема кинетики неравновесного процесса деформирования бетона в зависимости от знака и величины параметра m , согласно работе [25]

В российских и зарубежных нормативных документах [19, 21, 22, 31] устанавливаются требования по обеспечению живучести зданий и сооружений при гипотетическом удалении одного из несущих элементов. При проектировании многоэтажных зданий чаще всего в качестве таких элементов выступают угловые колонны и колонны средних рядов здания.

В-строительной отрасли, в отличие от авиастроения и кораблестроения, до настоящего времени нет устоявшегося определения термина «живучесть». В авиационных конструкциях это понятие уже широко используется в научных публикациях и включено в нормы [32]. Согласно [32] «под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за 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».

Что касается строительных конструкций, зданий и сооружений, то в работах [0, 5, 6] под живучестью понимается *«характеристика сопротивляемости конструктивной системы прогрессирующему разрушению при внезапных особых (запроектных) воздействиях»*. В качестве количественной меры, характеризующей способность системы сопротивляться прогрессирующему обрушению, может быть использован относительный индекс живучести *RPI*, предложенный Fallon et al. [153]:

$$RRI = \frac{\lambda_{damaged} - \lambda_{design}}{\lambda_{intact} - \lambda_{design}}; \quad (1)$$

$$\lambda_{damaged} = \frac{L_{damaged}}{L_{design}}, \quad \lambda_{intact} = \frac{L_{intact}}{L_{design}},$$

где L_{design} – проектная нагрузка, L_{intact} – несущая способность неповрежденной конструктивной системы по первичной расчетной схеме, $L_{damaged}$ – несущая способность поврежденной несущей системы по вторичной расчетной схеме.

Параметры $\lambda_{damaged}$ и λ_{intact} являются множителями к проектной нагрузке, аналогичные параметру λ по работе [5]. Поиск значений параметров осуществляется в предположении, что несущая способность конструктивной системы здания исчерпана, если в ее первичной (применительно к λ_{intact}) или модифицированной в результате удаления несущего элемента расчетной схеме (применительно к $\lambda_{damaged}$) наблюдаются вторичные разрушения. При этом для конструкций перекрытий допускается разрушение одного или нескольких сечений по длине элемента при условии частичного сохранения несущей способности за счет перехода к мембранному или цепному механизму сопротивления.

Методы проверки живучести конструктивных систем зданий и сооружений

Согласно исследованиям [6] для проверок живучести конструктивных систем в особых расчётных ситуациях применяют следующие методы: полу вероятностный метод частных и глобальных коэффициентов; полностью вероятностные; методы, основанные на систематической оценке рисков.

В тех случаях, когда параметры воздействий и сопротивления элементов конструктивной системы при рассматриваемой особой расчетной ситуации наперед известны, расчет на прогрессирующее обрушение в нелинейной постановке можно рассматривать как детерминированный или полувероятностный. При этом надежность конструкций при проектировании обеспечивается путем введения системы частных коэффициентов (коэффициенты надежности по нагрузке, по материалу, коэффициент условия работы) [34]. Такая ситуация возможна при проектировании и реконструкции зданий и сооружений, когда геометрические параметры конструкций, прочность и деформативность материалов могут быть установлены в результате обследования. Однако на практике значения ряда параметров, как правило, не могут быть однозначно установлены заранее, что требует вариации расчетных моделей для различных аварийных расчетных ситуаций с целью выявления среди них наиболее невыгодных, т.е. нельзя получить ответ на вопрос о том, какова вероятность безотказной работы конструкции в данный промежуток времени. Поэтому дальнейшее развитие теории расчета конструктивных систем связано с вероятностными методами прогнозирования их живучести, к которым можно отнести нормируемые значения допустимых мер надёжности, применяемые при оценке живучести конструктивных систем при особых и аварийных воздействиях. Хотя следует заметить, что понятия «живучесть» и «надежность» технических систем не эквивалентны [33, 35].

В последние годы всё большую актуальность приобретает вероятностный метод, который во многих исследованиях предлагается использовать для количественной оценки безопасности конструкций зданий и сооружений при внезапном выключении из работы одного из несущих элементов. Так, в работе [33, 34, 36] рассмотрены методы теории вероятности технических и строительных систем и показана возможность применения теории случайных процессов к решению ряда задач теории надежности.

В работе [37] Тур В.В. и Надольский В.В. говорят о несовершенстве результата, полученного через численное моделирование, который содержит неопределенности, обусловленные идеализациями и упрощениями, принятыми в процессе создания модели. Они предлагают для их учета и обеспечения требуемого уровня надёжности разработать формат проверки безопасности с соответствующими значениями частных и глобальных (при выполнении нелинейных расчётов) коэффициентов безопасности.

Вероятностная оценка риска для многоэтажных зданий, подвергающихся особым воздействиям рассмотрена в исследовании Bassam A. и других [38]. Здесь была применена схема определения вероятности событий на основе модели, включающей основные требования описания неопределенности особых воздействий, связанного с ними локального разрушения, а также последствий прогрессирующего обрушения. Упрощенный вариант вероятностной оценки железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапном удалении несущей колонны с учетом возникающих динамических эффектов предложен в исследовании [40]. В [41] для оценки сопротивления конструктивной системы в особой расчетной ситуации используется индекс надежности (R_i).

В исследовании [42] приведена методика расчета железобетонных конструктивных систем, учитывающая риски финансовых потерь, связанных с возможным возникновением аварийной ситуации в результате выключения из работы несущего элемента. Здесь, на основе метода конечных элементов предложены упрощенные подходы, позволяющие моделировать горизонтальное воздействие с последующим полным или частичным исключением из эксплуатации части бетонного сечения.

В настоящее время во многих зарубежных исследованиях используется метод симуляций Монте-Карло. В работах [38, 44, 45] рассмотрен вероятностный подход к оценке живучести на основе метода Монте-Карло для выполнения анализа конструкций, в котором учтены вероятностные формулировки моделей нагрузок и воздействий, силового сопротивления материалов, наличие возможных ошибок и неопределенностей в расчетных моделях.

Однако использование метода Монте-Карло предполагает решение задачи живучести численным методом. В отличие от этого метода в работе Г.А. Гениева [47] построена аналитическая расчетная модель и алгоритм оптимизации параметров живучести железобетонных балочных и стержневых систем в особых предельных состояниях при внезапном (хрупком) выключении в них отдельных связей или сечений и показана возможность использования метода прямого аналитического анализа в замкнутом виде. Предлагаемая в работе [47] методика оптимизации параметра живучести железобетонных стержневых конструктивных систем строится на основе принципа эквиградиентности Г.А. Гениева [48] и применения прямого метода вероятностного анализа, позволяет учитывать изменчивость свойств материалов, характеристик сечений, нагрузок и других факторов, определяющих несущую способность конструкций.

В [47] исследовано влияние топологии конструктивных систем на их живучесть в особой расчетной ситуации на примере шпренгельной фермы. Варьируя углом наклона крайних стержней α , определена вероятность неразрушения конструкции фермы при удалении стойки шпренгеля (рисунок 3).

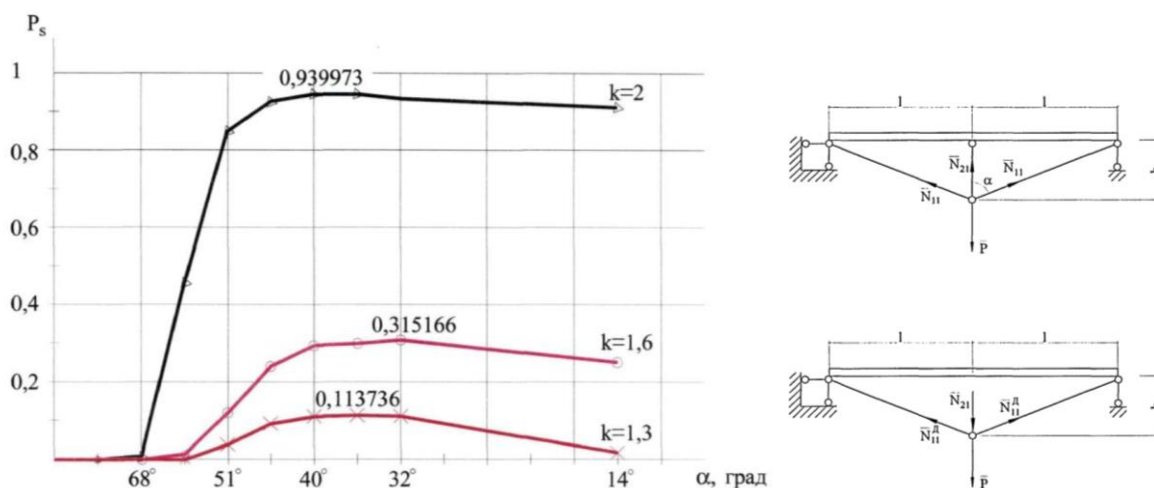


Рисунок 3 - Графики изменения вероятности неразрушения фермы в предельном состоянии при варьировании угла наклона раскосов согласно [48]

Оценка риска и надежности конструктивных систем зданий и сооружений при особых и аварийных воздействиях является третьим подходом в классификации [6] для измерения живучести. Согласно [49] под риском понимается вероятностная мера опасности, установленная для данного объекта в виде возможных потерь за определенный период времени (рисунок 4). В зависимости от закона распределения времени безотказной работы применяют расчеты надежности при экспоненциальном, нормальном, вейбулловском и других законах распределения [50]. В простейшем варианте [49] риск отказа, обусловленного опасностью H определенной интенсивности, может быть определен по формуле (2):

$$P(F) = P(H) \cdot P(F|H), \quad (2)$$

где $P(F)$ – вероятность риска, $P(H)$ – вероятность(частота) появления опасности, $P(F|H)$ – условная вероятность отказа.

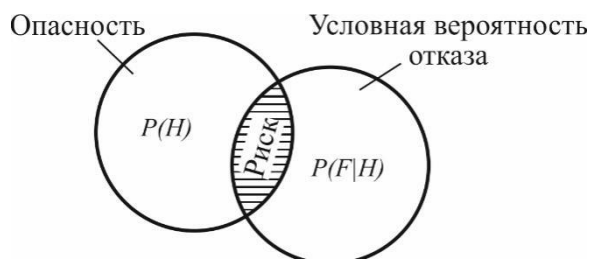


Рисунок 4 - Геометрическая интерпретация понятия риска согласно [49]

Следует также отметить, что в анализируемом исследовании [6] предлагается оценка как прямого риска, связанного с прямыми последствиями, так и косвенного риска, соответствующего косвенным последствиям. Кроме того, в этой работе предложен индекс живучести, определяемый на основе прямого и косвенного риска, и принимающий значения от 0 до 1, где 0 – соответствует потере живучести конструктивной системой.

В нормативном документе США ASCE 76—23 [21] принята схожая с рассмотренной в работе [6] формула для оценки прямого риска:

$$R_{Dir} = P(E) \times P(D|E) \times P(\bar{C}|D) \times C_{Dir}, \quad (3)$$

где $P(E)$ — вероятность возникновения события, которое может привести к повреждению конструкции; $P(D|E)$ – условная вероятность повреждения конструкции с учетом воздействия

на нее E ; $P(C|D)$ — вероятность разрушения при условии повреждения D , C_{Dir} — прямые последствия соответственно. По величине риска и в зависимости от принятой категории риска здание относят к одной из 4-х категорий стойкости к прогрессирующему обрушению.

Согласно нормативным документам Республики Беларусь [52,53] проектирование строительных конструкций необходимо выполнять на основе целевых значений уровней надежности, выраженных в допустимых значениях индексов надежности или же эквивалентных им вероятностей отказа. В [53] приведены допустимые значения риска для разработанных и разрабатываемых расчетных моделей.

В ТКП EN 1990-2011 [54] рассмотрены значения индекса надежности в зависимости от параметра нагружения для изгибаемого железобетонного элемента при значении процента армирования 1%, основанные на применении формулы [53]. В результате были выявлены несоответствия в концепции надежности для периодов отнесения (базовых периодах) 1 год, 20 и 50 лет, соответственно.

В исследовании В.И. Колчунова, В.В. Тура [55] рассмотрены предложения, относящиеся к проблеме рисков конструктивных систем при особых воздействиях на вероятностной основе и предложено нормативно устанавливать допустимые меры надежности, выраженные в целевых значениях вероятностей отказа (индексов надежности). Отмечено также, что для оценки живучести вероятностным методом недостаточно имеющихся результатов экспериментальных исследований.

Что касается зарубежных исследований, можно отметить работу Fu and Frangopol [56], в которой был предложен параметр оценки живучести конструктивной системы, основанный на соотношении вероятностей отказа поврежденных и неповрежденных конструкций. Chen Y, Yang G. P и др. [57] оценили коэффициент надежности для каждого элемента конструктивной системы, связав ее несущую способность до особого воздействия с несущей способностью после внезапного удаления одного из элементов.

Подходы, основанные на риске, учитывают не только вероятность, но и последствия прогрессирующего обрушения. Учет потенциальных потерь является важным показателем по сравнению с полувероятностными коэффициентами и коэффициентами, основанными на надежности, но требуют дополнительных вычислений, основанных на риске. Одной из первых зарубежных работ, в которой был предложен параметр живучести, как параметр, определяемый соотношением между прямыми и косвенными рисками повреждения конструктивной системы, была, судя по публикациям, работа [58]. Здесь, под косвенным риском подразумевается риск последствий от прогрессирующего обрушения, поэтому надежность системы определяется совокупностью этих двух видов рисков.

В недавно проведенном исследовании [59] представлена оценка риска прогрессирующего обрушения на примере рамной конструктивной системы при особом воздействии. Повреждение конструктивной системы включало в себя разрушение балок от образования пластических шарниров и разрушение одной или нескольких колонн. Сравнивались параметры живучести конструкций, полученные в результате расчета методом альтернативного пути (*Alternate Path Method (APM)*) [21] и на основе метода оценки риска для различных уровней вероятности отказа, предложенного в работе [57]. В рамках принятых в исследовании ограничений метод оценки риска позволил получить более высокие значения параметра живучести рассматриваемых конструкций, чем при использовании метода альтернативного пути передачи нагрузки.

Механизмы сопротивления конструктивных систем зданий прогрессирующему обрушению

В обзорно-аналитической работе [1] выделено несколько механизмов прогрессирующего разрушения несущих систем зданий и сооружений после появления начального локального разрушения (рисунок 5, а): «застежка – молния» (zipper-type) (рисунок 5, б), «пирог» (pancake-type) (рисунок 5, в), «домино» (рисунок 5, г) и их комбинацию.

Однако реализации любого из перечисленных механизмов распространения разрушений во многих случаях предшествует разрушение конструкций над удаленным элементом (связью), в так называемой зоне возможного локального разрушения. Поскольку в нормативных документах [2,3] распространение цепочки отказов несущих элементов за пределы локальной зоны разрушения считается недопустимым, то значительное число исследований механизмов сопротивления прогрессирующему обрушению, представленные в научной литературе сконцентрированы на анализе деформирования и разрушения подконструкций, ограниченных 1-2 пролетами и 1-2 этажами над удаленной конструкцией (связью).

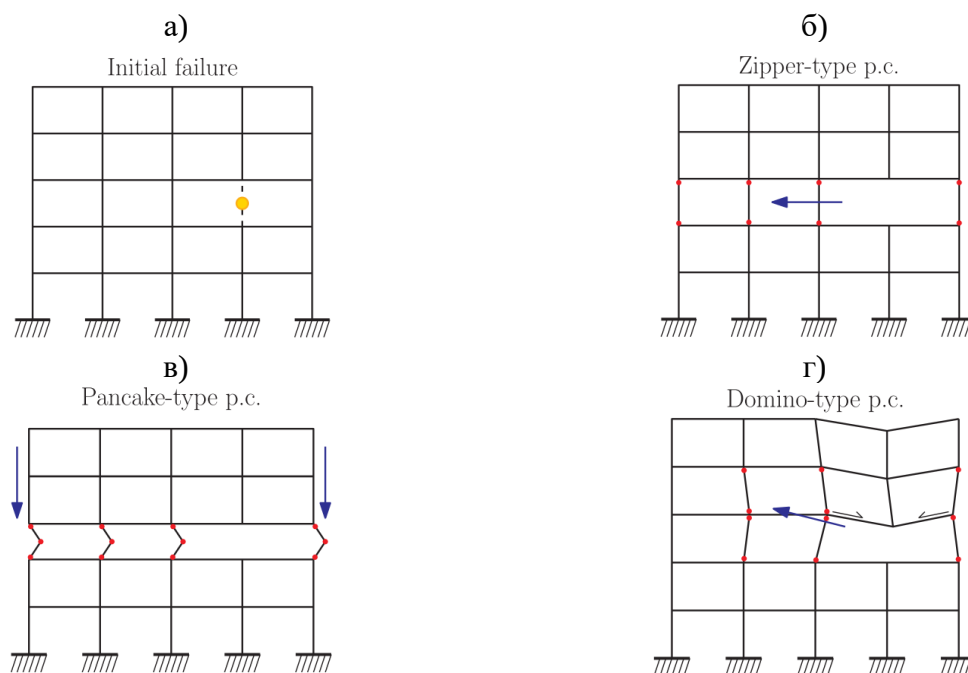


Рисунок 5 - Наиболее распространенные механизмы прогрессирующего обрушения каркасов зданий и сооружений: initial failure (а); zipper-type (б), pancake-type (в), domino-type (г)

Так, в работах [4,5] выделено три основных механизма сопротивления прогрессирующему обрушению для элементов перекрытий и покрытий:

- арочный / оболочковый (рисунок 6, а);
- цепной / мембранный (рисунок 6, б);
- ферма Виренделя.

Almusallam и другие [63] отмечают, что реализация тех или иных механизмов сопротивления зависит от многих факторов. Ими исследовано влияние величины усилий в колоннах многоэтажного каркаса здания на реализацию арочного механизма сопротивления разрушению. Показано, что при недостаточной жесткости поперечных сечений колонн арочный и вантовый механизмы сопротивления разрушению могут не реализоваться. В целом, рассмотренные выше механизмы разрушений элементов конструктивной системы после выключения одного из её несущих элементов связаны с исчерпанием прочности ряда сечений.

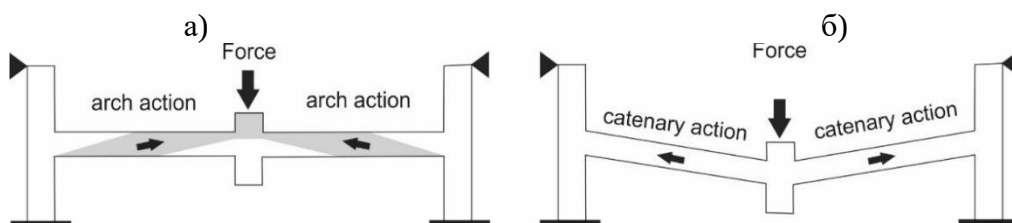


Рисунок 6 - Механизмы сопротивления прогрессирующему разрушению конструкций перекрытий и покрытий: а) арочный / оболочковый; б) цепной / мембранный

В дополнение к проверке прочности сечений элементов в нормах UFC-4-023-03 [6] предусмотрены дополнительные требования по проверке механизма разрушения, связанного с потерей устойчивости с учетом эффектов от геометрической нелинейности первого рода (или Р-Δ эффектов, следуя терминологии, принятой в документах [6,7]). Как отмечается в нормативном документе ACI-318-19 [7] влияние геометрической нелинейности мало для большей части железобетонных конструктивных систем и их элементов и начинает сказываться на характере деформирования и разрушения по мере роста гибкости конструктивных элементов. Abdelazim W, Mohamed H, Benmokrane в работе [8] для бетонных колонн круглого сечения, армированных стеклопластиковой арматурой, отмечают, что гибкость $\lambda = 50$ является пороговым значением, после которого разрушение колонн по материалу (исчерпание прочности сечений) сменяется разрушением от потери устойчивости. Если для внецентренно сжатых элементов с гибкостью $\lambda < 50$ точка предельного равновесия на диаграмме «продольная сила – изгибающий момент» лежит на линии, соответствующей прочности сечений (т.е. $\lambda = 0$), то с увеличением гибкости разрушение происходит при значениях усилий меньших, чем из условия прочности сечений (рисунок 7). При этом авторы отмечают, что полученные ими границы существенно отличаются от полученных для железобетонных колонн [9].

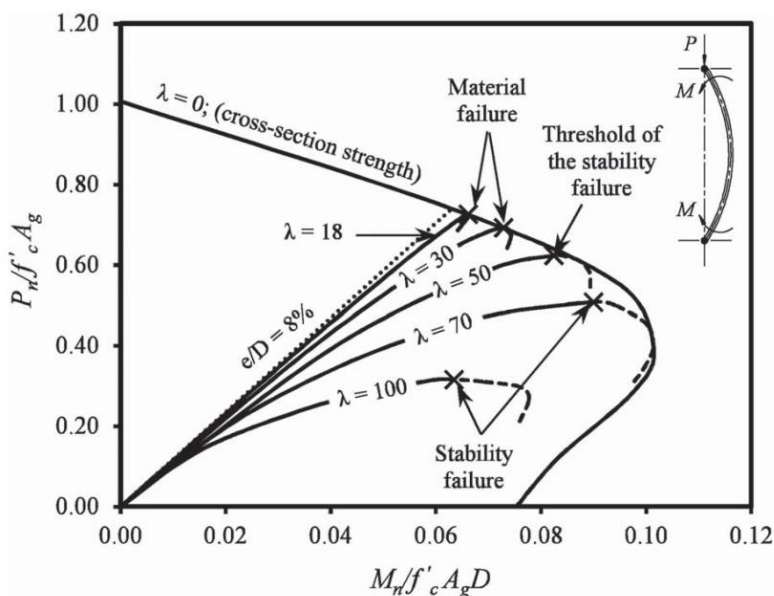


Рисунок 7 - Границы разрушения внецентренно сжатых бетонных колонн, армированных стеклопластиковой арматурой от исчерпания прочности сечений и потери устойчивости согласно [8]

Российские нормы СП 385.132580.2018 (Изм. №2, №3) [3] не дают четкого разделения механизмов разрушения элементов, оперируя интегральным понятием несущей способности, включающем в себя как разрушение от потери прочности, так в связи с потерей устойчивости или приобретением геометрической изменяемости конструктивной системы. Для железобетонных сжатых и внецентренно сжатых элементов СП 63.13330.2018 в п. 5.2.9

указывает на необходимость учета влияния продольного изгиба, что может быть классифицировано как учет Р-Δ эффекта в терминах нормативных документов [6,10]. Однако приведенные в СП 63.13330.2018 формулы учитывают лишь увеличение изгибающих моментов вследствие продольного изгиба и не учитывают снижение несущей способности в зависимости от гибкости элементов и переход к потере устойчивости для элементов с большой гибкостью, при том, что предельная гибкость для железобетонных колонн зданий в п. 10.2.1 ограничена $\lambda = 120$ (для сравнения, ACI 318-19 [7] устанавливает ограничение $\lambda = 100$ в связи с потерей устойчивости элементов). Применительно к расчету железобетонных несущих систем на прогрессирующее обрушение в СП 63.13330.2018, п. В.10 установлено требование обеспечить в том числе устойчивость формы конструктивной системы в целом при выходе из строя одного из её элементов (начального локального разрушения).

При аварийных ситуациях, вызванных внезапным удалением из каркаса здания одного из несущих элементов, в сечениях внецентренно сжатых конструктивных элементов (колонны, пилоны, раскосы и пояса ферм и т.д.) вследствие резкого роста эксцентриситетов приложения нагрузок может быть реализовано напряженно-деформированное состояние более невыгодное по сравнению с их НДС на стадии нормальной эксплуатации от действия основных и особых сочетаний нагрузок по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». К ухудшению условий силового сопротивления таких конструктивных элементов приводит также деградация условий их закрепления в процессе аварийного догружения или увеличение расчетных длин при удалении раскрепляющего конструктивного элемента. В тех случаях, когда догружаемые в результате аварийной ситуации внецентренно сжатые элементы конструктивной системы обладают «изящным» сечением (например, при применении высокопрочного железобетона), либо приобрели средовые (коррозия) или механические (сколы, погиби) повреждения в процессе эксплуатации, в качестве возможного сценария истощения их несущей способности может стать потеря устойчивости.

Экспериментальные исследования В.И. Колчунова и Н.О. Прасолова [11], выполненные на масштабных моделях плоских железобетонных рам каркасов зданий, продемонстрировали возможность реализации данного сценария разрушения конструктивных элементов при внезапном удалении связей в сжатой колонне. Однако конструктивные особенности испытанной модели и параметры воздействия охватывают ограниченную область конструктивных решений каркасов зданий и возможных начальных локальных разрушений. В связи с этим требуются дополнительные экспериментальные исследования живучести железобетонных рам других конструкций при запроектных воздействиях, вызванных внезапным отказом одного из несущих элементов, для получения дополнительных данных о характере их деформирования и разрушения.

Анализ критериев особого предельного состояния

Для оценки несущей способности конструкций в запредельных состояниях, вызванных внезапным исключением одного из несущих элементов конструктивной системы в СП 385.1325800.2018 введено понятие особого предельного состояния. В зарубежных нормативных документах, например, [6,12,13] для оценки сопротивления конструкций прогрессирующему обрушению используется термин “ultimate limit state”, что можно перевести как «предельное состояние несущей способности». Однако применительно к расчету на прогрессирующее обрушение в документе вводятся дополнительные условия, ограничения и расчетные ситуации, что отличает «предельное состояние несущей способности» при оценке сопротивления несущих систем прогрессирующему обрушению от «предельное состояние несущей способности» при оценке несущей способности элементов конструкций, эксплуатируемых в нормальных условиях, и делает их более близким к особому предельному состоянию ГОСТ 27751-2014 [14]. В этой связи выделение особого предельного

состояния в СП 385.1325800.2018[3] и ГОСТ 27751-2014 [14], учитывая принятую в России методологию нормирования первой и второй групп предельных состояний и физический смысл рассматриваемого явления представляется оправданной и целесообразной. В качестве критериев особого предельного состояния в СП 385.1325800.2018 приняты предельные деформации в сечениях элементов несущей системы, а также предельные прогибы элементов. В отличие от норм на проектирование конструкций для целей нормальной эксплуатации критерии несущей способности для особого предельного состояния установлены по нормативным характеристикам прочности и деформативности материалов, а для случая внезапного начального разрушения, приводящего к динамическому догружению сохранившихся конструкций допускается учитывать динамическое упрочнение материала путем умножения его нормативного сопротивления на соответствующий коэффициент, приведенный в нормативном документе.

Следуя СП 385.1325800.2018, прогибы изгибаемых элементов конструктивной системы для особого предельного состояния при условии обеспечения минимально допустимой длины зоны опирания и анкеровки растянутой арматуры не должны превышать $1/30$ длины пролета, за исключением железобетонных конструкций, армированных высокопрочной арматурой с условным пределом текучести, для которых прогибы не должны превышать $1/50$ длины пролета. Нормы UFC-4-023-03 [6] и GSA-2016 [12] в качестве критериев «предельного граничного состояния» устанавливает предельные деформации и усилия в сечениях элементов, а также в качестве интегрального параметра для железобетонных балочных конструкций - углы поворота при упруго-пластическом деформировании.

В [43] отмечается, что при применении нелинейных расчётов не корректно опираться на характеристические(нормативные) свойства материалов, т.к. это ведёт к искажению матрицы жесткостей. В СП 5.03.01 полная диаграмма деформирования, используемая в нелинейных расчётах, опирается на средние (наиболее вероятные) характеристики свойств материалов.

В представленных в научной литературе исследованиях, как правило, в качестве критериев исчерпания несущей способности используются предельные деформации материалов с учетом влияния скорости деформаций [15–17].

Применительно к железобетонным элементам, на деформирование и разрушение которых существенное влияние оказывают эффекты, обусловленные большой гибкостью и, вследствие этого, геометрической нелинейностью нормы [6,7,12] предусматривают проверку критериев, связанных с устойчивостью, поскольку разрушение элементов может происходить при усилиях меньших, чем прочность сечений. При этом в качестве критерия предельного граничного состояния (аналог особого предельного состояния по [14]) устанавливается 5% снижение несущей способности элемента по продольному усилию (рисунок 7). Европейские нормы допускают 10 % снижение несущей способности элемента по продольному усилию при учете эффектов, вызванных геометрической нелинейностью. Российские нормы СП 63.13330.2018 предусматривают расчет железобетонных элементов с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, однако в качестве критериев несущей способности устанавливают преимущественно критерии, связанные с прочностью сечений.

В научной литературе по вопросу устойчивости железобетонных внецентренно сжатых элементов [18,19] и, в более общем случае, стержневых элементов из упругопластических материалов [19,20] предлагается использовать критерий нулевой отпорности $dP/df = 0$ (рисунок 8). Под отпорностью понимается способность сечения, элемента или системы противодействовать возмущениям состояния равновесия.

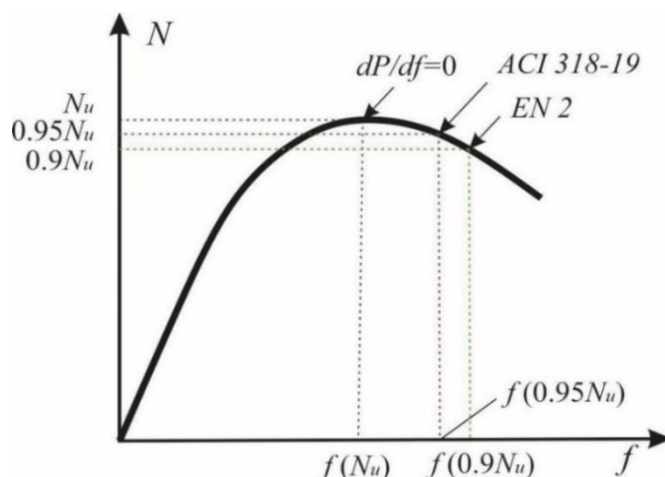


Рисунок 8 - Критерии несущей способности элементов при потере устойчивости

В работах Санжаровского Р.С. [21] на основе допущения о характере деформирования стержневого элемента по полуволне синусоиды получено решение задачи для условий нелинейной ползучести, а также на основе критерия нулевой отпорности даны предложения по оценке несущей способности элементов при их динамическом нагружении [18]. Следует заметить, что при возникновении начального локального разрушения в несущей системе эксплуатируемого здания длительное силовое сопротивление внецентренно сжатых элементов резко сменяется их сопротивлением динамическому нагружению без предварительной разгрузки [22,23]. Комплексное исследование проблемы в такой постановке, по-видимому, в научной литературе отсутствует.

В работе Голышева А.Б. и др. [19] указывается на необходимость учета не только физической, но и геометрической нелинейности в расчетах внецентренно сжатых железобетонных элементов, а также даются конкретные рекомендации по определению жесткости сечений.

Подход, предложенный в работах Геммерлинга А.В. [20], предполагает оценку устойчивости равновесия деформированных состояний элемента с учетом первого и второго расчетных сечений, параметры которых устанавливаются для деформированных состояний с учетом секущего и касательного модулей деформаций. При этом потеря устойчивости предполагается в момент, когда происходит пересечение кривой деформирования по направлению характерного перемещения (для первого расчетного сечения) и кривой критических сил, определяемых для деформированных состояний элементов (для второго расчетного сечения). Следуя данному подходу, в качестве критериев несущей способности, связанных с потерей устойчивости формы, для отдельных элементов каркасов зданий можно рассматривать критическую силу N_{cr} , вычисленную для вторых расчетных сечений по формуле (4) (рисунок 9):

$$N \leq N_{cr}, \quad (4)$$

или другие производные от нее параметры (критическая жесткость, критический эксцентриситет).

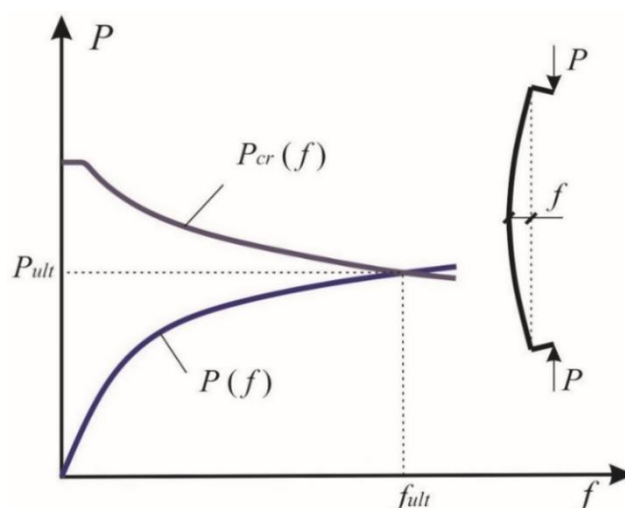


Рисунок 9 - Определение критической нагрузки при потере устойчивости согласно [20]

В работе [24] предложены критерии оценки закритической работы элементов из упругопластического материала при потере устойчивости, основанные на сопоставлении отпорности элемента и отпорности системы по направлению характерного перемещения. Если отпорность системы выше абсолютного значения отпорности элемента при его деформировании по ниспадающей ветви диаграммы, то процесс потери устойчивости происходит медленно, и система как бы поддерживает элемент, не способный воспринимать приращения продольных усилий. В противном случае потеря устойчивости согласно [24] будет происходить практически мгновенно - хлопком. Однако применительно к железобетонным элементам, учитывая их особенности, комплексных исследований в такой постановке, по-видимому, не проводилось.

Перельмутер А.В. [25] рассматривает возможность расширения применения критерия отпорности с учетом некоторых коэффициентов запаса для оценки несущей способности элементов при напряженно-деформированных состояниях отличных от продольного изгиба.

Для выявления наиболее опасных с точки зрения потери устойчивости элементов конструктивной системы могут быть использованы энергетические критерии, предложенные А.В. Александровым и В.И. Травушем [78], определяемые работой узловых изгибающих моментов и поперечных сил A (M , Q) в процессе изгиба (3).

Трекиным Н.Н. и Кодышем Э.Н. в работе [79] в качестве интегральных критериев особого предельного состояния изгибаемых железобетонных элементов каркасов зданий и сооружений рассмотрены деформационные критерии, ограничивающие относительные предельные прогибы конструкций $[f/l]$. Представляется, что подобные интегральные критерии могут быть также введены и для оценки особого предельного состояния внецентренно сжатых стержневых элементов железобетонных несущих систем. Однако деформирование, потеря устойчивости и разрушение таких элементов имеет свою специфику, которая должна быть учтена при построении деформационных критериев их особого предельного состояния. В частности, необходимо учитывать соотношения размеров и структуру сечений элементов конструктивной системы, условия сопряжения в узлах, а также соотношение усилий, действующих в элементе.

Подходы к моделированию несущих систем, уровни детализации моделей

Одним из эффективных инструментов исследования особенностей сопротивления конструктивных систем прогрессирующему обрушению является численное моделирование. В работах Белостоцкого А.М., Акимова П.А. и других [82,83] было проведено расчетное исследование параметров механической безопасности железобетонных высотных и большепролетных зданий с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical.

Расчет на прогрессирующее обрушение проводился для сценария мгновенного выключения из работы угловой колонны первого этажа. По результатам расчета при принятой конструктивной схеме и принятым материалам железобетонные конструкции каркаса здания устойчивы к прогрессирующему обрушению (рисунок 10).

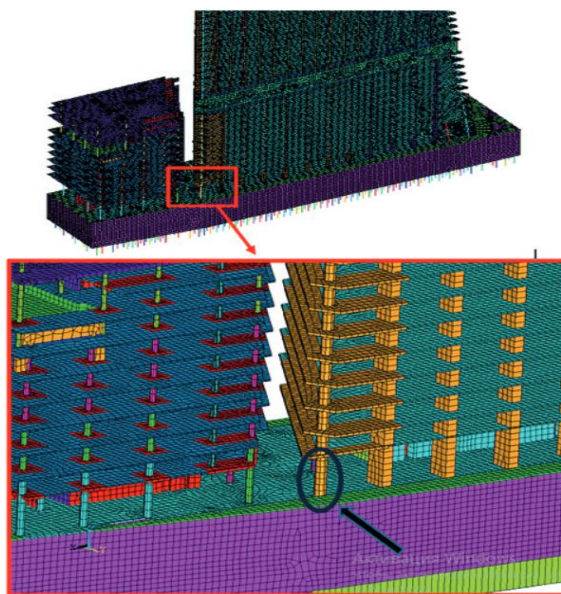


Рисунок 10 - Фрагмент конечноэлементной модели конструкций 400-метрового небоскреба

В исследовании Травуша В.И., Белостоцкого А.М. и других [84] разработана методика численного моделирования динамической реакции физически нелинейной пространственной системы «основание - высотное здание» на особое сочетание нагрузок, включающее интенсивное сейсмическое воздействие уровня максимальное расчетное землетрясение. Методика, реализованная с помощью верифицированного программного комплекса Abaqus, применена для конечноэлементного анализа проектного варианта 400-метрового небоскреба с несущими железобетонными конструкциями при 9,5 балльном сейсмическом воздействии (рисунок 11).

Применительно к железобетонному каркасу многоэтажного здания в публикации [85] представлены конечноэлементная модель и основные положения для расчета с использованием программного комплекса SCAD OFFICE.

Интересный вариант численного анализа влияния количества этажей в плоских железобетонных рамных каркасах на способность сопротивляться прогрессирующему разрушению при удалении колонны представлен в исследовании Marchis A. G., Botez M. D [86] и на его основе предложен упрощенный подход к определению максимальной нагрузки, которую могут выдержать плоские рамы каркаса без разрушения.

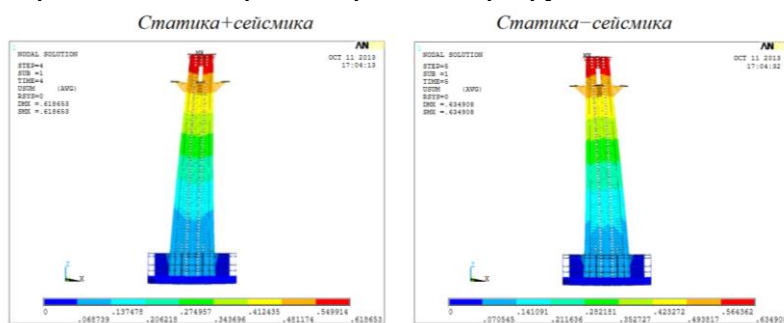


Рисунок 11 - Суммарные перемещения, м. Расчет на особое сочетание. Сейсмика ПЗ (8,5 баллов) по линейно-спектральной теории [84]

В работе Angew и Marjanishvili [87] двухэтажная четырехпролетная железобетонная рама была смоделирована с использованием программного обеспечения конечных элементов SAP2000 (CSI, 2009) при удалении центральной колонны в линейной и нелинейной динамической постановке. На основе многочисленных расчетов сделан вывод о том, что динамический анализ более точен, так как прогрессирующее обрушение по физической сущности носит динамический характер. Этот метод моделирования использовался также и другими авторами, например, Kaewkulchai G [88], Izzuddin B.A [89]. Вместе с тем, нелинейный динамический расчёт имеет ряд серьёзных неопределенностей, включая историю нагружения, логарифмический декремент затухания.

Одним из важных параметров при оценке прогрессирующего обрушения конструкций по вторичной расчетной схеме является коэффициент динамичности. McKay [91] в своем исследовании смоделировал несколько железобетонных каркасов зданий для исследования этого коэффициента и по результатам исследования сделал важный вывод о том, что коэффициент динамичности может принимать различные значения в отличие от американских норм [64]. Также как и в исследованиях российских ученых [14], автором был предложен новый подход к принятию значения коэффициента динамичности для проектирования методом альтернативного пути передачи нагрузки (Alternate load path method).

Mohamed [92] исследовал поведение 8-этажного монолитного железобетонного каркаса здания в случае удаления угловой колонны. Согласно его исследованиям для предотвращения прогрессирующего обрушения путем увеличения интенсивности армирования, площадь арматуры потребовалось бы увеличить на 216%. В связи с этим были рассмотрена установка дополнительных связей для повышения сопротивления прогрессирующему обрушению. Mohamed также пришел к выводу, что трехмерное моделирование конструктивных элементов важно при учете в элементах каркаса кручения с изгибом. К последнему выводу пришел и Brain при исследовании двух- и трехмерной модели каркаса здания [93]

Fu [94] исследовал поведение 20-этажного каркаса здания с использованием Abaqus. При удалении из каркаса колонны он пришел к выводу о том, что ее удаление вызывает большее вертикальное смещение по мере увеличения этажности.

Salem смоделировал трехмерную модель многоэтажного железобетонного каркаса здания [95] с использованием метода прикладных элементов (Applied Element Method). После расчета на прогрессирующее обрушение был сделан вывод о том, что удалении одной колонны не приводит к прогрессирующему обрушению здания. Однако разрушение более одной колонны приводит к постепенному обрушению значительной части здания.

Анализируя результаты отмеченных и других исследований живучести конструктивных систем зданий и сооружений численными методами можно отметить, что их использование для такого анализа, особенно для сложных конструктивных систем из железобетона, сопряжено с определенными сложностями, связанными с учетом перераспределения усилий и деформаций при трещинообразовании. В связи с этим для дальнейшего развитие исследований может быть связано с применением численно-аналитических методов расчета, когда на первом этапе строится стержневая система, а на втором этапе детализируются напряженно-деформированное состояние фрагментов рам каркасов зданий в зонах возможного разрушения, как, например, это показано в работе [86].

Учет влияния факторов длительного силового и средового сопротивления эксплуатируемых зданий при оценке их живучести

Разрушения железобетонных конструкций несущих систем зданий и сооружений во многих случаях происходят по истечению нескольких лет, а в отдельных случаях - десятилетий с момента завершения их возведения и ввода в эксплуатацию. Обрушение эксплуатируемых зданий представляет наибольшую опасность, поскольку приводит к катастрофическим последствиям: значительному числу человеческих жертв и значительному материальному ущербу. В связи с этим при развитии расчетных моделей живучести зданий и

сооружений нормального и повышенного уровней ответственности на особые и аварийные воздействия неустановленной природы в рамках принятого в нормативных документах ситуационного подхода, на стадии расчетного обоснования принятых проектных решений по защите от прогрессирующего разрушения необходимо учитывать не только физическую нелинейность материалов и геометрическую нелинейность элементов при их кратковременном нагружении, но также и деформации ползучести, средовые или механические повреждения, накапливаемые при эксплуатации.

Для учета особенностей эксплуатируемых конструкций при расчете реконструируемых объектов в [98, 99] предложено, наряду с понятием «живучесть», ввести дополнительно понятие «экспозиция живучести». Под экспозицией живучести подразумевается продолжительность сохранения потенциала живучести строительной системы во времени при неравновесной постановке задачи, подразумевающей наложение и развитие во времени деформаций ползучести и коррозионных повреждений.

Теорией ползучести строительных материалов в разное время занималось большое количество ученых по всему миру. Среди них можно отметить работы Александровского С.В., Арутюняна Н.Х., Блинкова В.В., Бондаренко В.М., Васильева П.И., Гвоздева А.А., Маслова Г.Н., Прокоповича И.Е., Работнова Ю.Н., Ржаницына А.Р., Санжаровского Р.С., Улицкого И.И., Харлаба В.Д., Bažant Z.P., Dilger W. H., Gilbert R.I., Hamed E., Marzouk H, Rossi P. и многие другие. Все существующие теории ползучести носят феноменологический характер. Кроме того, судя по имеющимся публикациям, до настоящего времени не проведены экспериментальные исследования по решению задач сохранения потенциала живучести железобетонных конструктивных систем во времени с учетом накопления повреждений неравновесного характера. Отличие предложенных различных вариантов теории ползучести определяется видом зависимостей между напряжениями и деформациями. В исследовании [100] показано, что точность феноменологических теорий ограничивается точностью принятых допущений (гипотез), которые по мере накопления новых экспериментальных данных уточняются или отвергаются. Кроме того, в работе [100] на основе экспериментальных исследований характера деформирования железобетона во времени и характере перераспределения напряжений между арматурой и бетоном предложен метод прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном, арматурой и герметичной облицовкой в сооружениях из железобетона.

В работе [101] систематизированы и классифицированы основные разновидности феноменологической теории ползучести на следующие категории: наследственная теория старения (теория упруго-ползучего тела) – НТС; теория упругой наследственности – ТУН; теория старения ТС и «модернизированная» теория старения – МТС, учитывающая частичную обратимость деформаций ползучести.

Среди относительно недавних исследований по теории ползучести А.Д. Бегловым и Р.С. Санжаровским [73] отмечено, что по существу в теории ползучести бетонных и железобетонных конструкций последовательно рассматриваются три основных проблемы. Первая проблема состоит в построении уравнений ползучести бетона при переменных (режимных) нагружениях. Вторая – в получении решения уравнения ползучести. Третья проблема заключается в расчете железобетонных конструкций при длительном нагружении, в том числе и при особом воздействии.

В работе [102], на основе теории линейной ползучести стареющего материала (модель Маслова – Арутюняна) с учетом формулы принятой в [103] построен график зависимости меры ползучести от времени нагружения (рисунок 12), который качественно совпадает с графиком, приведенным в работе [104]. В этой же работе построен алгоритм для определения меры ползучести коррозионно повреждаемого бетона и железобетона и определения параметра «экспозиция живучести» железобетонной статически неопределимой

конструктивной системы с учетом неравновесных и нелинейных процессов ее деформирования во времени и рассмотрен пример определения потенциала живучести однопролетной жестко защемленной железобетонной балки с позиции критерия особого предельного состояния. В исследовании [104] рассмотрено изменение деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе при воздействии внешней нагрузки, как при кратковременном, так и при длительном нагружении с учетом времени воздействия. Показано, что в процессе эксплуатации железобетонных конструкций происходит изменение модуля упругости бетона относительно начального значения и одновременно, даже при неизменной нагрузке, происходит нарастание деформаций железобетонных конструкций, вызванное явлением ползучести. Методика позволяет прогнозировать состояние деформационных и прочностных характеристик в изгибаемой железобетонной конструкции в любой конкретный момент времени.

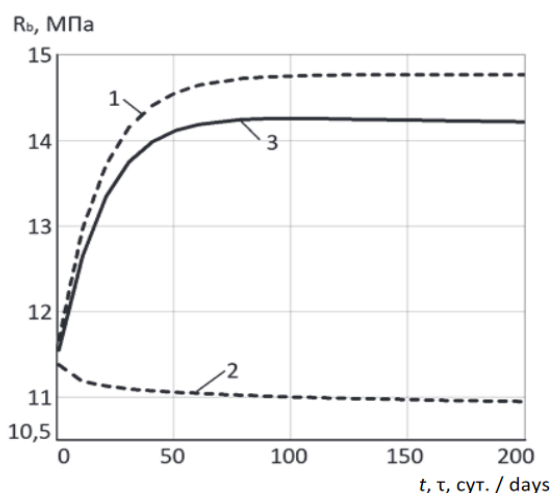


Рисунок 12 - График изменения предела прочности бетона R_b во времени согласно [102]: 1 – процесс нарастания прочности бетона во времени t (старение бетона); 2 – процесс нейтрализации бетона агрессивной средой во времени τ (коррозия бетона); 3 – одновременно процесс «старения» и коррозии бетона

Неравновесные процессы силового и средового сопротивления бетона во времени применительно к оценке экспозиции живучести описываются единой математической моделью (5), предложенной В.М. Бондаренко и В.И. Колчуновым [4] на основе нелинейного обобщения закона Гольдберга-Вааге.

$$\frac{\Delta[\Delta L(t, t_0)]}{dt} = -\alpha[\Delta L(t, t_0)]^m, \quad (5)$$

где ΔL – относительный дефицит текущего значения исследуемого фактора неравновесного силового сопротивления $L(t, t_0)$ по отношению к предельному значению $L_{пр}$; t, t_0 – текущее время наблюдения, время начала наблюдения; α – эмпирический параметр скорости изменения ΔL ; m – эмпирический параметр нелинейной связи между значением дефицита ΔL и скоростью его изменения во времени.

Аналогичная зависимость применительно к железобетонным конструктивно нелинейным системам получена в работе [105]. В международных нормативных документах [106] ползучесть железобетона учитывается только в виде линейной ползучести бетона и мгновенных линейных свойств. Однако в Еврокоде, кратковременная диаграмма бетона «напряжение-деформация» имеет ниспадающий участок и ограниченную его протяженность. В работах известных российских ученых Гвоздева А.А., В.М. Бондаренко, Арутюняна Н.Х., Александровского С.В., Васильева П.И. указывалось, что деформации ползучести бетона нелинейно зависят от напряжений, начиная с самых низких их уровней нагружения.

В развитие исследований российской научной школы по теории ползучести Ларионовым Е.А. и Римшиным В.И. [107] предложена модификация принципа суперпозиции Больцмана Л., позволяющая применять его при нелинейной зависимости деформаций ползучести от напряжений. В.М. Бондаренко и др. [108] исследована ползучесть железобетонных балок из высокопрочного бетона. Модель балки построена в программном комплексе Abaqus, а поведение бетона учитывалось с помощью вязкоупругой модели, реализованной в программном комплексе Digimat.

Интересное предложение для учета деформаций ползучести при расчете железобетонных конструкций рассмотрено в работе [109], где на основе принципа разделения полных деформаций бетона на обратимые и необратимые и предложено реологическое уравнение для железобетонного элемента конечных размеров.

Решением проблемы оценки работоспособности и остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций зданий и сооружений, подверженных средовым воздействиям занимались многие российские и зарубежные ученые. Здесь накоплены определенные результаты исследований для развития и совершенствования физических и расчетных моделей силового и средового сопротивления железобетонных конструкций в задачах живучести сооружений.

Существует несколько феноменологических теорий количественного описания деградационного процесса коррозии бетона. Все они строятся на предложенных авторами формулах с эмпирическими коэффициентами, вычисленными путем аппроксимаций опытных данных для конкретных случаев воздействия агрессивных сред [110,111]. Так, например, А.И. Минас в своей работе [112] принял условие о существовании границы между коррозированным и неповрежденным бетоном, основываясь на том, что потеря прочности бетона, находящегося в агрессивной среде, происходит с наружных поверхностных слоев и постепенно распространяется на более глубокие слои.

В исследованиях А.И. Попеско [113] построены нелинейные модели (зависимости) для оценки и прогнозирования степени изменения нормативной прочности бетонов в агрессивных средах на основе обобщения результатов опытных данных, в основе которых лежат лабораторные испытания бетонных образцов, помещенных в агрессивную среду, и определение их прочности через определенные промежутки времени.

Расчетная модель сопротивления бетонных и железобетонных конструкций, предложенная В.М. Бондаренко [117,118], учитывает влияние не только коррозионных, но и силовых нагружений, поскольку последние связаны с изменением пористости (проницаемости) бетона, при этом за основу были приняты точки О.Я. Берга и Ю.Н. Хромца. Согласно этой модели если коррозионные повреждения вначале носят затухающий, кольматационный характер, то при увеличении напряжений и в следствии изменения структуры материала, они сначала будут развиваться фильтрационно, а затем передут в лавинные.

В.М. Бондаренко, Н.В. Ключева [116] предложили график изменения прочностных свойств бетона, в том числе для сооружений, меняющих расчетную схему, корректировать влиянием коррозионных повреждений в переходной зоне введением к пределу прочности коэффициентов сохранения K_{xc}^* .

Значительный вклад в развитие методов расчета и проектирования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах внес Е.А. Гузев [114,115]. Им установлено и экспериментально обосновано существенное влияние одновременного проявления внешних воздействий агрессивной среды и силовых воздействий на НДС и перераспределение усилий в стержневых железобетонных конструкциях.

Селяевым, Л.М. Ошкиной, П.В. Селяевым В.П. [119] выявлены изменения прочностных характеристик бетона под действием сульфат-ионов. Установлено, что при

сжимающих напряжениях от совместного действия нагрузки и 2%-го водного раствора H_2SO_4 процесс переноса агрессивной среды в объем образца замедляются. Зона проникновения агрессивной среды у образцов, экспонированных под нагрузкой, значительно меньше, чем у образцов, экспонированных без нагрузки.

В экспериментально-теоретическом исследовании [120] приведены результаты данных о работе бетонных и армобетонных элементов, подверженных воздействию водных растворов, содержащих ионы хлора, работающих под нагрузкой. Экспериментально установлено, что уже после 60 суток действия ионов хлора несущая способность балок снизилась на 7%, момент образования трещин на 17%; прогибы увеличились в 1,5 раза. На основе метода предельных состояний и кинетических законов взаимодействия, сохранения сорбции масс сформирована расчетная модель, позволяющая прогнозировать проектный и остаточный ресурс изгибаемых элементов.

На основе анализа приведенных и других исследований средового и силового сопротивления в работе [121] построен критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при сложном напряженном состоянии в зависимости от времени коррозионного воздействия (рисунок 13). Критерий может быть использован при решении задач живучести железобетонных конструктивных систем в условиях одновременного проявления силовых и средовых воздействий.

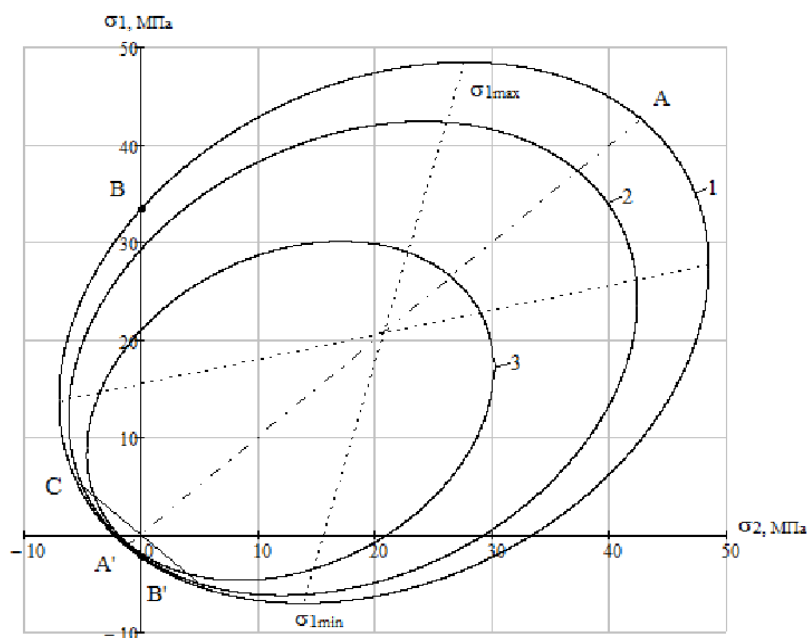


Рисунок 13 - График критерия прочности коррозионно поврежденного бетона при плоском напряженном состоянии 1 – $t = 28$ суток, 2 – $t = 720$ суток, 3 – $t = 2749$ суток

В работе [122] представлены результаты испытаний железобетонных балок с переменным сцеплением продольной арматуры с бетоном. Потеря сцепления моделировалась с помощью пластиковых трубок, надетых на продольные стержни. Количественные результаты исследований показали отрицательное влияние отсутствия сцепления арматуры с бетоном на несущую способность, момент образования трещин, ширину раскрытия трещин и прогиб железобетонных балок.

Zandi K, Coronelli D в своем исследовании [123] установили влияние коррозионных повреждений арматуры на ее анкеровку, а также провели анализ растрескивания и отслоения защитного слоя бетона в зависимости от процента повреждений. Ими установлено влияние коррозии поперечной арматуры на сцепление бетона с продольной анкеруемой арматурой.

С позиций проблемы живучести конструкций интересные результаты получены в экспериментальном исследовании [124]. Было испытано 37 железобетонных колонн квадратного сечения размерами 100x100 мм, высотой 700 мм, в которых создавались

локальные коррозионные повреждения бетона и арматуры при этом для ускоренного корродирования элементов в качестве агрессора использовался концентрированный раствор (37%) соляной кислоты (HCL). Установлено, что высота сжатой зоны бетона внецентренно сжатых элементов при влиянии агрессивной среды при 25% коррозионного повреждения растянутой арматуры значение высоты сжатой зоны уменьшилось на 75%; а при испытании динамической нагрузкой в сечениях проявляется уменьшение высоты сжатой зоны от 9% до 30% относительно испытаний на статическое нагружение (рисунок 14).

Упрощенный аналитический метод анализа предельного значения боковой импульсной нагрузки P в зависимости от продольной силы N , действующей на коррозионно поврежденную в разных местах колонну представлен в работе А.Г. Тамразяна [126]. Результаты исследования сравнивались с результатами численных и экспериментальных исследований. Установлено, что коррозионные повреждения приводят к снижению прочности сжатых колонн на 10–60 % в зависимости от их расположения.

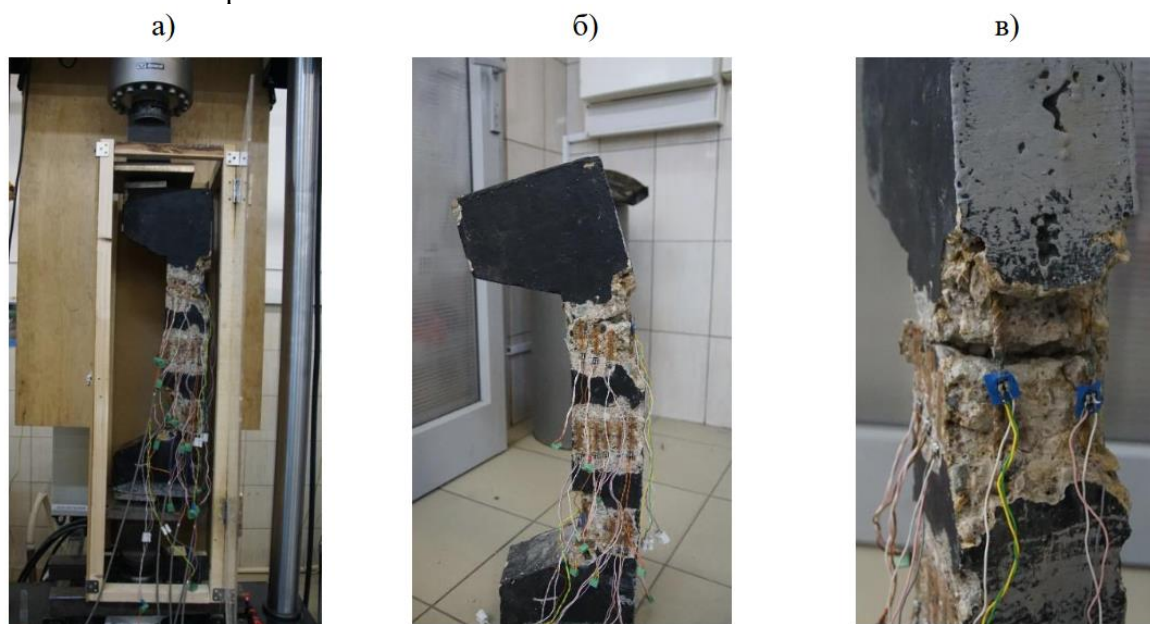


Рисунок 14 - Железобетонный коррозионно-поврежденный внецентренно сжатый образец, испытанный в работе [124]: а) перед испытанием, б) после испытания, в) коррозионно-поврежденный участок образца

В исследовании Kai Q. и др. [125] на основе имеющихся экспериментальных данных изучено влияние коррозии арматуры на прогрессирующее обрушение конструктивной системы. Результаты показали, что коррозия арматуры влияет на предел текучести, и приводит к снижению сопротивления сцепления, а также изменяет последовательность развития трещин.

Работа Леоновича С.Н., Литвинского Д.А. и др. [127] посвящена проблемам прочности, трещиностойкости и долговечности конструкционного бетона при воздействии высоких температур и циклического замораживания–оттаивания. В ней оценены существующие гипотезы морозной деструкции и вклад различных механизмов в морозное разрушение: капиллярной и гелевой пористости, трещин в матрице и на контакте с заполнителем для широкого спектра бетонов.

Влияние силовых и температурных воздействий на напряженно-деформированное состояния железобетонной статически неопределимой балки рассмотрено в работе [128]. Приведены экспериментальные данные по характеристикам бетона и температурным усилиям на напряженное состояние нормального сечения балок.

В работе В.С. Федорова и Левитского В.Е. [129] построены функциональные зависимости основных параметров бетона от температуры на основе решения кинетического уравнения нелинейного накопления повреждений. В работе [130] приведены математическая и расчетная модели силового сопротивления железобетона при резко режимном высокотемпературном воздействии. С использованием диаграммного метода дана методика оценки огнестойкости железобетонных конструкций с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, позволяющая определить прогиб и распределение напряжений по сечению в назначенные моменты времени огневого воздействия до наступления предельного состояния.

Аналогичные исследования проведены в последнее время и за рубежом. Так, Kiran T. и др. [131] изучили поведение арматурной стали при выдергивании при воздействии пожара и обнаружили резкое снижение прочности сцепления бетона и прочности арматуры на растяжение при увеличении продолжительности нагрева. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli [132] экспериментально оценили поведение железобетонной конструктивной системы с различными вариантами армирования колонны во время фаз нагрева и охлаждения конструкций. В ходе эксперимента описаны поля распределения температур, горизонтальные реакции и деформации материалов, построены графики зависимости «момент-угол поворота».

В исследовании [133], с использованием программного комплекса ABAQUS, построены железобетонные рамы без и с заполнением проемов между стойками и колоннами и проведен их анализ на высокотемпературные воздействия. При температуре выше 800°C происходит прогрессирующее обрушение каркаса, деформации в угловой колонне увеличиваются больше, чем в средней (рисунок 15).

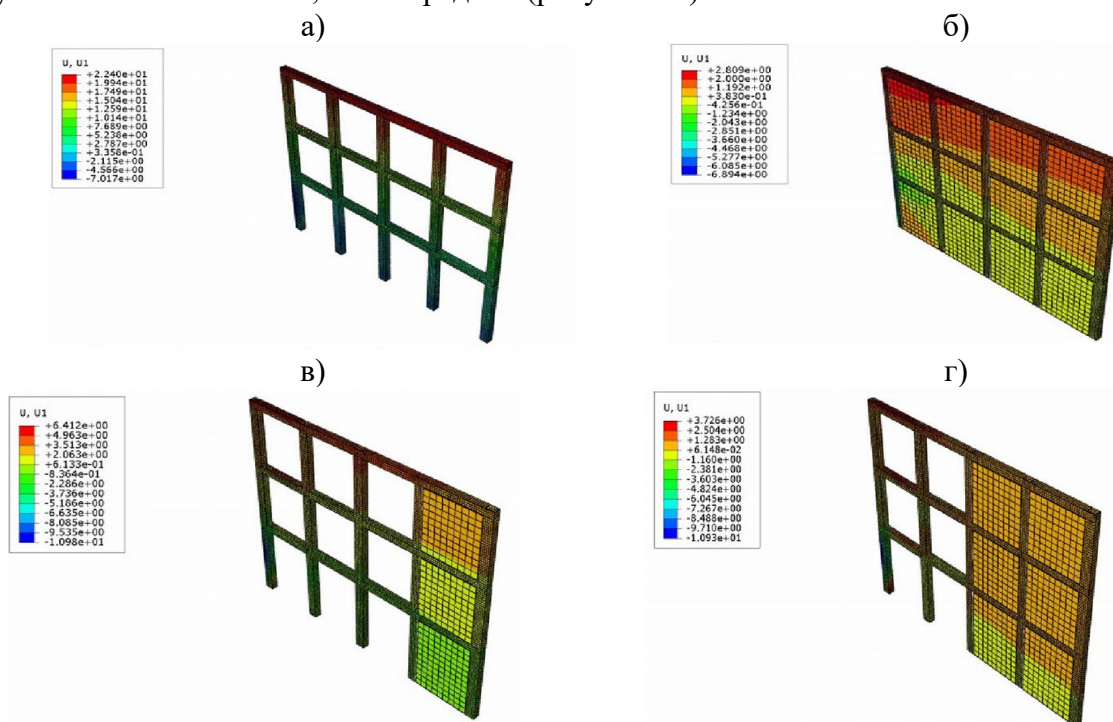


Рисунок 15 - Результаты расчета железобетонных рам в ПК ABAQUS, согласно работе [133]: рама без заполнения проемов (а); рама с полным заполнением проемов (б); рама с частичным заполнением проемов (в) и (г)

В работе [134] по данным конечно-элементного анализа определено время сопротивления балки высокотемпературному воздействию с учётом стадии работы как висячей системы. Приведены данные по развитию прогибов и осевых сил в балках с различным уровнем жёсткости и ограничения поворота на опорах. Выявлен диапазон уровней ограничения, при которых возможен переход в стадию работы как висячей системы.

Уместно упомянуть и исследование [135], в котором рассмотрено поведение 45-этажного здания с переходными этажами при запроектном воздействии, вызванном внезапным удалением средней колонны первого этажа, а также огневом воздействии при пожаре. Показано, что при учете огневых воздействий прогибы конструкций, расположенных над удаляемой колонной, повышаются на 35%.

Железобетон представляет собой сложный многокомпонентный композиционный материал, который в силу своей структуры обладает комбинацией упругих, хрупких и пластических свойств. Причем соотношение этих свойств может меняться во времени в зависимости от факторов силовых и средовых воздействий, режима нагружения конструкций. В последние годы к числу расчетных ситуаций, проверяемых при проектировании новых или реконструкции существующих зданий с железобетонными каркасами, добавились аварийные ситуации, вызванные внезапными отказами отдельных несущих элементов конструктивных систем. Такие аварийные ситуации представляют опасность для эксплуатируемых объектов, поскольку могут приводить к массовым жертвам в случае частичного или полного обрушения несущей системы здания [136].

Поэтому на этапе проектирования необходимо учесть влияние двухстадийного нагружения, включающего этап деформирования при действии постоянных и длительных эксплуатационных нагрузок и динамическое догружение в результате структурной перестройки несущей системы сооружения после отказа одного из несущих элементов. Рассматриваемый режим нагружения оказывает влияние на количественные и качественные параметры деформирования железобетонных конструкций и диссипацию энергии. При таком режиме нагружения как правило оказывается превышенным уровень напряжений, определяющий границы применимости линейных вязкоупругих моделей бетона при расчете железобетонных конструкций.

В исследованиях сопротивления прогрессирующему обрушению железобетонного каркаса здания, подлежащего сносу [22], скорость деформаций по записям тензометрических датчиков на бетоне находилась в интервале от 10^{-3} до 10^{-2} с⁻¹ в зависимости от расстояния до удаляемой колонны. В испытании полномасштабной модели железобетонного каркаса [23] на внезапный отказ угловой колонны время полной разгрузки устройства, моделирующего угловую колонну, составило около 0,1 с по результатам обработки записей показаний тензометрических датчиков. Акселерометры, установленные на конструкциях полномасштабной модели над удаляемой угловой колонной, показали максимальное ускорение вертикальных колебаний 1,08 g ($g = 9.81$ м/с²). В горизонтальном направлении ускорения колебаний в уровне покрытия достигали 0,45 g.

В [139] приведена классификация режимов нагружения, следуя которой и имеющимся экспериментальным данным, режим деформирования при структурной перестройке несущей системы здания после отказа одного из элементов может быть отнесен к средним (intermediate) скоростям деформирования.

Исследования Баженова [26], Гениева [27], Nam et al. [28], Yang Y. et al. [143] и др., указывают, что прочность и предельные деформации бетона при сжатии и растяжении могут возрастать в зависимости от скорости деформации и времени выдержки под нагрузкой. При скорости 10-2 с⁻¹ наблюдается увеличение прочности примерно в 1.15 - 1.3 раз. Также наблюдается увеличение предельных деформаций образцов.

Meng и другие [139] изучали механические свойства легкого ультравысокопрочного бетона с улучшенными показателями пластичности при динамическом нагружении. Соотношение между скоростями деформаций и динамическим упрочнением образцов оказалось близким к результатам Yang Y. И другие [143] и Баженова [26]. В качестве одного из критериев для сопоставления механических свойств образцов в исследованиях Meng использовалась удельная поглощаемая энергия (energy absorption). Анализ представленных

данных показывает увеличение поглощаемой энергии воздействия с ростом скорости деформаций.

В работе [144] исследовали изменение параметров динамического отклика бетона на основе обычного и кораллового крупного заполнителя при действии агрессивных сред. Образцы выдерживались в течение 120 суток в условиях сульфат-ионных, хлорид-ионных и комбинированных агрессивных сред. Для контрольных образцов наблюдался прирост прочности до возраста 60 суток, после чего прочность практически не менялась. В условиях сульфат-ионной среды наблюдалось снижение прочности по сравнению с возрастом 28 суток, а в хлор-ионной среде напротив – набор прочности, что было связано с кольматацией пор. Наибольшее снижение модуля упругости, практически на треть, наблюдалось в среде сульфат-ионов и комбинированной среды, а для хлорид-ионов наблюдалось незначительное увеличение. Увеличение кораллового крупного заполнителя приводило к снижению модуля упругости и прочности образцов.

Интересные результаты с позиций живучести железобетонных конструкций были представлены в работах Колчунова В.И., Ключевой Н.В., Андросовой Н.Б., Бухтияровой А.С. [29], Цветкова К.А., Баженова А.В. [30] о влиянии начального уровня напряжений от статической нагрузки на параметры диаграмм деформирования бетона при однократном динамическом воздействии. В исследовании [145] отмечено незначительное влияние поперечного обжатия по сравнению со скоростью деформирования на динамическое упрочнение бетона. Это позволяет распространить результаты испытаний при одноосном сжатии на случаи двух- и трехосного напряженного состояния.

Н.В. Федоровой, М.Д. Медянкиным, Бушовой О.Б. [31] было исследовано влияние уровня предварительного нагружения на динамическое упрочнение бетона различных классов. При этом время выдержки под статической нагрузкой исчислялось несколькими минутами. Установлено влияние режима нагружения на динамическую прочность и деформативность бетона. Для описания поведения бетона была использована модифицированная вязкоупругая модель Кельвина-Фойгта, предложенная в работах Гениева [147]. Уравнение модели в безразмерных параметрах и величинах имело вид (6):

$$\frac{d\gamma}{d\xi} + \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)\gamma = \frac{\varphi}{2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{T}{T_0}, \gamma = \frac{Q}{Q_0}, \xi = \frac{G_0 \cdot t}{K}$$

Здесь T , T_0 – интенсивность касательных напряжений и их максимальное значение; Q , Q_0 – интенсивность деформаций сдвига при произвольной интенсивности напряжений T и максимальном значении T_0 соответственно; G_0 – начальный модуль сдвига; K – модуль (коэффициент) вязкости; t – время нагружения.

Wenxuan Yu, Liu Jin и Xiuli Du [32] было исследовано деформирование объемных конечно-элементных моделей стандартных бетонных кубов при однократном динамическом нагружении с некоторого уровня начальных напряжений от статически приложенной нагрузки. Особенностью использованных ими моделей было дискретное задание крупного заполнителя, случайным образом заполняющего объем образца. Контактное взаимодействие элементов модели крупного заполнителя с цементно-песчаной матрицей моделировалось переходной контактной поверхностью. Для учета динамического упрочнения бетона (DIF) при его однократном динамическом нагружении использовались эмпирические зависимости, связывающие эту величину со скоростью деформаций. Результаты моделирования свидетельствовали о связи между параметрами деформирования при однократном динамическом нагружении и уровнем начальных напряжений в образце от статически приложенной нагрузки.

Lai J. and Sun W. [149] были выполнены испытания на раскалывание ультра высокопрочных цементных композитов с повышенной пластичностью (ultra-high performance

cementitious composite) по методу Хопкинсона (the split Hopkinson pressure bar) при скорости деформаций в диапазоне от 23.7 с^{-1} до 99.2 с^{-1} . Авторами отмечаются влияние скорости деформаций на прочность, деформативность и модуль упругости цементного композита. Для описания силового сопротивления материала предложена нелинейная вязкоупругая модель с учетом повреждений (visco-elastic damage model). Основное уравнение модели имеет вид (7):

$$\sigma = (1 - D) \left[f_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \right] \quad (7)$$

$$f_e(\varepsilon) = E_0 \varepsilon + \alpha \cdot \varepsilon^2 + \beta \cdot \varepsilon^3, D = 1 - \frac{E_1}{E_0},$$

где, $f_e(\varepsilon)$ – функция напряжений, ε – деформации, E_0 – начальный модуль упругости.

Уместно заметить, что рассмотренные выше результаты исследований не учитывали особенности проявления реологических свойств бетона, связанные с длительной эксплуатацией сооружений. В то же время, хорошо известно, что в бетоне железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений во времени развиваются деформации, вызванные усадкой и ползучестью. Также наблюдаются рост прочности и начального модуля упругости в результате старения бетона. Levitch V и др. [33] исследовали бетонные образцы в возрасте 20–30 лет, извлеченные из балок и плит вблизи предполагаемых нейтральных осей изгибаемых элементов, а также из колонн, для которых средний уровень напряжений в течение срока эксплуатации оценивался как не более $0.27f_{ck}$ и не более $0.55f_{ck}$ в условиях сейсмических воздействий. Авторами отмечено увеличение модуля деформаций и снижение деформативности. Таким образом, материал с течением времени стал более хрупким, уменьшился диапазон его пластических деформаций.

В бетоне эксплуатируемых железобетонных конструкций во времени может наблюдаться релаксация напряжений [151] вследствие развития деформаций ползучести и перераспределения усилия на стержни продольной арматуры, а также другие конструкции в статически неопределимых системах. Отмеченное явление может сказаться на вязкостных свойствах бетона и величине удельной поглощаемой энергии при его динамическом нагружении с учетом наличия начальных напряжений от эксплуатационной нагрузки. При этом для описания сопротивления бетона длительным нагрузкам используются схожие вязкоупругие, вязко-упруго-пластические или нелинейно вязкоупругие модели, построенные путем комбинации элементов моделей Максвелла или Фойгта с учетом пластических свойств материала при высоких уровнях напряжений [152].

Учитывая снижение диапазона деформирования для рассеивания инерционных сил в нагруженном бетоне по сравнению с ненагруженным, следует ожидать меньшие значения коэффициента динамического упрочнения, площади под кривой σ - ε , динамического прироста предельной деформации. С другой стороны, явление ползучести должно привести к выравниванию поля напряжений. Старение материала – к изменению модуля деформаций, предельных деформаций. Для бетона эксплуатируемых сооружений имеют место все отмеченные факторы, определяя прочность и деформативность материала, а следовательно, и сопротивление конструктивной системы в целом.

Таким образом, становится очевидным, что вязкостные свойства бетона оказывают влияние на сопротивление железобетонных конструктивных систем разрушению при внезапных структурных перестройках, вызванных аварийными ситуациями. Учет таких свойств может стать дополнительным ресурсом при оптимизации конструктивных решений с учетом требований механической безопасности.

Выводы

1. Исследованиями российских и зарубежных ученых последних двух-трех десятилетий показано, что так называемые особые или аварийные воздействия природного, техногенного или террористического характера, могут приводить к внезапной потере несущей способности элементов зданий и сооружений и подвергшихся таким воздействиям и приводить к непропорциональным отказам зданий и сооружений - их прогрессирующему обрушению. Вместе с тем, практически отсутствует единая методология проектирования конструктивных систем в особых расчётных ситуациях.

2. При моделировании сопротивления прогрессирующему обрушению целесообразно помимо силовых воздействий учитывать и средовые воздействия, такие как коррозионное повреждение бетона и стали, воздействие высоких и низких температур и другие.

3. Внезапное удаление несущего элемента при оценке напряженного состояния и перераспределения силовых потоков требует учета динамических эффектов, физической и конструктивной нелинейности в проектируемых зданиях и сооружениях при таких воздействиях.

4. Наиболее точным методом численного анализа живучести железобетонных несущих систем при особых воздействиях, вызванных отказом несущего элемента конструктивной системы, является прямой нелинейный динамический расчет во временной области. Однако этот метод в настоящее время продолжает оставаться трудоемким применительно к анализу несущих систем реальных зданий и сооружений и содержит ряд неопределенностей.

Приближенные аналитические и численно-аналитические методы, позволяющие сформулировать функцию предельного состояния, наиболее эффективны в практике проектирования и перспективны для использования в вероятностных моделях живучести сооружений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В. И., Федорова Н. В. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ Строительство. 2018. №. 1. С. 115-119.
2. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // Строительство и реконструкция. 2021. Vol. 95, № 3. Pp. 76–108.
3. Kiakojour F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M. R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020. № December 2019 (206). С. 110061.
4. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. №. 5. С. 4-8.
5. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запредельных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с.
6. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.
7. Алмазов В. О. Кхой Као Зуй. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.:Изд-во АСВ.- 2013-128с.
8. Hadi M. N. S., Alrudaini T. M. S. Preventing the progressive collapse of reinforced concrete buildings // International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. 2011. P. 1-12.
9. Mohamed O., Al Khattab R., Mishra A., Isam, F. Recommendations for reducing progressive collapse potential in flat slab structural systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. T. 471. №. 5. P. 052069.
10. Hammad K., Lofty I., Naiem M. Enhancing Progressive Collapse Resistance in Existing Buildings // Design and Construction of Smart Cities. 2021. P. 39-46.
11. Yihai Bao, Sashi K Kunnath, Sherif El-Tawil, Hai S Lew. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures // Journal of Structural Engineering. 2008, Vol. 134, No. 7. P. 1079-1091.

12. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // Adv. Struct. Eng. 2018. № 21.9 P. 1388–1401.
13. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage // Shock and Vibration. 2016. Т. 2016.
14. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В. и др. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: монография. М.: АСВ, 2004. 216 с.
15. Thaer, M., Alrudaini, S. and Muhammad, N. S. H. A New Design to Prevent Progressive Collapse of Reinforced Concrete Buildings // The 5th Civil Engineering Conference in The Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference, 2010.
16. Травуш В.И. Шапиро Г.И. Колчунов В.И. Леонтьев Е.В. Федорова Н.В. Проектирование защиты крупнопанельных зданий от прогрессирующего обрушения // Жилищное строительство. 2019. №3. С40–46.
17. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. F. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // Journal of Building Engineering. 2020. Т. 27. С. 100986.
18. Ерёмин К. И., Матвеюшкин С. А. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений // В мире неразрушающего контроля. 2008. №. 4. С. 4-7.
19. СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия»
20. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»
21. ASCE 76-23. Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures. - American Society of Civil Engineers. 2023
22. GSA (General Services Administration). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance (Revision). - General Services Administration. 2016
23. BS EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. Comite Europeen de Normalisation (2002), Draft pr EN 1992-1-1
24. Бондаренко В.М., Боровских А.В. Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений. – М.: ИД Русанова, 2000. 144 с.
25. Колчунов В. И., Колчунов В. И., Федорова Н. В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №. 8. С. 54-60.
26. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. Москва: Издательство АСВ, 2004. 472 с.
27. Голышев А.Б. Бачинский В.Я., Полищук В.П. Железобетонные конструкции. Сопротивление железобетона. Т.1. К.: Логос, 2001. 481 с
28. Расторгуев Б.С., Плотников А.И. Обеспечение живучести гражданских зданий при особых воздействиях // Тематическая научно-практическая конференция «Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан»: сб. докладов. М.: МГСУ, 2005. 9-10
29. Orton S. Development of a CFRP System to Provide Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Progressive Collapse, Dissertation, 2007
30. Kim J. and Yu J. Analysis of Reinforced Concrete Frames Subjected to Column Loss // Magazine of Concrete Research, ICE publishing. 2012. V.64(1), pp. 21-33
31. D3-1: Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). FAILNOMORE. – 2021.
32. ГОСТ 27.002-89.9. Надежность в технике. Термины и определения. Введ. 1990-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. 38 с.
33. Махутов Н. А., Петров В. П., Резников Д. О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2009. – №. 3. – С. 47-66.
34. Райзер В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1995. 348 с.
35. Анцелиович Л. Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета // М.: Машиностроение. 1985. – Т. 3985. – С. 296
36. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971.
37. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // Строительство и реконструкция. 2022. № 6. С. 78-90
38. Bassam A. Izzuddin, Miguel F. Pereira, Ulrike Kuhlmann, Lars Rölle, Ton Vrouwenvelder, Bernt J. Leira, Application of Probabilistic Robustness Framework: Risk Assessment of Multi-Storey Buildings under Extreme Loading // Struct. Eng. Int. 2012. 22(1). 79-85.

39. Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse // J. Perform. Constr. Fac. 2006. 20 (4). 315-323.
40. Biagi V. D., Kiakojouri F., Chiaia B., Sheidaii M. R. A simplified method for assessing the response of RC frame structures to sudden column removal // Applied Sciences. 2020. T. 10. №. 9. C. 3081.
41. Chen C. H., Zhu Y. F., Yao Y., Huang Y., Long X. An evaluation method to predict progressive collapse resistance of steel frame structures // Journal of Constructional Steel Research. 2016. T. 122. C. 238-250.
42. Alekseytsev, A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). Article No. 10306. DOI: 10.34910/MCE.103.6
43. Лизогуб А.А., Тур А.В., Тур В.В. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона // Строительство и реконструкция. 2023. Т. 108, № 4. С. 95 – 107
44. Naghavi F., Tavakoli H. R. Probabilistic prediction of failure in columns of a steel structure under progressive collapse using response surface and artificial neural network methods // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. C. 1-17.
45. Cardoso J. B., de Almeida J. R., Dias J. M., Coelho P. G. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks // Advances in Engineering Software. 2008. T. 39. №. 6. C. 505-513.
46. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. Checking of structural system robustness based on pseudo-static full probabilistic approach // Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures. 2019. Pp. 2126-2133.
47. Дятляр А.Н. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных стержневых конструкций в запредельных состояниях: дис. – Орел: [Орлов. Гос. Техн. ун-т], 2005.
48. Гениев Г.А. О принципе эквиградиентности и применении его к оптимизационным задачам устойчивости стержневых систем // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. №6. С. 8-13.
49. Масленников А. М. Риски возникновения природных и техногенных катастроф. СПб., 2008. 165с.
50. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. Вильнюс: Мокслас, 1985. 156 с
51. Котляровский В.А., Забегаев А.В. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. КН.5.-М.: АСВ, 2011.-414с.
52. СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы Введ. 01.07.08. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. 69 с.
53. ТКП EN 1990-2011. Основы проектирования конструкций. Введ. 01.07.12. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. 70 с.
54. Надольский В. В., Верева Ф. А. Особенности определения значений индекса надежности для разных периодов повторяемости // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара. – 2018. С.205-212.
55. Колчунов В. И., Тур В. В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. №. 7. С. 5-15.
56. Fu G., Frangopol D. M. Balancing weight, system reliability and redundancy in a multiobjective optimization framework // Structural Safety. 1990. T. 7. №. 2-4. C. 165-175.
57. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness // Structural safety. 2008. T. 30. №. 3. C. 253-267.
58. Chen Y., Yang G. P., Xia Q. Y., Wu G. W. Enrichment and characterization of dissolved organic matter in the surface microlayer and subsurface water of the South Yellow Sea // Marine Chemistry. 2016. T. 182. C. 1-13.
59. Beck A. T., da Rosa Ribeiro L., Costa L. G., Stewart M. G. Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures // Structures. Elsevier, 2023. T. 57. C. 105295.
60. Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03) Washington, DC: Department of Defence (DoD), 2009.
61. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // Case Studies in Construction Materials. 2019. (11).
62. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2018. № 4 (32). C. 04018043.
63. Almusallam T. H., Elsanadedy H. M., Al-Sallou, Y. A., Siddiqui N. A., Iqbal R. A. Experimental investigation on vulnerability of precast RC beam-column joints to progressive collapse // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. T. 22. C. 3995-4010.
64. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary American Concrete Institute, 2019
65. Abdelazim W., Mohamed H. M., Benmokrane B. Inelastic Second-Order Analysis for Slender GFRP-Reinforced Concrete Columns: Experimental Investigations and Theoretical Study // Journal of Composites for Construction. 2020. № 3 (24).

66. MacGregor J. G. Design of slender concrete columns - revisited // *ACI Structural Journal*. 1993. № 3 (90). С. 302–307.
67. Kolchunov V. I., Prasolov N. O., Kozharinova L. V. Experimental and theoretical research on survivability of reinforced concrete frames in the moment of individual element buckling // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3–2. С. 109–115.
68. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва. 2019.
69. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. (84). С. 300–310.
70. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018. № 03 (18). С. 1850038.
71. Weng J., Tan K. H., Lee C. K. Adaptive superelement modeling for progressive collapse analysis of reinforced concrete frames // *Engineering Structures*. 2017. (151). С. 136–152.
72. Геммерлинг А.В. Расчет стержневых систем, М.: Стройиздат, 1974, 207 с.
73. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. О методах решения уравнений ползучести бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2005. №3. С. 55-63.
74. Санжаровский Р. С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести / Р. С. Санжаровский, Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1984. 217 с.
75. Sasaki M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego // *Journal of Structural Engineering*. 2008. № 3 (134). С. 478–488.
76. Геммерлинг А. В. Несущая способность стержневых стальных конструкций, Москва: Госстройиздат, 1958. 216 с.
77. Perelmuter A. V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state // *Vestnik MGSU*. 2021. № 12. С. 1559–1566.
78. Alexandrov A. V., Travush V. I., Matveev A. V. O raschete sterzhnevyykh konstruktсий na ustoychivost' // *Industrial and Civil Engineering*. 2002. № 3. С. 16–19.
79. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition Of Reinforced Concrete Structures And Its Normalization // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. № 5. С. 4–9.
80. Тур А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01. Брест, 2012
81. Shi F., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium // *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2017. Т. 11. №. 1.
82. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Дмитриев Д. С., Нагибович А. И., Петряшев Н. О., Петряшев С. О. Расчетное исследование параметров механической безопасности высотного (404 метра) жилого комплекса «One Tower» в деловом центре «Москва-Сити» // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. №. 3. С. 122-129.
83. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Аул А. А., Дмитриев Д. С., Дядченко Ю. Н., Нагибович А. И. и др. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. №. 3. С. 118-129.
84. Травуш В.И., Белостоцкий А.М., Вершинин В.В., Островский К.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. Численное моделирование физически нелинейной динамической реакции высотных зданий при сейсмических воздействиях уровня МРЗ // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. №12(1). С. 117-139.
85. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Мосина Н.В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса “SCAD Office” // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. Т. 4. № 2. С. 13–18.
86. Marchis A. G., Botez M. D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories // *Procedia Manufacturing*. 2019. Т. 32. Р. 136-143.
87. Marjanishvili S. and Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20, No. 4, pp. 365-374
88. Kaewkulchai G. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis / G. Kaewkulchai, E.B. Williamson // *Computers & Structures*. 2004. Т. 82. № 7-8. С.639-651.
89. Izzuddin B.A., Vlassis A. G., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. Т. 30. № 5. – С.1308-1318.
90. Vlassis A.G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. Т. 30. № 5. С.1424-1438.

91. McKay A.E. Alternative Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Non-Linear Load Increase Factors / M.Sc., the University of Texas at San Antonio, 2008.
92. Mohamed, O. A. Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings // Engineering Structures. 2009. Vol. 31
93. Brian I. S. Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of Existing Buildings // Master Thesis, Ohio State University. 2010, USA
94. Fu F. Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building With 3-D Finite Element Modeling Method // Journal of Constructional Steel Research. 2009. pp.1269-1278.
95. Salem H. M. Computer-Aided Design of Framed Reinforced Concrete Structures Subjected to Flood Scouring // Journal of American Science. 2011. 7(10), pp. 191-200
96. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // Engineering Structures. 2010. T. 32. № 5. С.1223-1235
97. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Расчет устойчивости железобетонных каркасов зданий при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. N 9. С. 12-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.12-21
98. Бондаренко В.М., Мигаль Р.Е., Ягупов Б.А. Резервы и экспозиция конструктивной безопасности зданий, эксплуатирующийся в агрессивной среде // Строительство и реконструкция. 2014. No 1. С. 3–10
99. 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.
100. Галустов К.З. Развитие теории ползучести бетона и совершенствование методов расчета железобетонных конструкций / автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н., Москва, 2008
101. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
102. Андросова Н.Б., Колчунов В.И., Емельянов С.Г. Неравновесные и нелинейные процессы при оценке потенциала живучести железобетонных конструктивных систем в запредельных состояниях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 6. С. 490–502. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-490-502>.
103. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 120 с.
104. Травуш В.И., Мурашкин В.Г. Влияние ползучести на распределение деформаций и напряжений в изгибаемом элементе // Строительство и реконструкция. 2017. № 2. С. 57–70.
105. Бондаренко В. М., Ключева Н. В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 1. С. 4-12.
106. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование железобетонных конструкций), 2004.
107. Ларионов Е.А., Римшин В.И., Жданова Т.В. Принцип наложения деформаций в теории ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 483–496.
108. Dellepiani M. G. et al. Numerical investigation on the creep response of concrete structures by means of a multi-scale strategy // Construction and Building Materials. 2020. T. 263. С. 119867.
109. Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А., Квасников А.А. Концепция развития прикладной теории ползучести железобетона // Бетон и железобетон. 2020. № 2 (602). С. 8–11
110. Бондаренко В. М., Марков С.В., Римшин В.И. Коррозионные повреждения и ресурс силового сопротивления железобетонных конструкций // БСТ, 2002. № 8. С. 26-32.
111. Kmiecik P., Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Volume 11. Issue 3. Pp. 623 – 636.
112. Минас А. И. Метод оценки коррозионной стойкости некоторых строительных материалов // Строительные материалы и конструкции. Ростов н/Д., 1972. С.49-61.
113. Попеско А. И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии // СПб: СПб гос. архит.-строит. ун-т, 1996. 182 с
114. Гузев Е. А., Митин А.А., Басова Л.Н. Деформативность и трещиностойкость сжатых армированных элементов при длительном нагружении и действии жидких сред // Сб. тр. НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1984. 34 с
115. Савицкий Н. В., Гузев Е.А., Бондаренко В.М. Интегральный метод оценки напряженно деформированного состояния железобетонных элементов в случае воздействия агрессивной среды и силовой нагрузки // Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах. М.: 1984. С. 20-27
116. Бондаренко В. М., Ключева Н.В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений // Известия вузов. Строительство. 2008. №1. С. 4-12.

117. Бондаренко В. М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. М.: Студент, 2015. 111с.
118. Бондаренко В. М. Силовое деформирование, коррозионные повреждения и энергосопротивление железобетона, Юго-Зап. гос. ун-т – Курск. 2016. 67с
119. Селяев, Л.М. Ошкина, П.В. Селяев В.П. Химическое сопротивление цементных бетонов действию сульфат-ионов // Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013
120. Селяев В. П., Селяев П. В., Алимов М. Ф., Сорокин Е. В. Оценка остаточного ресурса железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии //Строительство и реконструкция. 2017. №. 6. С. 49-58.
121. Ключева Н. В., Андросова Н. Б., Губанова М. С. Критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при сложном напряженном состоянии //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. №. 1. С. 38-42.
122. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams // HBRC Journal, 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
123. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beamend specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology
124. Попов Д. С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов //Строительство и реконструкция. 2022. №. 2. С. 55-64.
125. Kai Q., Zhiqiang H. U. A. N. G., Yunhao W. E. N. G., Xiaohui Y. U. Study on load resisting mechanism of corroded RC frame structures against progressive collapse //Journal of Building Structures. 2022. Т. 43. №. 9. С. 181.
126. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading //Buildings. 2023. Т. 13. №. 9. С. 2133.
127. Леонович, С. Н., Литвиновский, Д. А.,Чернякевич, О. Ю., Степанова, А. В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : в 2 ч. Минск : БНТУ, 2016. Ч. 1. 390 с.
128. Истомин А. Д., Петрова В. А. Усилия в статически неопределимых железобетонных конструкциях при силовых и температурных воздействиях //Безопасность строительного фонда России проблемы и решения. 2019. С. 60-68.
129. Федоров В.С., Левитский В.Е. Теоретические основы прогнозирования изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в условиях пожара // Проблемы обеспечения безопасности строительного фонда России: Труды III Международных академических чтений. Курск: КурскГТУ, 2004. С. 236–244.
130. Федоров В. С. Основные положения теории расчета огнестойкости железобетонных конструкций //Жилищное строительство. 2010. №. 4. С. 29-32.
131. Kiran T., Anand, N., Mathews, M. E., Kanagaraj, B., Andrushia, A. D., Lubloy, E., & Jayakumar, G. Investigation on improving the residual mechanical properties of reinforcement steel and bond strength of concrete exposed to elevated temperature //Case Studies in Construction Materials. 2022. Т. 16. С. e01128.
132. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli, A. Y. Experimental and analytical assessment of RC joints with varying reinforcement detailing under push-down loading before and after fires //Engineering Structures. 2019. Т. 189. С. 550-564.
133. Parthasarathi N., Satyanarayanan K. S. Progressive collapse behavior of reinforced concrete frame exposed to high temperature //Journal of Structural Fire Engineering. 2020. Т. 12. №. 1. С. 110-124.
134. Матвиенко В. Е. Сопротивление железобетонной балки воздействию пожара в стадии работы как висячей системы //Перспективы развития строительного комплекса. 2020. С. 235-240.
135. Тамразян А. Г., Мехрализадех А. Б. Особенности проявления огневых воздействий при расчете конструкций на прогрессирующее разрушение зданий с переходными этажами //Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. №. 12. С. 41-44.
136. Caredda G., Makoond N., Buitrago M., Sagaseta J. Learning from the progressive collapse of buildings //Developments in the built environment. 2023. Т. 15. С. 100194.
137. Sasani M., Werner A., Kazemi A. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures // Engineering Structures. 2011. № 2 (33). С. 401–409.
138. Adam J. M. [и др.]. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. (210).
139. Meng L., Ding Y., Li L., Wei J., Li M., Wang J., Liu J. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC) //Construction and Building Materials. 2023. Т. 399. С. 132526.
140. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении / Ю. М. Баженов, Москва: Стройиздат, 1970. 271 с.

141. Гениев Г. А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19.
142. Nam J. W., Kim H. J., Kim S. B., Jay Kim J. H., Byun K. J. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. № 5 (18). С. 461–490.
143. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // *Composite Structures*. 2023. Т. 309. С. 116727.
144. Wei J., Cheng B., Li L., Long W. J., Khayat K. H. Prediction of dynamic mechanical behaviors of coral concrete under different corrosive environments and its enhancement mechanism // *Journal of Building Engineering*. 2023. Т. 63. С. 105507.
145. Баженова А. В., Цветков К. А. Экспериментальная оценка влияния некоторых факторов на прочность бетона при однократном динамическом воздействии // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании*. 2017. С. 206–212.
146. Федорова Н. В., Медянкин М. Д., Бушова О. Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. №. 1. С. 4–11.
147. Гениев Г. А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19
148. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. (300). С. 124302.
149. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite // *Cement and Concrete Research*. 2009. Т. 39. №. 11. С. 1044–1051.
150. Levitchich V., Kvasha V., Boussalis H., Chassiakos A., Kosmatopoulos E. Seismic performance capacities of old concrete // *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*. 2004. С. 1–6.
151. Тамразян А. Г., Есаян С. Г. Механика ползучести бетона // М.: МГСУ. 2012.
152. Сидоров В. Н. Численное моделирование реологических свойств строительных материалов на примере ползучести бетона // *Безопасность строительного фонда России проблемы и решения*. 2019. С. 129–137.
153. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Iss. 6

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Nekotorye problemy zhivuchesti zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem pri avarijnykh vozdeystviyah [Some problems of survivability of reinforced concrete structural systems under emergency impacts] // *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2018. No. 1. pp. 115–119. (rus)
2. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Building and Reconstruction*. 2021. Vol. 95, No 3. Pp. 76–108.
3. Kiakojoury F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M. R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. No December 2019 (206). С. 110061.
4. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Ekspoziciya zhivuchesti zhelezobetona [Exposition of the survivability of reinforced concrete] // *News of higher educational institutions. Construction*. 2007. No. 5. pp. 4–8. (rus)
5. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.V., Bukhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnykh vozdeystviyah [Survivability of buildings and structures under beyond-design influences]. М.: ASV Publishing House, 2014. 208 p. (rus)
6. Tamrazyan A.G. Konceptual'nye podhody k ocenke zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij [Conceptual approaches to assessing the survivability of building structures, buildings and structures] // *Reinforced Concrete Structures*. 2023. Т. 3. No. 3. P. 62–74. (rus)
7. Almazov V. O. Khoi Khao Zui. Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov [Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-story frames]. М.: Publishing House ASV. - 2013–128p. (rus)
8. Hadi M. N. S., Alrudaini T. M. S. Preventing the progressive collapse of reinforced concrete buildings // *International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 2011. P. 1–12.
9. Mohamed O., Al Khattab R., Mishra A., Isam, F. Recommendations for reducing progressive collapse potential in flat slab structural systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Т. 471. №. 5. P. 052069.
10. Hammad K., Lofty I., Naiem M. Enhancing Progressive Collapse Resistance in Existing Buildings // *Design and Construction of Smart Cities*. 2021. P. 39–46.
11. Yihai Bao, Sashi K Kunnath, Sherif El-Tawil, Hai S Lew. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures // *Journal of Structural Engineering*. 2008, Vol. 134, No. 7. P. 1079–1091.

12. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // *Adv. Struct. Eng.* 2018. № 21.9 P. 1388–1401.
13. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage // *Shock and Vibration*. 2016. T. 2016.
14. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri zaproektnykh vozdeystviyah [Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond-design influences]. M.: ASV, 2004. 216 p. (rus)
15. Thaer M., Alrudaini S. and Muhammad, N. S. H. A New Design to Prevent Progressive Collapse of Reinforced Concrete Buildings // The 5th Civil Engineering Conference in The Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference, 2010.
16. Travush V.I. Shapiro G.I. Kolchunov V.I. Leontyev E.V. Fedorova N.V. Proektirovanie zashchity krupnopanel'nykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Design of protection of large-panel buildings from progressive collapse] // *Housing Construction*. 2019. No 3. Pp. 40-46. (rus)
17. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. F. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 27. C. 100986.
18. Eremin K. I., Matveyushkin S. A. Osobennosti ekspertizy i NK metallicheskih konstrukcij ekspluatiruemykh sooruzhenij [Features of examination and NDT of metal structures of operated structures] // *In the world of non-destructive testing*. 2008. No. 4. pp. 4-7.
19. SP 296.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Osobyje vozdeystviya [Buildings and structures. Special Impacts]. 2018 (rus)
20. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions]. M.: Standartinform, 2018. P. 19 (rus)
21. ASCE 76-23. Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures. - American Society of Civil Engineers. 2023
22. GSA (General Services Administration). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance (Revision). - General Services Administration. 2016
23. BS EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. Comite Europeen de Normalisation (2002), Draft pr EN 1992-1-1
24. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V. Iznos, povrezhdeniya i bezopasnost' zhelezobetonnykh sooruzhenij [Wear, damage and safety of reinforced concrete structures]. – M.: Rusanova Publishing House, 2000. 144 p. (rus)
25. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyah [Deformation models of reinforced concrete under special influences] // *Industrial and civil construction*. 2018. No. 8. pp. 54-60. (rus)
26. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Calculation models of force resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV Publishing House. 2004. 472 p. (rus)
27. Golyshev A.B. Bachinsky V.Ya., Polishchuk V.P. Zhelezobetonnye konstrukcii. Soprotivlenie zhelezobetona [Reinforced concrete structures. Resistance of reinforced concrete]. T.1. K.: Logos, 2001. 481 p. (rus)
28. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I. Obespechenie zhivuchesti grazhdanskikh zdaniy pri osobykh vozdeystviyah [Ensuring the survivability of civil buildings under special influences] // Thematic scientific-practical conference “City construction complex and the safety of life support for citizens”: collection. reports. M.: MGSU, 2005. 9-10 (rus)
29. Orton S. Development of a CFRP System to Provide Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Progressive Collapse, Dissertation, 2007
30. Kim J. and Yu J. Analysis of Reinforced Concrete Frames Subjected to Column Loss // *Magazine of Concrete Research*. 2012. V.64(1), pp. 21-33
31. D3–1: Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). FAILNOMORE. – 2021.
32. GOST 27.002-89.9. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Reliability in technology. Terms and Definitions]. M.: IPK Publishing House of Standards, 1990. 38 p. (rus)
33. Makhutov N. A., Petrov V. P., Reznikov D. O. Ocenka zhivuchesti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Assessment of the survivability of complex technical systems] // *Problems of safety and emergency situations*. 2009. – No. 3. – pp. 47-66. (rus)
34. Raiser V. D. Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij [Calculation and standardization of reliability of building structures]. M.: Stroyizdat, 1995. 348 p. (rus)
35. Antseliovich L. L. Nadezhnost', bezopasnost' i zhivuchest' samoleta [Reliability, safety and survivability of the aircraft] // M.: Mechanical Engineering. 1985. – T. 3985. – P. 296 (rus)

36. Bolotin V.V. *Primenenie metodov teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij* [Application of methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. M.: Stroyizdat, 1971. (rus)
37. Tur V.V., Nadolsky V.V. *Koncepciya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osnove chislennyh modelej soprotivleniya* [The concept of designing building structures based on numerical resistance models] // *Construction and Reconstruction*. 2022. No. 6. P. 78-90 (rus)
38. Bassam A. Izzuddin, Miguel F. Pereira, Ulrike Kuhlmann, Lars Rölle, Ton Vrouwenvelder, Bernt J. Leira, Application of Probabilistic Robustness Framework: Risk Assessment of Multi-Storey Buildings under Extreme Loading // *Struct. Eng. Int.* 2012. 22(1). 79-85.
39. Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse // *J. Perform. Constr. Fac.* 2006. 20 (4). 315-323.
40. Biagi V. D., Kiakojouri F., Chiaia B., Sheidaii M. R. A simplified method for assessing the response of RC frame structures to sudden column removal // *Applied Sciences*. 2020. T. 10. №. 9. C. 3081.
41. Chen C. H., Zhu Y. F., Yao Y., Huang Y., Long X. An evaluation method to predict progressive collapse resistance of steel frame structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. T. 122. C. 238-250.
42. Alekseytsev, A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). Article No. 10306. DOI: 10.34910/MCE.103.6
43. Lizogub A.A., Tur A.V., Tur V.V. Veroyatnostnyj podhod k ocenke zhivuchesti konstruktivnyh sistem iz sbornogo i monolitnogo zhelezobetona [Probabilistic approach to assessing the survivability of structural systems made of prefabricated and monolithic reinforced concrete] // *Construction and Reconstruction*. 2023. T. 108, No. 4. P. 95 – 107 (rus)
44. Naghavi F., Tavakoli H. R. Probabilistic prediction of failure in columns of a steel structure under progressive collapse using response surface and artificial neural network methods // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2022. C. 1-17.
45. Cardoso J. B., de Almeida J. R., Dias J. M., Coelho P. G. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks // *Advances in Engineering Software*. 2008. T. 39. №. 6. C. 505-513.
46. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. Checking of structural system robustness based on pseudo-static full probabilistic approach // *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures*. 2019. Pp. 2126-2133.
47. Dyagtyar A.N. *Optimizaciya zhivuchesti konstruktivno nelinejnyh zhelezobetonnyh sterzhnevnyh konstrukcij v zapredel'nyh sostoyaniyah* [Optimization of the survivability of structurally nonlinear reinforced concrete rod structures in extreme states]: thesis. Orel: [Orlov. State Tech. University], 2005. (rus)
48. Geniev G.A. O principe ekvigradientnosti i primeneni ego k optimizacionnym zadacham ustojchivosti sterzhnevnyh sistem [On the principle of equigradiance and its application to optimization problems of stability of rod systems] // *Structural mechanics and design of structures*. 1979. No. 6. pp. 8-13. (rus)
49. Maslennikov A. M. *Riski vozniknoveniya prirodnyh i tekhnogennyh katastrof* [Risks of natural and man-made disasters]. St. Petersburg, 2008. 165p. (rus)
50. Kudzis A.P. *Ocenka nadezhnosti zhelezobetonnyh konstrukcij* [Reliability assessment of reinforced concrete structures]. Vilnius: Mokslas, 1985. 156 p. (rus)
51. Kotlyarovskiy V.A., Zabegaev A.V. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidaciya posledstvij* [Accidents and disasters. Prevention and mitigation of consequences]. KN.5.-M.: ASV, 2011.-414 p. (rus)
52. STB ISO 2394-2007. *Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij. Obshchie principy* [Reliability of building structures. General principles Intro]. Minsk: State Standard of the Republic of Belarus, 2007. 69 p. (rus)
53. TKP EN 1990-2011. *Osnovy proektirovaniya konstrukcij* [Fundamentals of structural design]. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2012. 70 p. (rus)
54. Nadolsky V.V., Verevka F.A. *Osobennosti opredeleniya znachenij indeksa nadezhnosti dlya raznyh periodov povtoryaemosti* [Features of determining the values of the reliability index for different periods of repetition] // *Prospective directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: collection of scientific articles of the XXI International Scientific and Methodological Seminar*. – 2018. P.205-212. (rus)
55. Kolchunov V. I., Tur V. V. *Napravleniya proektirovaniya konstruktivnyh sistem v osobyh raschetnyh situatsiyah* [Directions for designing structural systems in special design situations] // *Industrial and civil construction*. 2023. No. 7. P. 5-15. (rus)
56. Fu G., Frangopol D. M. Balancing weight, system reliability and redundancy in a multiobjective optimization framework // *Structural Safety*. 1990. T. 7. №. 2-4. C. 165-175.
57. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness // *Structural safety*. 2008. T. 30. №. 3. C. 253-267.
58. Chen Y., Yang G. P., Xia Q. Y., Wu G. W. Enrichment and characterization of dissolved organic matter in the surface microlayer and subsurface water of the South Yellow Sea // *Marine Chemistry*. 2016. T. 182. C. 1-13.
59. Beck A. T., da Rosa Ribeiro L., Costa L. G., Stewart M. G. Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures // *Structures. Elsevier*. 2023. T. 57. C. 105295.

60. Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03) Washington, DC: Department of Defence (DoD), 2009.
61. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. (11).
62. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2018. № 4 (32). C. 04018043.
63. Almusallam T. H., Elsanadedy H. M., Al-Sallou, Y. A., Siddiqui N. A., Iqbal R. A. Experimental investigation on vulnerability of precast RC beam-column joints to progressive collapse // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018. T. 22. C. 3995-4010.
64. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary American Concrete Institute, 2019
65. Abdelazim W., Mohamed H. M., Benmokrane B. Inelastic Second-Order Analysis for Slender GFRP-Reinforced Concrete Columns: Experimental Investigations and Theoretical Study // *Journal of Composites for Construction*. 2020. № 3 (24).
66. MacGregor J. G. Design of slender concrete columns - revisited // *ACI Structural Journal*. 1993. № 3 (90). C. 302–307.
67. Kolchunov V. I., Prasolov N. O., Kozharinova L. V. Experimental and theoretical research on survivability of reinforced concrete frames in the moment of individual element buckling // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3–2. C. 109–115.
68. GOST 27751-2014 Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya [Reliability of building structures and foundations. Basic provisions]. Moscow: JSC "Research Center" Construction ", 2019. (rus)
69. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. (84). C. 300–310.
70. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018. № 03 (18). C. 1850038.
71. Weng J., Tan K. H., Lee C. K. Adaptive superelement modeling for progressive collapse analysis of reinforced concrete frames // *Engineering Structures*. 2017. (151). C. 136–152.
72. Gemmerling A.V. Raschet sterzhnevnykh sistem [Calculation of rod systems]. M.: Stroyizdat, 1974, 207 p. (rus)
73. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. O metodah resheniya uravnenij polzuchesti betona [On methods for solving concrete creep equations] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2005. No3. pp. 55-63. (rus)
74. Sanzharovsky R. S. Uстойчивost' elementov stroitel'nykh konstrukcij pri polzuchesti [Stability of elements of building structures under creep]. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1984. 217 p. (rus)
75. Sasani M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego // *Journal of Structural Engineering*. 2008. № 3 (134). C. 478–488.
76. Gemmerling A.V. Nesushchaya sposobnost' sterzhnevnykh stal'nykh konstrukcij [Bearing capacity of rod steel structures]. Moscow: Gosstroyizdat, 1958. 216 p. (rus)
77. Perelmuter A. V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state // *Vestnik MGSU*. 2021. № 12. C. 1559–1566.
78. Alexandrov A. V., Travush V. I., Matveev A. V. O raschete sterzhnevnykh konstruktsiy na ustoychivost' // *Industrial and Civil Engineering*. 2002. № 3. C. 16–19.
79. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition Of Reinforced Concrete Structures And Its Normalization // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. № 5. C. 4–9.
80. Tur A.V. Soprotivlenie izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri vnezapnom prilozhenii nagruzki [Resistance of bending reinforced concrete elements under sudden application of load]: dis. Ph.D. tech. Sciences: spec. 05.23.01. Brest, 2012 (rus)
81. Shi F., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium // *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2017. T. 11. №. 1.
82. Belostotsky A. M., Akimov P. A., Dmitriev D. S., Nagibovich A. I., Petryashev N. O., Petryashev S. O. Raschetnoe issledovanie parametrov mekhanicheskoy bezopasnosti vysotnogo (404 metra) zhilogo kompleksa «One Tower» v delovom centre «Moskva-Siti» [Calculation study of the mechanical safety parameters of a high-rise (404 meters) residential complex " One Tower" in the Moscow City business center] // *Academia. Architecture and construction*. 2019. no. 3. pp. 122-129. (rus)
83. Belostotsky A. M., Akimov P. A., Aul A. A., Dmitriev D. S., Dyadchenko Yu. N., Nagibovich A. I. Raschetnoe obosnovanie mekhanicheskoy bezopasnosti stadionov k CHempionatu mira po futbolu 2018 goda [Calculation

- justification for the mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018] // *Academia. Architecture and construction*. 2018. no. 3. pp. 118-129. (rus)
84. Travush V.I., Belostotsky A.M., Vershinin V.V., Ostrovsky K.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. CHislennoe modelirovanie fizicheski nelinejnoj dinamicheskoy reakcii vysotnyh zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyah urovnya MRZ [Numerical modeling of physically nonlinear dynamic response of high-rise buildings under seismic impacts at the MSE level] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. No. 12(1). pp. 117-139. (rus)
 85. Perelmutter A.V., Kriksunov E.Z., Mosina N.V. Realizaciya rascheta monolitnyh zhilyh zdaniy na progressiruyushchee (lavinoobraznoe) obrushenie v srede vychislitel'nogo kompleksa "SCAD Office" [Implementation of the calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche-like) collapse in the environment of the SCAD Office computer complex] // *Engineering and Construction Journal*. 2009. T. 4. No. 2. P. 13-18. (rus)
 86. Marchis A. G., Botez M. D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories // *Procedia Manufacturing*. 2019. T. 32. P. 136-143.
 87. Marjanishvili S. and Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20, No. 4, pp. 365-374
 88. Kaewkulchai G. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis / G. Kaewkulchai, E.B. Williamson // *Computers & Structures*. 2004. T. 82. № 7-8. C.639-651.
 89. Izzuddin B.A., Vlassis A. G., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. T. 30. № 5. – C.1308-1318.
 90. Vlassis A.G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. T. 30. № 5. C.1424-1438.
 91. Mckay A.E. Alternative Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Non-Linear Load Increase Factors / M.Sc., the University of Texas at San Antonio, 2008.
 92. Mohamed, O. A. Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings // *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31
 93. Brian I. S. Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of Existing Buildings // Master Thesis, Ohio State University. 2010, USA
 94. Fu F. Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building With 3-D Finite Element Modeling Method // *Journal of Constructional Steel Research*. 2009. pp.1269-1278.
 95. Salem H. M. Computer-Aided Design of Framed Reinforced Concrete Structures Subjected to Flood Scouring // *Journal of American Science*. 2011. 7(10), pp. 191-200
 96. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // *Engineering Structures*. 2010. T. 32. № 5. C.1223-1235
 97. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Raschet ustojchivosti zhelezobetonnyh karkasov zdaniy pri osobyyh vozdeystviyah [Calculation of the stability of reinforced concrete frames of buildings under special influences] // *Industrial and civil construction*. 2023. N 9. pp. 12-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.12-21 (rus)
 98. Bondarenko V.M., Migal R.E., Yagupov B.A. Rezervy i ekspoziciya konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy, ekspluatiruyushchisya v agressivnoj srede [Reserves and exposure to the structural safety of buildings operating in an aggressive environment] // *Construction and reconstruction*. 2014. No. 1. P. 3-10 (rus)
 99. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Koncepciya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdeystviyah [Concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under power and environmental influences] // *Industrial and civil construction*. 2013. No. 2. pp. 28-31. (rus)
 100. Galustov K.Z. Razvitie teorii polzuchesti betona i sovershenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij [Development of the theory of concrete creep and improvement of methods for calculating reinforced concrete structures] / Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2008 (rus)
 101. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Soprotivlenie zhelezobetona [Resistance of reinforced concrete]. Kyiv: Osnova, 2009. 432 p. (rus)
 102. Androsova N.B., Kolchunov V.I., Emelyanov S.G. Neravnovesnye i nelinejnye processy pri ocenke potenciala zhivuchesti zhelezobetonnyh konstruktivnyh sistem v zapredel'nyh sostoyaniyah [Nonequilibrium and nonlinear processes in assessing the survivability potential of reinforced concrete structural systems in extreme states] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2022. T. 18. No. 6. pp. 490-502. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-490-502>. (rus)
 103. Rekomendacii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij [Recommendations for taking into account creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures]. M.: Stroyizdat, 1988. 120 p. (rus)
 104. Travush V.I., Murashkin V.G. Vliyanie polzuchesti na raspredelenie deformacij i napryazhenij v izgibaemom elemente [The influence of creep on the distribution of deformations and stresses in a bending element] // *Construction and reconstruction*. 2017. No. 2. P. 57-70. (rus)

105. Bondarenko V. M., Klyueva N. V. K raschetu sooruzhenij, menyayushchih raschetnyu skhemu vsledstvie korrozionnyh povrezhdenij [To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage] // *News of higher educational institutions. Construction*. 2008. No. 1. pp. 4-12. (rus)
106. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
107. Larionov E.A., Rimshin V.I., Zhdanova T.V. The principle of superimposition of deformations in the theory of creep [The principle of superimposition of deformations in the theory of creep] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2019. Vol. 15. No. 6. pp. 483–496. (rus)
108. Dellepiani M. G. et al. Numerical investigation on the creep response of concrete structures by means of a multi-scale strategy // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 263. C. 119867.
109. Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A., Kvasnikov A.A. Konceptiya razvitiya prikladnoj teorii polzuchesti zhelezobetona [Concept of development of the applied theory of creep of reinforced concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 2020. No. 2 (602). pp. 8–11 (rus)
110. Bondarenko V.M., Markov S.V., Rimshin V.I. Korrozionnye povrezhdeniya i resurs silovogo soprotivleniya zhelezobetonnyh konstrukcij [Corrosion damage and the resource of force resistance of reinforced concrete structures] // *BST*, 2002. No. 8. P. 26-32. (rus)
111. Kmiecik P., Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. Volume 11. Issue 3. Pp. 623 – 636.
112. Minas A.I. Metod ocenki korrozionnoj stojkosti nekotoryh stroitel'nyh materialov [Method for assessing the corrosion resistance of some building materials] // *Construction materials and structures*. Rostov n/d., 1972. P.49-61. (rus)
113. Popesko A.I. Rabotosposobnost' zhelezobetonnyh konstrukcij, podverzhennyh korrozii [Performance of reinforced concrete structures subject to corrosion]. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect-builds univ., 1996. 182 p. (rus)
114. Guzeev E.A., Mitin A.A., Basova L.N. Deformativnost' i treshchinostojkost' szhatyh armirovannyh elementov pri dlitel'nom nagruzhении i dejstvii zhidkih sred [Deformability and crack resistance of compressed reinforced elements under long-term loading and action of liquid media] // *Collection of articles. tr. NIIZHB. M.: Stroyizdat*, 1984. 34 p. (rus)
115. Savitsky N.V., Guzeev E.A., Bondarenko V.M. Integral'nyj metod ocenki napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh elementov v sluchae vozdejstviya agressivnoj sredy i silovoj nagruzki [Integral method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete elements in the case of exposure to an aggressive environment and force load]. Corrosion resistance of concrete and reinforced concrete in aggressive environments. M.: 1984. P. 20-27 (rus)
116. Bondarenko V.M., Klyueva N.V. K raschetu sooruzhenij, menyayushchih raschetnyu skhemu vsledstvie korrozionnyh povrezhdenij [To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage] // *News of universities. Construction*. 2008. No. 1. pp. 4-12. (rus)
117. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Dissipativnaya teoriya silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Dissipative theory of force resistance of reinforced concrete]. M.: Student, 2015. 111 p. (rus)
118. Bondarenko V. M. Silovoe deformirovanie, korrozionnye povrezhdeniya i energosoprotivlenie zhelezobetona [Force deformation, corrosion damage and energy resistance of reinforced concrete]. South-West. state University. Kursk. 2016. 67p. (rus)
119. Selyaev, L.M. Oshkina, P.V. Selyaev V.P. Himicheskoe soprotivlenie cementnyh betonov dejstviyu sul'fat-ionov [Chemical resistance of cement concrete to the action of sulfate ions] // Saransk: Mordov Publishing House. University, 2013 (rus)
120. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Sorokin E.V. Ocenka ostatochnogo resursa zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, podverzhennyh dejstviyu hloridnoj korrozii [Assessment of the residual life of reinforced concrete bending elements exposed to chloride corrosion] // *Construction and reconstruction*. 2017. no. 6. pp. 49-58. (rus)
121. Klyueva N.V., Androsova N.B., Gubanova M.S. Kriterij prochnosti korrozionno povrezhdaemogo betona pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Strength criterion for corrosion-damaged concrete under complex stress state] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2015. No. 1. pp. 38-42. (rus)
122. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams // *HBRC Journal*. 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
123. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beamend specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology

124. Popov D. S. Eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskikh svoystv korrozionno-povrezhdennykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov [Experimental studies of the dynamic properties of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements] // *Construction and reconstruction*. 2022. No. 2. pp. 55-64. (rus)
125. Kai Q., Zhiqiang H. U. A. N. G., Yunhao W. E. N. G., Xiaohui Y. U. Study on load resisting mechanism of corroded RC frame structures against progressive collapse // *Journal of Building Structures*. 2022. T. 43. №. 9. C. 181.
126. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading // *Buildings*. 2023. T. 13. №. 9. C. 2133.
127. Leonovich, S. N., Litvinovsky, D. A., Chernyakevich, O. Yu., Stepanova, A. V. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh : v 2 ch [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion influences: in 2 parts]. Minsk: BNTU, 2016. Part 1. 390 p. (rus)
128. Istomin A.D., Petrova V.A. Usiliya v staticheski neopredelimyykh zhelezobetonnykh konstrukciyakh pri silovykh i temperaturnykh vozdeystviyakh [Efforts in statically indeterminate reinforced concrete structures under force and temperature influences] // *Safety of the Russian construction fund, problems and solutions*. 2019. pp. 60-68. (rus)
129. Fedorov V.S., Levitsky V.E. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya izmeneniya prochnostnykh i deformativnykh harakteristik betona v usloviyakh pozhara [Theoretical foundations for predicting changes in the strength and deformation characteristics of concrete under fire conditions] // Problems of ensuring the safety of the Russian building stock: Proceedings of the III International Academic Readings. Kursk: Kursk State Technical University, 2004. pp. 236–244. (rus)
130. Fedorov V. S. Osnovnye polozheniya teorii rascheta ognestojkosti zhelezobetonnykh konstrukcij [Basic provisions of the theory of calculating the fire resistance of reinforced concrete structures] // *Housing Construction*. 2010. No. 4. pp. 29-32. (rus)
131. Kiran T., Anand, N., Mathews, M. E., Kanagaraj, B., Andrushia, A. D., Lubloy, E., & Jayakumar, G. Investigation on improving the residual mechanical properties of reinforcement steel and bond strength of concrete exposed to elevated temperature // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. C. e01128.
132. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli, A. Y. Experimental and analytical assessment of RC joints with varying reinforcement detailing under push-down loading before and after fires // *Engineering Structures*. 2019. T. 189. C. 550-564.
133. Parthasarathi N., Satyanarayanan K. S. Progressive collapse behavior of reinforced concrete frame exposed to high temperature // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. T. 12. №. 1. C. 110-124.
134. Matvienko V. E. Soprotivlenie zhelezobetonnoj balki vozdeystviyu pozhara v stadii raboty kak visyachej sistemy [Resistance of a reinforced concrete beam to the effects of fire at the stage of operation as a hanging system] // *Prospects for the development of the construction complex*. 2020. pp. 235-240.
135. Tamrazyan A. G., Mehralizadeh A. B. Osobennosti proyavleniya ognevykh vozdeystvij pri raschete konstrukcij na progressiruyushchee razrushenie zdaniy s perekhodnymi etazhami [Features of the manifestation of fire effects in the calculation of structures for the progressive destruction of buildings with transitional floors] // *Fire and Explosion Safety*. 2012. T. 21. No. 12. pp. 41-44.
136. Caredda G., Makood N., Buitrago M., Sagaseta J. Learning from the progressive collapse of buildings // *Developments in the built environment*. 2023. T. 15. C. 100194.
137. Sasani M., Werner A., Kazemi A. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures // *Engineering Structures*. 2011. № 2 (33). C. 401–409.
138. Adam J. M. [и др.]. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // *Engineering Structures*. 2020. (210).
139. Meng L., Ding Y., Li L., Wei J., Li M., Wang J., Liu J. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC) // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 399. C. 132526.
140. Bazhenov Yu. M. Beton pri dinamicheskom nagruzhenii [Concrete under dynamic loading]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 271 p. (rus)
141. Geniev G. A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength limits of concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 1998. No. 1. P. 18–19. (rus)
142. Nam J. W., Kim H. J., Kim S. B., Jay Kim J. H., Byun K. J. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. № 5 (18). C. 461–490.
143. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // *Composite Structures*. 2023. T. 309. C. 116727.
144. Wei J., Cheng B., Li L., Long W. J., Khayat K. H. Prediction of dynamic mechanical behaviors of coral concrete under different corrosive environments and its enhancement mechanism // *Journal of Building Engineering*. 2023. T. 63. C. 105507.
145. Bazhenova A. V., Tsvetkov K. A. Eksperimental'naya ocenka vliyaniya nekotorykh faktorov na prochnost' betona pri odnokratnom dinamicheskom vozdeystvii [Experimental assessment of the influence of some factors on the strength of concrete under a single dynamic impact] // *Integration, partnership and innovation in construction science and education*. 2017. pp. 206-212. (rus)

146. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static-dynamic deformation of concrete] // *Industrial and civil construction*. 2020. No. 1. pp. 4-11. (rus)
147. Geniev G. A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength limits of concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 1998. No. 1. P. 18–19 (rus)
148. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. (300). C. 124302.
149. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite // *Cement and Concrete Research*. 2009. T. 39. №. 11. C. 1044-1051.
150. Levitch V., Kvasha V., Boussalis H., Chassiakos A., Kosmatopoulos E. Seismic performance capacities of old concrete // *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*. 2004. C. 1-6.
151. Tamrazyan A. G., Yesayan S. G. Mekhanika polzuchesti betona [Mechanics of concrete creep] // М.: MGSU. 2012.
152. Sidorov V. N. Chislennoe modelirovanie reologicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov na primere polzuchesti betona [Numerical modeling of the rheological properties of building materials using the example of concrete creep] // *Safety of the Russian building stock problems and solutions*. 2019. pp. 129-137.
153. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Iss. 6

Информация об авторах:

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: asiorel@mail.ru

Ильющенко Татьяна Александровна

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства.
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, начальник отдела технического нормирования в области строительства
E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Федорова Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства
E-mail: fedorova@mgsu.ru

Савин Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Тур Виктор Владимирович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
заслуженный работник образования РБ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов.
E-mail: profturvic@gmail.com

Лизогуб Александр Александрович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
м.т.н., младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС».
E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru

Information about authors:

Kolchunov Vitaly I.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Full member of RAACS, Doctor of Tech. Sc., Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures
E-mail: asiorel@mail.ru

Iliushchenko Tatiana A.

Kursk State University, Kursk, Russia.
Kursk, Russia, Senior Lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering.
construction.
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Moscow, Russia,
Head of the Department of Technical Standardization in the field of construction.
E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Fedorova Natalia V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Advisor of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Industrial and Civil Engineering
E-mail: fedorova@mgsu.ru

Savin Sergei Y.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical science, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Tur Viktor V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
doctor of technical sciences, Professor, Head the Department of Concrete Technology and Construction Materials
E-mail: profturvic@gmail.com

Lizahub Aliaksandr Al.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
master of eng. science, junior research fellow of BL «RCIC»
E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru