

УДК 624.07(083.75)

doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15

## Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях

**Виталий Иванович КОЛЧУНОВ**<sup>1,2</sup>, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, asiorel@mail.ru

**Виктор Владимирович ТУР**<sup>3</sup>, доктор технических наук, профессор, tur.s320@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238 Москва, Локомотивный пр., 21

<sup>3</sup> Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь, 224017 Брест, ул. Московская, 267

**Аннотация.** Представлен анализ российских и зарубежных нормативных документов, регламентирующих проектирование конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Показано, что ряд задач, связанных с проблемой безопасности конструктивных систем при особых воздействиях, остаются недостаточно исследованными, а достоверность некоторых важных положений не подкреплена экспериментальными исследованиями живучести конструктивных систем зданий и сооружений. В порядке обсуждения рассмотрены предложения, относящиеся к проблеме оценки рисков конструктивных систем в особых расчетных ситуациях на вероятностной основе и установлению допустимой меры надежности, базирующейся на единой концепции и явно выраженных в целевых значениях вероятностей отказа индексов надежности, которые используются для калибровки частных коэффициентов в моделях сопротивлений конструктивных систем. Отмечается, что для принятия обоснованных решений следует выполнить объективное сравнение расчетных положений действующих и предлагаемых нормативных документов, опираясь на результаты оценки величин рисков как, например, показано в примерах данной статьи.

**Ключевые слова:** надежность, риск, устойчивость, конструктивная система, расчетные ситуации

**Для цитирования:** Колчунов В. И., Тур В. В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 5–15.

doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15

## DIRECTIONS FOR THE DESIGN OF STRUCTURAL SYSTEMS IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS

**Vitaly I. KOLCHUNOV**<sup>1,2</sup>, asiorel@mail.ru

**Viktor V. TUR**<sup>3</sup>, tur.s320@mail.ru

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Lokomotivnyy proezd, 21, Moscow 127238, Russian Federation

<sup>3</sup> Brest State Technical University, Moskovskaya ul., 267, Brest 224017, Republic of Belarus

**Abstract.** An analysis of Russian and foreign regulatory documents regulating the design of structural systems in accidental design situations is presented. It is shown that a number of problems related to the safety of the damaged structural systems under accidental actions remain insufficiently investigated, and the reliability of some important provisions is not supported by experimental studies of the survivability of structural systems of buildings and structures. By way of discussion, proposals related to the problem of assessing the risks of structural systems in accidental design situations on a probabilistic basis and establishing an acceptable measure of reliability based on a unified concept and reliability indices explicitly expressed in target values of failure probabilities that are used for calibration of the partial factors in resistance models of structural systems are considered. It is noted that in order to make informed decisions, an objective comparison of the estimated provisions of existing and proposed regulatory documents should be carried out, based on the results of risk assessment, as, for example, shown in the examples of this article.

**Keywords:** reliability, risk, stability, structural system

**For citation:** Kolchunov V. I., Tur V. V. Directions for the Design of Structural Systems in Accidental Design Situations. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 7, pp. 5–15.

(In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15

### Введение

Проблема повышения защищенности зданий и сооружений от особых воздействий становится все более актуальной во всех странах мира, в том числе в России и Республике Беларусь. Ее решению уделяется большое внимание на всех уровнях строительной деятельности: от проведения комплекса научных исследований, составляющих основу для развития нормативной базы проектирования и строительства, до продления жизненного цикла здания и его утилизации.

В России после принятия федерального закона от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» подготовлены новые и актуализированы некоторые действовавшие нормативные документы, регламентирующие современные требования проектирования конструктивных систем зданий и сооружений в особых расчетных ситуациях. К документам общего характера относятся ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения», СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия», СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» (изм. № 3). Кроме того, приняты и актуализированы документы, регламентирующие требования проектирования отдельных типов зданий: СП 56.13330.2021 «Производственные здания», СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования», СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования».

В связи с этим представляет интерес краткий анализ опыта применения нормативных документов, принятых в разное время в практике проектирования объ-

ектов строительства, с целью разработки направлений их дальнейшего совершенствования на основе результатов научных исследований и передового опыта. Отдельная проблема, которая должна быть детально рассмотрена при создании новых и/или совершенствовании действующих нормативных документов данной группы, — установление допустимых или целевых значений параметров надежности. Эти параметры выражены либо явно в терминах рисков и связанных с ними вероятностей отказа (индексов надежности), либо неявно в виде системы частных коэффициентов, используемых в расчетных моделях сопротивлений. Следует отметить, что практически все перечисленные выше нормативные документы позволяют выполнять проектирование в особых расчетных ситуациях с неизвестным уровнем надежности.

В данной статье кратко представлены основные шаги и примеры установления уровня надежности конструктивной системы на основе допустимого риска.

### Метод

За последнее десятилетие разработанные и действующие в России нормативные документы по одному из рассматриваемых ключевых направлений проектирования безопасных конструктивных систем, а именно: по направлению, связанному с их проектированием в особых расчетных ситуациях, содержат ряд положений, которые носят критерийный характер без детализации способов обеспечения этих требований при проектировании. Введенные в этих документах понятия особого воздействия, особого предельного состояния и критерии особого предельного состояния для рассматриваемых параметров недостаточно адекватно отражают физическую суть сопротивления конст-

руктивных систем из разных материалов при различных напряженных состояниях на стадиях деформирования, выходящих за границы критериев традиционных предельных состояний, установленных экспериментально.

Остаются открытыми и некоторые другие вопросы, связанные с решением задач, относящихся к этой проблеме, например учет диссипативных свойств материалов в зависимости от уровня нагрузки, при которой производится динамическое догружение системы особым воздействием, собственно оценка динамических догрузений конструктивной системы при различных режимах этого воздействия, определение параметров живучести и методология прогнозирования живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях и др. [1].

В исследованиях [1–3] было показано, что коэффициент динамических догрузений в конструктивной системе из железобетона при внезапном изменении степени ее статической неопределимости зависит не только от топологии конструктивной системы, но и от структуры сечения и процента армирования сечений элементов системы (рис. 1). При этом диапазон изменения этого коэффициента весьма значителен. Для сравнения рассмотрено значение этого коэффициента, принимаемого по действующим нормативным документам, при расчете конструкции фермы по первой группе предельных состояний (на рис. 1 — кривая I ГПС).

Влияние хрупкого разрушения бетонной матрицы в железобетонном элементе на значение коэффициента динамических догрузений в конструктивной системе может составить 30–40 % и более его значения при внезапном изменении степени ее статической неопределимости [2]. Неучет влияния процента армирова-

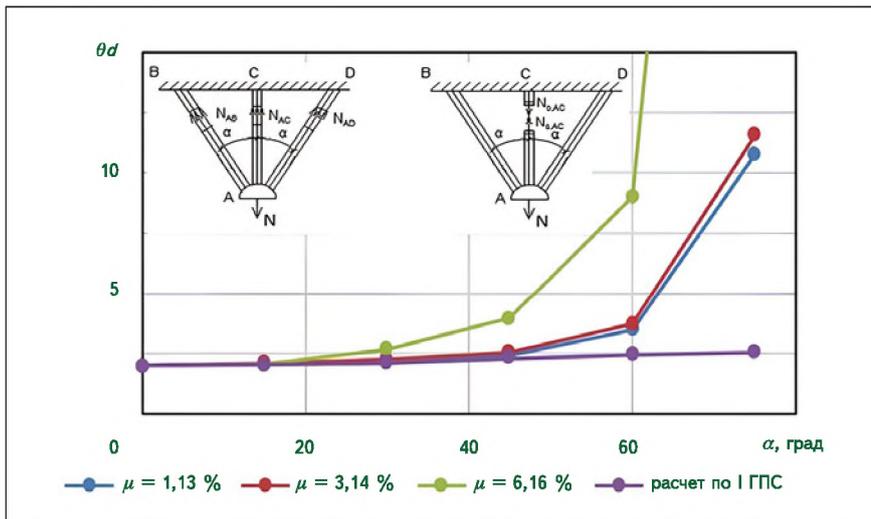


Рис. 1. К анализу коэффициента динамических догрузений  $\theta d$  железобетонной фермы с растянутыми элементами ( $\alpha$  — угол наклона раскосов фермы)

ния на коэффициент динамических догрузений в арматуре предварительно напряженного растянутого элемента, в частности нижнего пояса фермы в момент разрушения бетонной матрицы, как показано в [4], может привести к разрыву арматурного стержня.

Применяемые в практике проектирования программные комплексы (ЛИРА-САПР, ABAQUS, LS-DYNA и др.), основанные на методе конечных элементов, предлагают использовать готовые модули для проведения вычислительных экспериментов, т. е. моделирование. Эти модули используют физические модели, которые разработаны для конкретных материалов, что вынуждает исследователей дописывать или корректировать программы для других материалов. Например, параметры второй группы предельных состояний для высокопрочного бетона и фибробетона определяются по аналитическим зависимостям и физическим моделям, полученным для обычных бетонов. В то же время эти параметры, как показано в [5], качественно иные. В итоге данные программные комплексы не учитывают современный уровень расчет-

ных моделей железобетона. При этом следует обратить внимание и на обеспечение требуемого формата безопасности результатов, полученных с использованием конечно-элементных (КЭ) моделей при выполнении нелинейных статических (NLS) и динамических (NLD) расчетов.

При нелинейных расчетах применяют полные диаграммы деформирования со средними значениями прочностей и параметрических точек диаграммы. При таких расчетах не используют характеристические или расчетные значения базисных переменных, так как это, строго говоря, вообще маловероятно и может привести к «поломке» матрицы жесткостей. В таких случаях переход от средних сопротивлений, полученных в рамках КЭ-моделей, к расчетным осуществляют через глобальный коэффициент безопасности, откалиброванный для требуемого уровня надежности. Очевидно, что нормы или стандарты должны содержать:

- нормируемые показатели целевого уровня надежности;
- методы калибровки глобального коэффициента.

Решение этих и других задач при совершенствовании рассмат-

риваемых нормативных документов требует проведения новых целенаправленных экспериментальных исследований, причем не только на моделях конструктивных систем, но и на натурных конструкциях.

Анализ публикаций по этому направлению [5–15] показывает, что значительное число экспериментальных исследований до настоящего времени как в России, так и за рубежом проводились на моделях отдельных конструкций и носят пока единичный характер. Более того, в силу различных методик их проведения обобщение результатов этих исследований по основным параметрам, касающимся обоснования их применения для целей нормирования, проблематично.

Так, например, в наиболее масштабном натурном испытании четырехэтажного здания, проведенном Агентством оборонной науки и технологий Сингапура [5] в соответствии с требованиями Американского института бетона, в каркасе удалялась колонна первого этажа (рис. 2а). При этом изучали реакцию конструктивной системы после удаления вертикального элемента и характер сопротивления всего каркаса здания при перераспределении в нем силовых потоков. Нагружение конструктивной системы было гравитационным посредством укладки штучных грузов на перекрытия. Было установлено, что существенную роль в полном сопротивлении конструктивной системы играют не только изгибные, но и арочные, и мембранные (цепные) эффекты после ее перехода в дискретно-континуальное состояние.

По наиболее близкой к методике испытаний [6] был исследован четырехпролетный трехэтажный железобетонный каркас, который нагружали с помощью гидравлических домкратов и затем

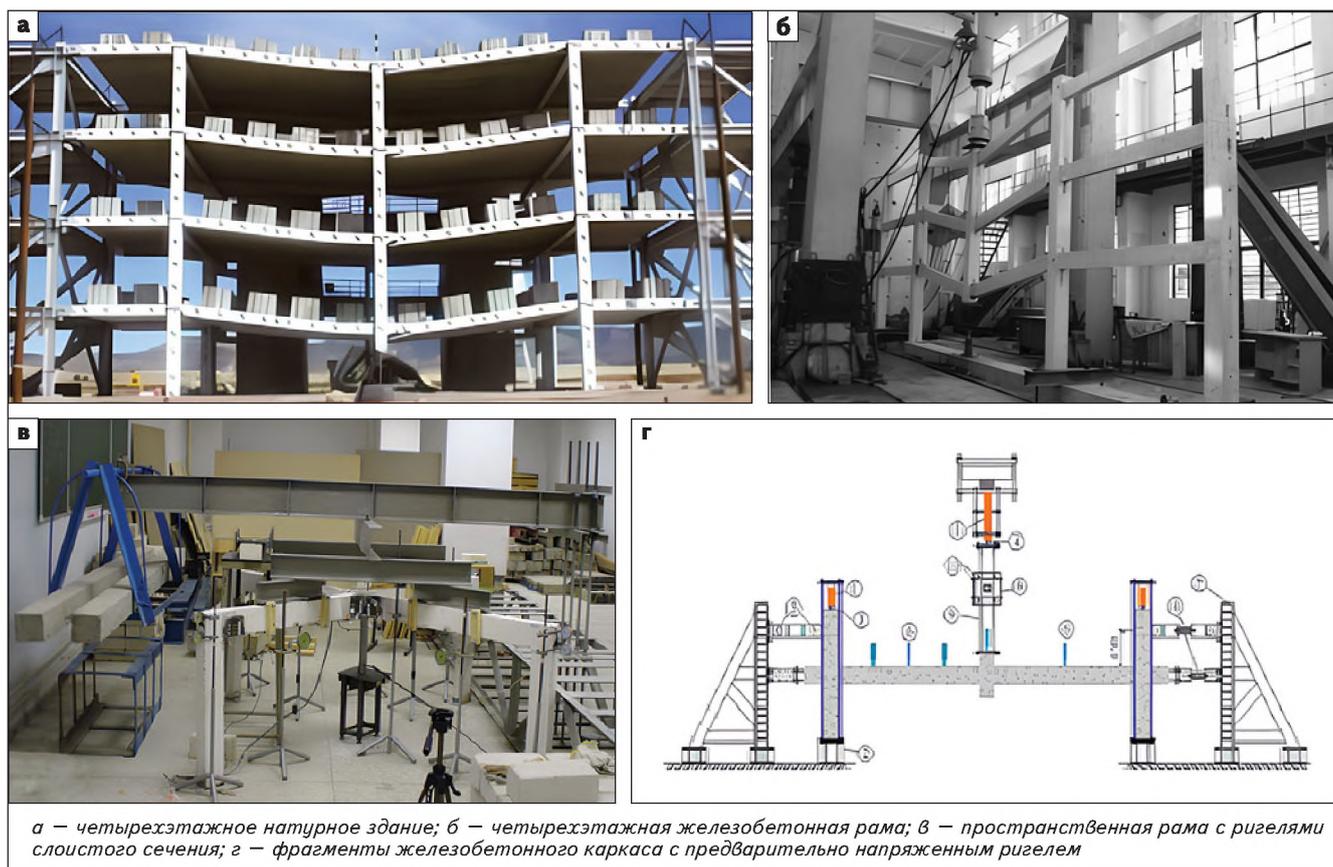


Рис. 2. Общий вид испытаний конструктивных систем на особое воздействие

постепенно удаляли среднюю стойку (рис. 2б). На основе результатов экспериментальных наблюдений было проанализировано механическое поведение рамы при таком воздействии, изучено перераспределение усилий и процесс структурной перестройки конструктивной системы. Сделан вывод о том, что расчетная несущая способность рамы, основанная на предельном пластическом состоянии, составляла приблизительно 70 % полученной в испытаниях отказоустойчивости с учетом влияния структурной перестройки конструктивной системы.

Были испытаны конструкции пространственных рам. В исследовании [9] рамно-стержневой каркас состоял из четырех сборных ригелей слоистого сечения (рис. 2в), а в исследовании [10] выбрали рамно-стержневой каркас из железобетона с ригелями

больших пролетов составного сечения. Особое воздействие моделировали внезапным удалением линейной связи — центральной телескопической стойки.

Кроме того, интерес представляют экспериментальные исследования железобетонных каркасов, элементы которых имеют предварительное напряжение [7, 8]. В работе [7] были испытаны пять сборных железобетонных каркасов, в четырех из которых ригель был выполнен предварительно напряженным (рис. 2г). Рама была изготовлена из бетона класса В35, в качестве продольной арматуры использовались стержни диаметром 12 мм класса А500. Запроектное воздействие моделировали нагрузкой, передававшейся на элементы каркаса после выключения центральной стойки. Деформирование рамы происходило при выключении центральной стойки в три стадии:

упругая, упругопластическая и разрушение. В результате испытаний был определен коэффициент динамических догрузок, который по результатам испытаний ненапряженных и предварительно напряженных конструкций изменялся от 1,24 до 1,83. При этом важно отметить, что испытание с помощью домкратов исключало приложение эксплуатационной нагрузки на раму в момент удаления колонны.

Количественно сопоставить результаты отмеченных испытаний по перераспределению силовых потоков в испытанных конструкциях не представляется возможным в силу того, что в одних случаях приложение нагрузки было гравитационным, в других — эксплуатационная нагрузка обеспечивалась гидравлическими домкратами, что приводило к ее выключению после удаления колонн из конструкции рамы.

В действующих нормативных документах по проектированию конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, в частности в СП 385.1325800 (изм. № 3), установлены критерии, исключающие возможность наступления прогрессирующего обрушения. Они довольно неконкретны и формулируются как недопущение разрушения некоторой локальной зоны конструктивной системы здания или сооружения. При этом такая зона определена лишь для нескольких типов конструктивных систем в их конкретных границах. В то же время при различных сочетаниях нагрузок эта зона локального разрушения может изменяться [16], а для сложных конструктивных систем, например в новых типах пространственных конструкций, такой критерий трудно реализуем.

Следует отметить, что в основу подобных ограничений, принятых в международных документах, например [19], положены требования, связанные с ограничением рисков. По-видимому, на данном этапе более целесообразно было бы использовать в качестве критерия параметр живучести конструктивной системы, определяющей ее геометрическую неизменяемость отдельных фрагментов конструктивной системы или системы в целом [4, 17, 18]. Из наиболее важных аспектов, которые, по-видимому, должны быть внесены в нормативные документы, — это нормируемые значения допустимых мер надежности, применяемые при проверках живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях.

Даже при условии, что разработанные модели сопротивлений и эффектов воздействий адекватно описывают физическое поведение поврежденной конструктивной системы в особой расчетной ситуации, а присущие им неопределенности (ошибки мо-

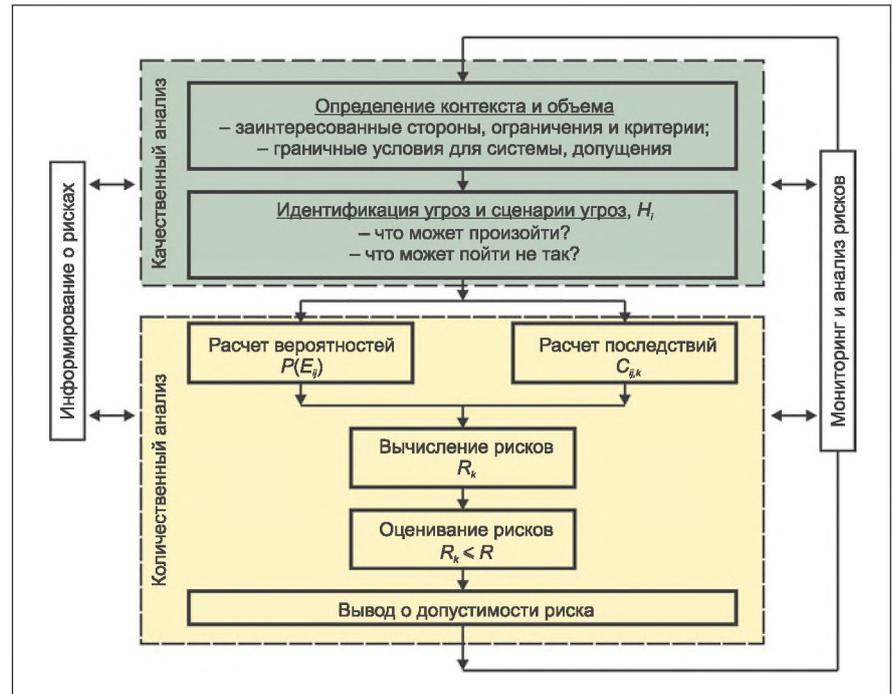


Рис. 3. Схема общего алгоритма процедуры установления рисков [20]

делирования) сведены к некоторому разумному минимуму, решение задачи по оцениванию живучести будет по-прежнему не полным. Это обусловлено тем обстоятельством, что проверки живучести конструктивной системы следует базировать на научно-обоснованных критериях, представленных, как правило, в виде детерминистических неравенств. В своей правой части они содержат нормируемые значения допустимых (целевых) мер надежности, явно выраженных в терминах рисков, и связанных с ними вероятностей отказа (индексов надежности) или неявно в виде расчетных значений, определяемых с помощью системы частных коэффициентов полувероятностных методов. Так, например, ТКП EN 1991-1-7 [19] содержит требование, в соответствии с которым для зданий класса 3 следует выполнять «систематическую оценку рисков». С другой стороны, эти меры надежности используют для калибровки системы частных коэффициентов в моделях сопротивле-

ний и воздействий, применяемых для проверок предельных состояний полувероятностными методами.

Таким образом, установление допустимых или целевых значений параметров надежности для выполнения проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях — отдельная проблема, которой следует уделить особое внимание в исследовании феномена прогрессирующего обрушения.

Согласно принципу MLSC (англ. *Marginal Life Saving Cost Principle*), установленному в международном стандарте СТБ ISO 2394 [20], требуемый (целевой) уровень надежности тесно связан с готовностью общества платить за спасение одной анонимной жизни и может быть количественно определен с помощью критерия LQI (англ. *Life Quality Index*). Вместе с тем в этом стандарте указано, что практическая реализация критерия MLSC с использованием LQI-критерия требует установления на нормативном уровне «абсолютных значений допу-

стимых рисков для обеспечения безопасности жизнедеятельности» [20].

По-видимому, и в российских нормативных документах для разработанных и разрабатываемых расчетных моделей сопротивлений и воздействий будут установлены допустимые параметры надежности, в частности, по аналогии с СТБ-ISO 2394 [20] допустимые (целевые) значения риска. Альтернативно для установления допустимого (целевого) риска может быть использована концепция LQI-критерия (индекса качества жизни) согласно [20]. Фундаментальный постулат, принятый при установлении приемлемого (допустимого) риска, заключается в том, что риски, связанные с отказом конструктивных систем зданий, запроектированных и возводимых в соответствии с современными принципами передовой практики, считаются достаточно малыми и приемлемыми для общества.

С другой стороны, современная передовая практика отражена в действующих стандартах и нормах проектирования конструкций, правильное применение которых влечет за собой создание конструктивных систем, являющихся безопасными и надежными по определению. В соответствии с этими соображениями наиболее простым и логичным подходом будет установление приемлемого (допустимого) риска как неотъемлемого риска, изложенного в упомянутых нормах. Тем не менее этот вопрос требует отдельного всестороннего обсуждения.

Общий алгоритм процедуры установления допустимых рисков показан на рис. 3 и соответствует [20].

При выполнении качественного анализа рисков (см. рис. 3) выявляют возможные сценарии угроз  $j$  и формы отказа, связанные с анализируемой конструк-

цией. В контексте рассматриваемой проблемы сценарий угрозы  $j$  описывают конкретным сценарием обрушения в результате отказа  $f$  одного из несущих элементов по установленной форме отказа  $k$ , приводимой в действие соответствующей схемой нагружения  $e$ .

В качестве примера рассмотрим реализацию процедуры установления допустимого (целевого) риска для актуализированной конструктивной системы типового межвидового каркаса Б1.020.1, для которой согласно [19, 21, 22] разработана интегрированная система горизонтальных и вертикальных связей. В процессе анализа варьировали следующими параметрами конструктивной системы, а именно: компоновка и геометрические размеры, прочностные характеристики материалов, сочетания и величина воздействий. Полный анализ согласно [22] включал 1000 конструктивных систем зданий данной серии, соответствующих классу СС2.

Для формирования соответствующих функций состояния  $g(X)$  был предварительно выполнен качественный анализ рисков и идентифицированы наиболее репрезентативные формы (механизмы) отказа элементов систем, запроектированных строго в соответствии с требованиями действующих норм [19, 21, 22] (из условия  $R_d = E_d$ ). Вероятности отказа для каждой репрезентативной формы (механизма) отказа были определены для всех элементов интегрированием функции состояния, что формально можно записать так:

$$P_f = \text{Prob}\{g(X) \leq 0\} = \int_{g(X) \leq 0} f_x(X) dX. \quad (1)$$

Вероятностные модели базисных переменных приняты согласно СН 2.01.01 [22].

Последствия частичного и полного обрушения, вызванного отказом конструктивного элемента для сценария  $j$ , оценивали с использованием модели последствий, предложенной в [23]. Учитывая то обстоятельство, что подходы к оцениванию последствий в исследовании [23] характеризуются неопределенностями высокого уровня, моделирование последствий отказа в большинстве случаев упрощают, рассматривая только человеческие жертвы, хотя в общем случае следует принимать во внимание все последствия (экономические, экологические, социальные и т. п.). В соответствии с моделью [23] рассчитывают ожидаемое число потенциальных жертв  $N_j$  в зависимости от предполагаемой площади обрушения  $A_{col}$  (для зданий класса СС2 согласно [22]  $N_j = 0,27 A_{col}^{0,5} - 1 \geq 0$ ).

При установленных значениях вероятности отказа  $P_{f,j}$  и ожидаемом числе потенциальных жертв  $N_j$ , связанных с каждым из сценариев  $j$ , значение социального (группового) риска  $R$  для отдельной конструктивной системы здания определяют, рассматривая все  $n_{sc}$  возможные сценарии:

$$R = \sum_{j=1}^{n_{sc}} (P_{f,j} N_j). \quad (2)$$

Графическое представление социального (группового) риска в зависимости от общей (полезной) площади  $A$  анализируемого здания для всех рассчитанных зданий приведено на рис. 4а. Каждая точка графика представляет собой социальный риск, связанный с отказом одной конструктивной системы и устанавливаемый с применением «профиля рисков». Как видно из рис. 4а, социальный риск для людей, связанный с конструктивным (механическим) отказом, изменяется в довольно широких пределах, в том числе в зависимости от масштабного эффекта.

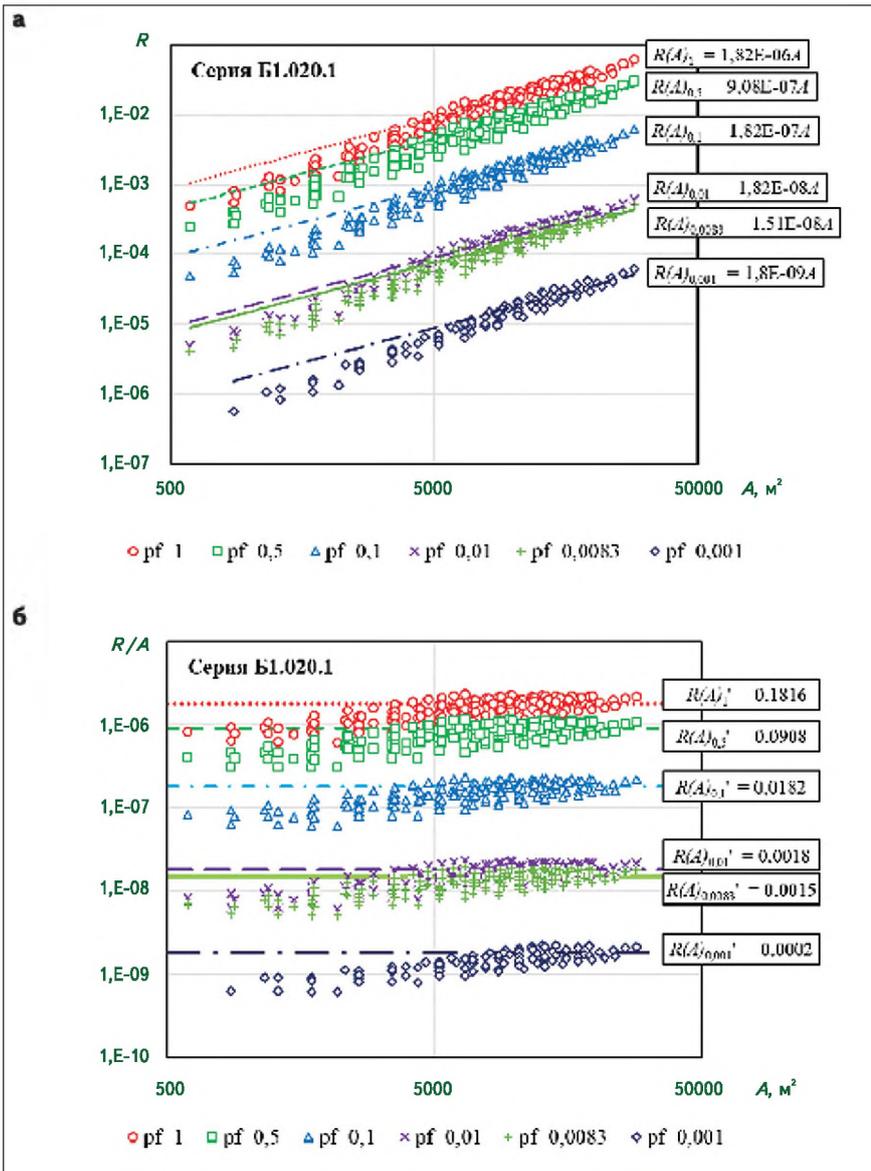


Рис. 4. Графическое представление социального (группового) риска  $R$  (а) и индивидуального риска  $R/A$  (б) в зависимости от общей (полезной) площади  $A$  анализируемого здания

Риски, вызванные отказом конструктивных систем, элементы которых запроектированы строго в соответствии с действующими нормами [21, 22], возрастают с увеличением числа форм отказа, количества конструктивных элементов, составляющих систему, и сочетаний воздействий, приводящих к отказу элемента [22], и, как видно на данном рисунке, с увеличением общей площади здания. Вместе с тем масштабный эффект может быть исключен при нормализа-

ции результатов, т. е. отнесением рисков к общей площади  $A$  помещений здания (рис. 4б) или общему числу форм отказа (числу сценариев отказа  $n_{sc}$ ). Можно сделать и еще одну ремарку. Для полученных результатов область между 95 и 5 % квантилями распределения довольно узкая, что указывает на высокий уровень оптимизации каркаса серии 1.020.

*Индивидуальный риск*, или вероятность того, что данный пользователь здания утратит жизнь в результате его обрушения в течение

установленного реферативного периода времени  $T_{ref}$ , может быть определен путем отношения риска к полной площади помещений здания  $R/A$  с учетом так называемого коэффициента заполнения или нормы площади, приходящейся на одного человека  $\mu_{A,i}$ . Норма площади зависит от назначения здания и категории нагрузочных площадей согласно СН 2.01.04 [24] и может применяться в широких пределах (от  $0,5 \text{ м}^2/\text{чел}$  в зданиях с большим скоплением людей до  $10 \text{ м}^2/\text{чел}$  для жилых зданий).

Допустимое значение индивидуального годового риска ( $T_{ref} = 1$  год) с учетом коэффициента заполнения  $\mu_{A,i} = 10 \text{ м}^2/\text{чел}$  для анализируемого каркаса составило:

$$r_{iR,adm} \cong \left(\frac{R}{A}\right)_{1y} \mu_{A,i} = 1,51 \cdot 10^{-7}. \quad (3)$$

В свою очередь допустимая вероятность отказа  $P_{f,adm,iR}$  может быть получена из зависимости (4) путем подстановки условной вероятности того, что человек, находящийся в здании, попадает в область обрушения  $P(d|f)$ :

$$P_{f,adm,iR} \leq \frac{r_{iR,adm}}{P(d|f)}, \quad (4)$$

где значение условной вероятности  $P(d|f)$  в первом приближении может быть принято согласно [23] для класса СС2 равным 0,05.

Допустимую годовую вероятность отказа и индекс надежности получаем из значения допустимого индивидуального риска, представленного выражением (4). Данные параметры надежности могут служить основой для последовательной калибровки частных коэффициентов, используемых в расчетных моделях полувероятностного метода. При этом согласно [20] особые события, сопровождающиеся боль-

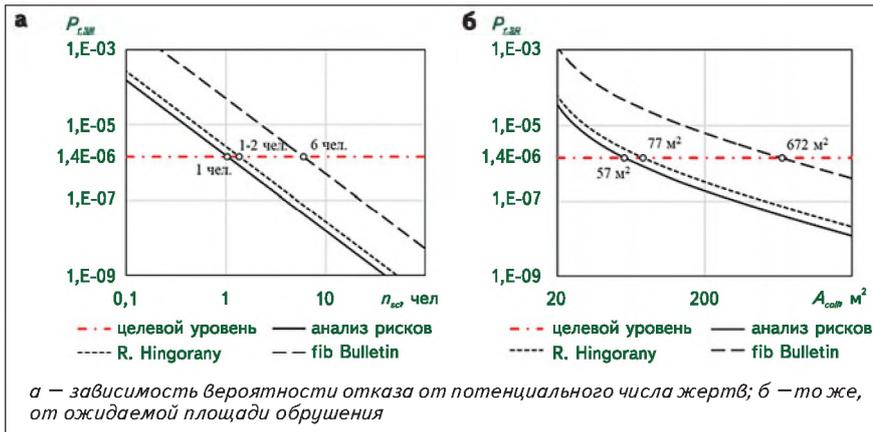


Рис. 5. Результаты анализа рисков

шим числом потенциальных жертв, должны быть полностью исключены, что обеспечивает применение функции « $F-n$ ».

Функция « $F-n$ », применяемая для представления социального (группового) риска согласно с СТБ ISO 2394 [20], довольно точно описывается зависимостью между годовой частотой (вероятностью) появления события с числом  $n \geq N$  жертв и числом жертв  $N$ . Математическое описание кривой « $F-n$ » представлено в [20] в виде:

$$F(n) \leq An^{-\alpha}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, посредством которого выражают общественное отрицание (неприятие) событий, приводящих к большому числу жертв ( $\alpha = 2$ );  $A$  — константа, представляющая собой частоту появления события с  $N \geq 1$  жертвой. Как правило, значение  $A$  должно соответствовать системе отсчета, для которой применяют « $F-n$ » критерий.

Согласно [20] для исключения принятия нерациональных решений, параметры критерия « $F-n$ » должны соответствовать ожидаемому числу жертв  $E(n)$ , определяемому по формуле

$$E(n) \cong F(1) \frac{\alpha}{\alpha - 1}. \quad (6)$$

С практической точки зрения при применении этого критерия конструктивная система трансформируется до одного элемента. Это соответствует частоте по-

явления события с  $N \geq 1$  жертвой (константа  $A$ ) и может быть затем преобразовано в допустимую вероятность отказа  $P_{f,SR}$ , базируясь на групповом риске:

$$P_{f,tag,SR} = \frac{An^{-\alpha}}{P(N|f)}. \quad (7)$$

Согласно [23], если текущая передовая практика в строительстве консервативна и считается приемлемой, то для реферативного периода  $T_{ref} = 1$  год согласно [21] для класса СС2 можно принять:  $A = 2,6 \cdot 10^{-6}$ . По данным настоящего исследования, получено  $A = 1,51 \cdot 10^{-6}$ . Результаты такого анализа представлены на рис. 5.

В конечном итоге принятие обоснованного решения о критерии группового риска находится в компетенции органов государственного управления на национальном уровне. В работах [25, 26] в качестве индикативного значения рекомендовано принимать  $A = 5 \cdot 10^{-5}$  для классов СС2 и СС3. Взяв за основу результаты выполненного исследования, можно принять данное значение параметра  $A$  для применения в национальной практике при назначении допустимых мер надежности, основываясь на требованиях социального риска, вычисленного по формуле (7). Анализ зависимостей, показанных на рис. 5, позволяет утверждать,

что при прогнозируемых площадях обрушения до  $80 \text{ м}^2$  требуемая надежность конструктивной системы не превышает уровня, установленного нормами [22], применяемыми при проектировании в постоянных расчетных ситуациях. И только при больших площадях обрушения вероятность отказа следует снижать с целью исключения значительных последствий (т. е. дифференциация уровней надежности).

Безусловно, если руководствоваться экономическими соображениями, предложенные значения константы  $A$  выглядят слишком консервативными.

Анализ показывает, что принятие этого значения ведет к целевым индексам надежности, соответствующим довольно значительным площадям обрушения  $A_{col}$  и примерно равным значениям индексов для классов СС2 и СС3 согласно [22] ( $\beta_{tag} = 3,8$  и  $\beta_{tag} = 4,8$  для  $T_{ref} = 50$  лет соответственно). На практике это означает, что для очень больших площадей обрушения, вызванных отказом отдельных конструктивных элементов, критерий группового риска выбирают таким образом, чтобы не допустить снижения целевых индексов надежности согласно СН 2.01.01 [22].

Необходимо подчеркнуть, что полученные вероятности отказа следует рассматривать скорее как некоторые условные меры надежности, но в первом приближении они вполне пригодны в качестве меры для сравнения различных норм, основанных на единой концепции надежности. В противном случае, получаемые результаты проектирования не могут быть сравнены даже экономически.

Решению отмеченных и других важных задач в рассматриваемой области проектирования безопасных конструктивных систем могло бы способствовать совер-

шенствование организационных механизмов формирования и экспертизы планов разработки новых и актуализации действующих нормативных документов, включая параметрическое нормирование. В настоящее время в России такие планы начинают формироваться со сбора предложений от научных организаций и профильных вузов, обеспечивающих направление «Строительство». Далее на конкурсной основе выбирают организации-исполнители для проведения НИР и последующей подготовки соответствующего нормативного документа.

Представляется, что подготовке и проведению независимой экспертизы такого плана должен предшествовать более глубокий анализ имеющихся нормативных документов по различным направлениям. Цель — определить те направления, которые призваны обеспечить введение в строительную отрасль передовых, экспериментально проверенных и апробированных технологий для решения наиболее актуальных задач отрасли. Это позволило бы исключить планирование разработки второстепенных и мало значимых для отрасли документов, увеличивающихся в геометрической прогрессии. Главное — обеспечить их качественную разработку. При этом по результатам обсуждения среди специалистов целесообразно было бы определиться, в каком виде долж-

ны быть представлены нормативные требования к выполнению проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях:

- отдельные документы, распространяющиеся на железобетонные/металлические/деревянные и другие конструкции;
- общий документ, распространяющийся на все виды конструкций;
- отдельные главы нормативных документов, распространяющихся на проектирование отдельных видов конструкций (как, например, это сделано в [20]).

Кроме того, нелишне принять во внимание, что тенденции в развитии международных нормативных документов, изложенные в *fib Model Code 2020* [26] ориентируют на создание на национальном уровне единого документа по проектированию конструкций из бетона как для нового строительства, так и для оценивания существующих конструкций на остаточный срок службы.

### В ы в о д

Представленный анализ нормативных документов, регламентирующих проектирование конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, свидетельствует о необходимости их дальнейшего совершенствования для конкретизации ряда принципиальных положений [27], включая определение новых понятий, вза-

имную увязку нормативных требований между собой, исключение второстепенных мало значащих и не влияющих на безопасность зданий и сооружений положений. Остаются мало изученными ряд задач, связанных с проблемой безопасности конструктивных систем при особых воздействиях [28, 29]. Недостаточно имеющихся результатов экспериментальной проверки отдельных положений, применяемых и вновь разрабатываемых расчетных моделей живучести сооружений.

При разработке новых, актуализации и совершенствовании действующих нормативных документов, относящихся к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, по-видимому, настало время нормативно установить допустимые меры надежности, базирующиеся на единой концепции, явно выраженные в целевых значениях вероятностей отказа (индексов надежности), которые используют для калибровки частных коэффициентов в моделях сопротивления и воздействий. Для принятия обоснованных решений следует выполнить объективное сравнение расчетных положений действующих и предлагаемых нормативных документов, опираясь на результаты оценки величины рисков, как, например, показано в данной статье.

### С П И С О К И С Т О Ч Н И К О В

1. Колчунов В. И., Федорова Н. В., Савин С. Ю. Динамические эффекты в статически неопределимых физических и конструктивно нелинейных системах. // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42–51. doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.42-51
2. Федорова Н. В., Халина Т. А. Исследование динамических догрузок в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 5. С. 32–36.
3. Гениев Г. А. О динамических эффектах в стержневых системах из физически нелинейных хрупких материалов // Промышленное и гражданское строительство. 1999. № 9. С. 23–24.
4. Колчунов В. И., Клюева Н. В., Андросова Н. Б., Бухтиярова А. С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с.
5. Травуш В. И., Карпенко Н. И., Колчунов В. И. [и др.]. Результаты экспериментальных исследований сложноподвижных балок круглого поперечного сечения из высокопрочного фиброармированного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. № 4. С. 290–297.

6. *Sheffield C., Kersul A., Hoon V., Amini A.* An instrumented full-scale building progressive collapse test [Полномасштабное испытание здания на прогрессирующее обрушение] // Proc. 14<sup>th</sup> Int. Symp. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Seattle, 2011.
7. *Yi W. J., He Q. F., Xiao Y., Kunnath S. K.* Experimental study on progressive collapse resistant behaviour of reinforced concrete frame structures [Экспериментальное исследование устойчивости железобетонных каркасных конструкций к прогрессирующему разрушению] // ACI. 2008. No. 105(4). Pp. 433.
8. *Yang T., Chen W., Han Z.* Experimental investigation of progressive collapse prestressed concrete frames after the loss of middle column [Экспериментальное исследование прогрессирующего обрушения предварительно напряженных железобетонных каркасов после удаления средней колонны] // Advances in Civil Engineering. 2020.
9. *Бухтиярова А. С.* Некоторые результаты исследований живучести пространственных железобетонных рамно-стержневых систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2. С. 243–246.
10. *Колчунов В. И., Осовских Е. В., Алькади С. А.* Деформирование и разрушение железобетонных рамно-стержневых пространственных конструктивных систем многоэтажных зданий в предельных состояниях // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 8. С. 73–77.
11. *Федорова Н. В., Гуок Ф. Д., Егоров Е. А., Григорьев М. И.* Анализ методик экспериментальных исследований живучести железобетонных конструкций // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 6(1054). С. 19–26.
12. *Vu Ngoc Tuen.* Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. Т. 90. № 4. С. 73–84.
13. *Клюева Н. В., Ветрова О. А.* Экспериментально-теоретические исследования живучести эксплуатируемых железобетонных рам при внезапных повреждениях // Бетон и железобетон. 2006. № 6. С. 12–15.
14. *Федорова Н. В., Кореньков П. А.* Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и предельных состояниях // Строительство и реконструкция. 2016. № 6. С. 90–100.
15. *Savin S. Y., Kolchunov V. I., Korenkov P. A.* Experimental research methodology for the deformation of RC frame under instantaneous loss of column [Методика экспериментального исследования деформаций железобетонного каркаса при мгновенном удалении колонны] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. P. 022054.
16. *Кабанцев О. В., Митрович Б.* Моделирование многорежимного механизма отказа железобетонных конструкций при двухосном напряженном состоянии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3. С. 225–231.
17. *Травуш В. И., Колчунов В. И., Клюева Н. В.* Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11.
18. *Колчунов В. И., Федорова Н. В.* Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 1. С. 115–119.
19. ТКП EN 1991-1-7-2009. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия. Минск, 2010. 66 с.
20. СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. Минск, 2007. 69 с.
21. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск, 2020. 224 с.
22. СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. Минск. 2022. 65 с.
23. *Hingonrani R.* Acceptable life safety risks associated with the effects of gas explosions on reinforced concrete structures [Допустимые риски для безопасности жизни, связанные с воздействием взрыва газа на железобетонные конструкции]. Caminos, 2017. 227 p.
24. СН 2.01.04-2019. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки. Минск, 2020. 43 с.
25. *fib Bulletin. 80* Partial factor methods for existing structures [Метод частных коэффициентов при проверках существующих конструкций], 2018. 276 p.
26. *fib Model. Code 2020 for concrete structures* [Модельный код для бетонных конструкций], 2015. 245 p.
27. *Травуш В. И., Шапиро Г. И., Колчунов В. И.* [и др.]. Проектирование защиты крупнопанельных зданий от прогрессирующего обрушения // Жилищное строительство. 2019. № 3. С. 40–46.
28. *Tamrazyan A. G., Fedorov V. S., Kharun M.* The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings [Влияние повышенной деформируемости колонн на устойчивость зданий к прогрессирующему обрушению] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 675. P. 012004.
29. *Кодыш Э. Н.* Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.

## REFERENCES

1. *Kolchunov V. I., Fedorova N. V., Savin S. Yu.* Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear structural systems. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2022, no. 9, pp. 42–51. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.42-51
2. *Fedorova N. V., Khalina T. A.* Study of dynamic

- loadings in reinforced concrete structural system at sudden structural reorganizations. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2017, no. 5, pp. 32–36. (In Russ.).
3. Geniev G. A. On dynamic effects in rod systems made of physically nonlinear brittle materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 1999, no. 9, pp. 23–24. (In Russ.).
  4. Kolchunov V. I., Klyueva N. V., Androsova N. B., Bukhtiyarova A. S. *Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproeknykh vozdeystviyakh* [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow, ASV Publ., 2014. 208 p. (In Russ.).
  5. Travush V. I., Karpenko N. I., Kolchunov V. I. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*, 2020, no. 4, pp. 290–297. (In Russ.).
  6. Sheffield C., Kersul A., Hoon V., Amini A. An instrumented full-scale building progressive collapse test. *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Symp. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures*, Seattle, 2011.
  7. Yi W. J., He Q. F., Xiao Y., Kunnath S. K. Experimental study on progressive collapse resistant behaviour of reinforced concrete frame structures. *ACI*, 2008, no. 105(4), p. 433.
  8. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse prestressed concrete frames after the loss of middle column. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. 2020.
  9. Bukhtiyarova A. S. Some results of studies of the survivability of spatial reinforced concrete frame-rod systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 5-2, pp. 243–246. (In Russ.).
  10. Kolchunov V. I., Osovskikh E. V., Al'kadi S. A. Deformation and destruction of reinforced concrete frame-rod structural systems of multi-storey buildings under beyond-limit conditions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2017, no. 8, pp. 73–77. (In Russ.).
  11. Fedorova N. V., Guok F. D., Egorov E. A., Grigor'ev M. I. Analysis of methods of experimental studies of the survivability of reinforced concrete structures. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*, 2022, no. 6(1054), pp. 19–26. (In Russ.).
  12. Vu Ngok Tuen. Investigation of the survivability of a reinforced concrete structurally nonlinear frame-rod system of a multi-storey building frame in a dynamic formulation. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 73–84. (In Russ.).
  13. Klyueva N. V., Vetrova O. A. Experimental and theoretical studies of the survivability of operated reinforced concrete frames in case of sudden damage. *Beton i zhelezobeton*, 2006, no. 6, pp. 12–15. (In Russ.).
  14. Fedorova N. V., Koren'kov P. A. Static-dynamic deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings in extreme and beyond conditions. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2016, no. 6, pp. 90–100. (In Russ.).
  15. Savin S. Y., Kolchunov V. I., Koren'kov P. A. Experimental research methodology for the deformation of RC frame under instantaneous loss of column. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 962, p. 022054.
  16. Kabantsev O. V., Mitrovich B. Modeling of a multi-mode mechanism of failure of reinforced concrete structures in a biaxial stressed state. *Izvestiya vysshlykh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2017, no. 3, pp. 225–231. (In Russ.).
  17. Travush V. I., Kolchunov V. I., Klyueva N. V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 3, pp. 4–11. (In Russ.).
  18. Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Some problems of survivability of reinforced concrete structural systems during emergency impacts. *Vestnik NITs "Stroitel'stvo"*, 2018, no. 1, pp. 115–119. (In Russ.).
  19. TKP EN 1991-1-7-2009. Evrokod 1. *Vozdeystviya na konstruksii. Chast' 1-7. Obshchie vozdeystviya. Oso-bye vozdeystviya* [Eurocode 1. Impacts on structures. Part 1-7. General impacts. Special impacts] Minsk, 2010. 66 p.
  20. STB ISO 2394-2007. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy. Obshchie printsipy* [Reliability of building structures. General principles.] Minsk, 2007. 69 p.
  21. SP 5.03.01-2020. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii* [Concrete and reinforced concrete structures]. Minsk, 2020. 224 p.
  22. SN 2.01.01-2022. *Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstruksiy* [Fundamentals of design of building structures] Minsk, 2022. 65 p.
  23. Hingonrani R. *Acceptable life safety risks associated with the effects of gas explosions on reinforced concrete structures*. Caminos, 2017. 227 p.
  24. SN 2.01.04-2019. *Vozdeystviya na konstruksii. Obshchie vozdeystviya. Snegovye nagruzki* [Impacts on structures. General impacts]. Minsk, 2020. 43 p.
  25. fib Bulletin. *80 Partial factor methods for existing structures*, 2018. 276 p.
  26. fib Model. *Code 2020 for concrete structures*, 2015. 245 p.
  27. Travush V. I., Shapiro G. I., Kolchunov V. I. et al. Design of protection of large-panel buildings against progressive collapse. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2019, no. 3, pp. 40–46. (In Russ.).
  28. Tamrazyan A. G., Fedorov V. S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 675, p. 012004.
  29. Kodysh E. N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 10, pp. 95–101. (In Russ.). ■