

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 142–151.

Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 142–151.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 692:699.8

DOI: 10.22337/2077-9038-2025-1-142-151

Повышение надежности многоэтажных железобетонных каркасных зданий

Келасьев Николай Геннадьевич (Москва). Кандидат технических наук, советник РААСН. Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (Россия, 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2. ЦНИИПромзданий). Эл. почта: kelasyev@mail.ru

Трёкин Николай Николаевич (Москва). Доктор технических наук, профессор, почётный член РААСН. Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (Россия, 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2. ЦНИИПромзданий); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: nik-trekin@yandex.ru

Кодыш Эмиль Наумович (Москва). Доктор технических наук, профессор, почётный член РААСН (Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (Россия, 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2. ЦНИИПромзданий). Эл. почта: otk@yandex.ru

Щедрин Олег Сергеевич (Москва). Кандидат технических наук. Главное управление государственной экспертизы (Россия, 119049, Москва, ул. Большая Якиманка, 42, стр. 1-2. Главгосэкспертиза). Эл. почта: oshedrin@mail.ru

Аннотация. В статье описана разработанная на основании численных экспериментов методика определения показателя ответственности колонн на основе объёмов разрушения и коэффициентов догружения.

Предложено пять уровней ответственности несущих конструкций, в частности, для колонн каркасного здания, и предложены коэффициенты надёжности по ответственности от $\gamma_{нк} = 1,1$ до $\gamma_{нк} = 0,9$. За основу расчётных моделей были взяты результаты пространственных расчётов многоэтажного каркаса при поочерёдном исключении колонн из расчётных схем, выделено пять зон состояния конструкций перекрытия: от полного разрушения перекрытия с обрывом арматуры, нарушением анкеровки и падением части конструкции до пятой зоны, в которой условия эксплуатации практически не нарушены. В итоге использования коэффициентов надёжности по ответственности несущих элементов в рассматриваемом примере получена экономия материалов до 2%.

Ключевые слова: коэффициент надёжности по ответственности, объём разрушения, коэффициент догружения

Для цитирования. Келасьев Н.Г., Трёкин Н.Н., Кодыш Э.Н., Щедрин О.С. Повышение надёжности многоэтажных железобетонных каркасных зданий // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 1. – С. 142–151. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-1-142-151.

Improving the Reliability of Multi-Storey Reinforced Concrete Frame Buildings

Kelas'ev Nikolai G. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology, Advisor of RAACS. Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures (46, building 2, Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127238, Russia. TsNIIPromzdaniy). E-mail: kelasyev@mail.ru

Trekin Nikolai N. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Honorary member of RAACS. Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures (46, building 2, Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127238, Russia. TsNIIPromzdaniy); National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: nik-trekin@yandex.ru

© Келасьев Н.Г., Трёкин Н.Н., Кодыш Э.Н., Щедрин О.С., 2025.

Kodysh Emil' N. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Honorary member of RAACS. Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures (46, building 2, Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127238, Russia. TsNIIPromzdaniy). E-mail: otk@yandex.ru

Shchedrin Oleg S. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. Main Department of State Expertise (42, build. 1-2 Bolshaya Yakimanka str, Moscow, 119049, Russia. Glavgosepertiza). E-mail: oshedrin@mail.ru

Abstract. The article describes a method for determining the responsibility indicator for the columns based on the volumes of destruction and additional loading factors, developed on the basis of numerical experiments. Five levels of responsibility of load-bearing structures are proposed, in particular for the columns of frame building, and reliability factor depending on the responsibility from $\gamma_{nk} = 1.1$ to $\gamma_{nk} = 0.9$ are proposed. The results of spatial calculations of a multistorey frame with the alternate exclusion of columns from the calculation schemes were used as the basis for the calculation models; five zones of the state of the floor structures are identified from the complete destruction of the floor with a break in reinforcement, violation of anchorage and the fall of part of the structure to the fifth zone in which the operating conditions are practically not violated. As a result, the use of reliability factors depending on the responsibility of load-bearing elements in the example under consideration resulted in material savings of up to 2%.

Keywords: reliability factor depending on the responsibility, volume of destruction, additional loading coefficient

For citation. Kelas'ev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Shchedrin O.S. Improving the Reliability of Multi-Storey Reinforced Concrete Frame Buildings. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 1, pp. 142–151, doi: 10.22337/2077-9038-2025-1-142-151.

Среди требований, предъявляемых к объектам капитального строительства, можно выделить два равнозначных основных – это функциональное соответствие и механическая безопасность [1–3].

Система нормативных документов, действующих в строительном комплексе, призвана обеспечить выполнение требований проектной долговечности зданий в условиях нормальной эксплуатации [4], включающей текущие, планово-предупредительные и капитальные ремонты. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»¹ и ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения»² содержат требования по обеспечению безопасной эксплуатации зданий на всех этапах жизненного цикла [5; 6].

В настоящее время всё чаще требуется учитывать при проектировании нестандартные условия эксплуатации – аварийные воздействия или ситуации. Вероятность возникновения этих ситуаций мала [7], по сравнению с работой конструкций под нормируемыми нагрузками и воздействиями, однако последствия их реализации могут быть разрушительными [8; 9].

Их причинами могут быть: несоблюдение технологии строительных работ или эксплуатации, аварии оборудования, климатические воздействия, террористические акты и т.п.

По опубликованным данным МЧС за шесть лет (2014–2019) в результате чрезвычайных ситуаций погибло (пострадало) 72 чел., а материальный ущерб составил 3043 млн руб.

С целью минимизации потерь в ГОСТ 27751 в разделе 10 для зданий приведены коэффициенты надёжности по ответственности, меняющиеся от 0,9 до 1,1, а в особых случаях – до 1,2. Эти коэффициенты устанавливаются генеральным проектировщиком по согласованию с заказчиком, они должны быть не ниже занормированных и зависят, в первую очередь, от возможных социальных и экономических негативных последствий выхода из строя этих зданий.

Анализ классификации зданий по уровню ответственности [10] показал имеющиеся разночтения этого показателя для зданий в ряде нормативных документов нашей страны (табл. 1).

В этом же ГОСТе приведены разъяснения и таблицы, позволяющие уточнить необходимость и величину коэффициентов надёжности по ответственности [11], на которые следует умножать эффекты воздействий (нагрузочные эффекты).

В ГОСТе также предусмотрена возможность устанавливать различные коэффициенты надёжности по ответственности для отдельных несущих конструктивных элементов здания. Однако какие-либо рекомендации по назначению этих коэффициентов отсутствуют.

Очевидно, что надёжность элементов целесообразно дифференцировать. Так, колонны многоэтажных зданий на первом и последнем этажах должны обладать разной надёжностью, потому что последствия от разрушения колонны нижнего этажа несопоставимы с последствиями от разрушения колонны верхнего.

Целесообразно рассмотреть и другие конструкции зданий, так как введение дифференцированного уровня надёжности по ответственности элементов повышает надёжность здания и снижает уровень риска [12; 13].

¹ <http://www.kremlin.ru/acts/bank/30476>

² <https://vsegost.com/Catalog/58/58469.shtml>

В работе О.С. Щедрина «Дифференцированный уровень ответственности железобетонных конструкций многоэтажных каркасных зданий», выполненной под руководством Н.Н. Трёкина и при консультационном участии Н.Г. Келасьева и Э.Н.

Кодыша, разработана методика позволяющая осуществлять такой подход при проектировании [14].

Отработка методики проводилась на примере 12-этажного монолитного железобетонного каркасного здания с сеткой колонн 6×6 м.

Таблица 1

№№	Нормативный документ, краткие требования
1	<p>СП 132.13330.2011 «Обеспечение антитеррористической защищённости зданий и сооружений» (https://docs.cntd.ru/document/1200086072)</p> <p>В зависимости от вида и размеров ущерба, который может быть нанесён объекту, находящимся на объекте людям и имуществу в случае реализации террористических угроз, все объекты подразделяются на три класса: Класс 1 – высокая значимость; Класс 2 – средняя значимость; Класс 3 – низкая значимость.</p> <p>Учитываются следующие виды ущерба: государственно-политический, социальный, финансово-экономический; экологический</p>
2	<p>ГОСТ 34332.1-2017 «Безопасность функциональная систем, связанных с безопасностью зданий и сооружений. Часть 1. Основные положения» (https://vsegost.com/Catalog/47/47939.shtml)</p> <p>Предусматривается 7 категорий тяжести последствий в зависимости от числа людей, получивших вред здоровью или погибших. Для каждой категории приведён соответствующий вероятный ущерб в денежном выражении (в млн рублей)</p>
3	<p>Федеральный закон от 25.06.2002 №73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» (http://www.kremlin.ru/acts/bank/18230)</p> <p>Предусматривается три категории объектов историко-культурного значения:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) объекты культурного наследия федерального значения; 2) объекты культурного наследия регионального значения; 3) объекты культурного наследия местного (муниципального) значения
4	<p>Постановление Правительства от 21 мая 2007 года № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (http://government.ru/docs/all/59949/)</p> <p>Чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера в зависимости от территории распространения, а также от количества людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью и размера материального ущерба, подразделяются на:</p> <ol style="list-style-type: none"> а) чрезвычайную ситуацию локального характера (не более 10 чел., не более 240 тыс. руб.), б) чрезвычайную ситуацию муниципального характера (не более 50 чел., не более 12 млн рублей); в) чрезвычайную ситуацию межмуниципального характера (не более 50 чел., не более 12 млн руб.); г) чрезвычайную ситуацию регионального характера (50–500 чел., 12 млн рублей–1,2 млрд руб.) д) чрезвычайную ситуацию межрегионального характера (50–500 чел., 12 млн–1,2 млрд руб.); е) чрезвычайную ситуацию федерального характера (свыше 500 чел., свыше 1,2 млрд руб.)
5	<p>Постановление Правительства от 14 августа 2020 года №1226 «Об утверждении Правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к потенциально опасным объектам» (http://government.ru/docs/all/129424/)</p> <p>Дано определение потенциально опасного объекта (ПОО). ПОО подразделяются на 6 категорий. Категория устанавливается в зависимости от того, к какой чрезвычайной ситуации может привести авария на данном объекте</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) ПОО 1 категории опасности (особо высокий уровень опасности); 2) ПОО 2 категории опасности (чрезвычайно высокий уровень опасности); 3) ПОО 3 категории опасности (высокий уровень опасности); 4) ПОО 4 категории опасности (повышенный уровень опасности); 5) ПОО 5 категории опасности (средний уровень опасности); 6) ПОО 6 категории опасности (низкий уровень опасности)
6	<p>Постановление Правительства от 14 августа 2020 года № 1225 «Об утверждении Правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к критически важным объектам» (http://government.ru/docs/all/129416/)</p> <p>Дано определение критически важного объекта (КВО). КВО подразделяются на:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) КВО федерального уровня значимости; 2) КВО регионального уровня значимости; 3) КВО муниципального уровня значимости

Колонны были приняты сечением 40×40 см и заармированы арматурой А500с. В расчётах поочередно удалялась одна из колонн и определялась площадь запредельного состояния перекрытия (условное обрушение). В процессе исследования было выполнено и проанализировано 144 варианта расчётных ситуаций.

Вначале было посчитано здание в стадии эксплуатации, а затем были выполнены две серии расчётов – в линейной и нелинейной постановке в аварийной ситуации в соответствии с рекомендациями СП 385.1325800 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»³ и с учётом критериев особого предельного состояния.

Кроме площади перекрытия, находящегося в запредельном состоянии, был выявлен эффект перераспределения усилий в вертикальных элементах после гипотетического поочередного удаления колонн.

В результате выполнения расчётов был определён критерий объёма условного обрушения K_{sijf}^R , равный отношению площади обрушения (S_{ijf}^R) к суммарной грузовой площади над удаляемой колонной (S_{ijf}^G). Отказ колонны производился на 1, 5, 10 и 12 этажах.

$$K_{sijf}^R = \frac{S_{ijf}^R}{S_{ijf}^G}$$

Также был установлен коэффициент значимости по догрузке колонн соседних с удаляемой колонной.

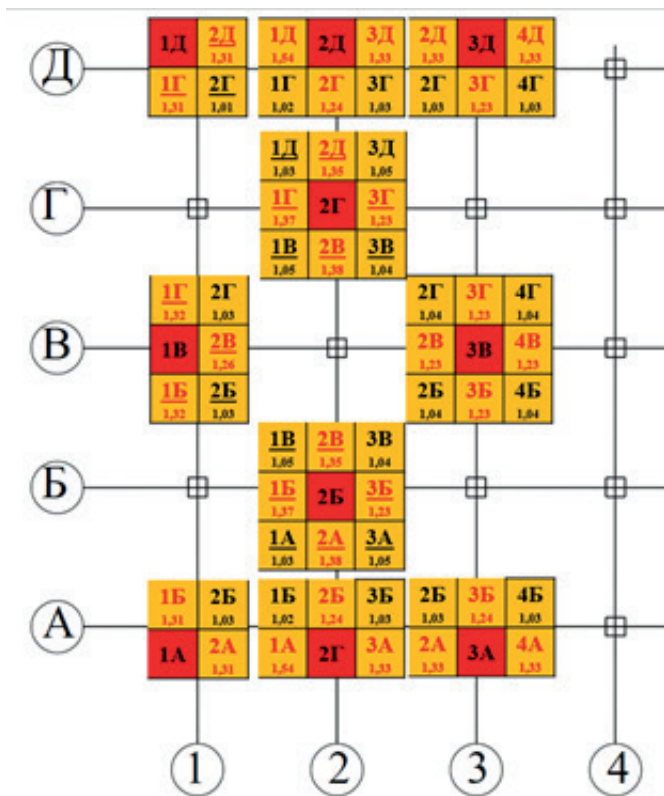


Рис. 1. Распределение коэффициентов догрузки смежных колонн. Схема авторов статьи

$$K_{ijf}^d = \frac{N_{ijf}^R}{N_{ijf}}$$

где N_{ijf}^R – усилие в колонне соседней с удалённой; N_{ijf} – усилие в той же колонне от эксплуатационных нагрузок. В представленных выражениях принята следующая индексация – колонна расположена на пересечении осей i и j на этаже f (рис. 1).

Проведённое исследование показало, что максимальный уровень ответственности имеют угловая и соседняя с ней колонны по осям А1, Б1, А2, а также колонна Б2.

Для установления коэффициентов надёжности по ответственности необходимо определиться с градацией несущих элементов по уровню ответственности. Численные исследования показали, что значения усреднённых коэффициентов значимости не превышают 1,5. Учитывая значительный разрыв между максимальным и минимальным значениями показателей уровня ответственности, целесообразно принять более мелкую градацию коэффициентов надёжности по ответственности несущих элементов, не выходя за пределы ГОСТ 27751, в котором установлены три категории коэффициентов надёжности по ответственности.

Предложено ввести пять уровней ответственности отдельных несущих конструкций с соответствующими коэффициентами по ответственности γ_n на основе значений коэффициентов значимости K_3

- 1) отказ может привести к лавинообразному обрушению всего здания – $\gamma_n = 1,1$ ($K_3 = 1,38-1,5$);
- 2) отказ может привести к обрушению части здания – $\gamma_n = 1,05$ ($K_3 = 1,30-1,38$);
- 3) отказ может привести к обрушению элементов смежных конструкций – $\gamma_n = 1,0$ ($K_3 = 1,20-1,30$);
- 4) отказ приведёт к нарушению условий нормальной эксплуатации – $\gamma_n = 0,95$ ($K_3 = 0,95-1,20$);
- 5) отказ не нарушит условий нормальной эксплуатации – $\gamma_n = 0,9$ ($K_3 < 0,95$).

Зоны возможных обрушений перекрытий или условий нормальной эксплуатации определяются на основе численных исследований, позволяющих уточнить зону полного обрушения на этаже над удаляемым элементом с постепенным уменьшением объёма повреждений на вышележащих этажах.

Расчёт производится по формулам, приведённым в действующем своде правил [3], схема обрушения приведена на рисунке 2.

Для рассматриваемого каркасного здания с плоскими безригельными перекрытиями и покрытием наиболее ответственными конструктивными элементами являются несущие колонны, воспринимающие нагрузки от перекрытий и покрытия, менее ответственными являются сами перекрытия и покрытие. Действительно, выход из строя (отказ) участка перекрытия или покрытия полностью или частично может

³ <https://docs.cntd.ru/document/551394640>

привести к разрушению только смежных участков перекрытия (покрытия) преимущественно в пределах одного этажа.

Разрушение (отказ) колонны может приводить к разрушению других конструкций – перекрытий и покрытия, расположенных в смежных пролётах и в некоторых случаях может приводить к разрушению смежных колонн по причине их значительного догружения.

Поскольку за основу определения уровня ответственности конструкций приняты показатели объёмов разрушений, вызванные их отказом, целесообразно рассмотреть закономерности распределения зон разрушений несущей каркасной системы. Характерным является то, что объём обрушений снижается по высоте здания. Этот процесс по своей природе закономерен, поскольку всё большее число элементов несущей системы включается в пространственную работу, а суммарные нагрузочные факторы (в данном случае собственный вес) снижаются.

Доминирующей нагрузкой на конструкции при аварийной расчётной ситуации является собственный вес строительных конструкций, собранный со всей грузовой площади удалённой колонны. Основными элементами, оказывающими сопротивление обрушению конструкций, являются колонны и междуэтажные перекрытия. Включение в работу стенового ограждения по причине отсутствия специальных креплений при аварийных ситуациях не рассматривалась.

Очевидно, что отказ угловой колонны приведёт к изменению напряжённо-деформированного состояния угловой ячейки максимально по высоте до верха выбранного типа здания. В рассматриваемом примере отказ угловой колонны вызовет в перекрытиях верхнего этажа допустимые повреждения, не влияющие на условия эксплуатации.

Отказ колонн первого этажа принят за основу, поскольку качественная картина распределения объёмов и характера обрушений по высоте показывает явный характер максимальных разрушений на первом этаже и затухания степени обрушений по высоте. За основу были приняты схемы деформирования и обрушения участков перекрытий с учётом данных численных исследований (рис. 2).

В связи с этим целесообразно разделить здание по высоте на несколько характерных зон [15].

Первая зона – схема обрушений перекрытий нижних этажей характеризуется обрывом рабочей и конструктивной арматуры, нарушением сцепления арматуры с бетоном, падением части перекрытий. Здесь и далее внешний изгибающий момент и вертикальная нагрузка приняты на 1 пог. м линии излома перекрытия и размеры расчётных сечений также приняты на погонный метр.

Условия, при которых проявляется указанная схема разрушения, имеют вид:

$$\begin{cases} M_{xz,f(yz,f)} \geq [M_{b,ult}]; Q_{z,f} \geq [Q_{b,sh}]; N_{xy,f}^{cs} \geq [N_{s,ult}^{(u)}]; \\ M_{xz,f(yz,f)} \geq [M_{s,ult}^{(u)}]; N_{xy,f}^{cs} \geq [N_{s,an}^{(u)}], \end{cases}$$

где $M_{xz,f(yz,f)}$ – максимальный погонный изгибающий момент от суммарного вертикального усилия, действующего на рассматриваемом уровне по вертикали (на этаже f) в плане по контуру линии разрушения перекрытия вследствие отказа колонны первого этажа; $[M_{b,ult}$ и $M_{s,ult}^{(u)}]$ – предельный изгибающий момент по бетону и растянутой арматуре (с учётом временного сопротивления) соответственно, воспринимаемый погонным метром нормального сечения перекрытия по контуру разрушения; $Q_{z,f}$ – нагрузка по оси Z , действующая по линии излома на рассматриваемом участке перекрытия; $[Q_{b,sh}]$ – предельная поперечная сила, воспринимаемая бетоном перекрытия по линии излома; $N_{xy,f}^{cs}$ – максимальное погонное усилие по контуру разрушения, действующее в плоскости перекрытия, возникающее вследствие изменения расчётной схемы при отказе колонны первого этажа по рассматриваемой оси; $[N_{s,ult}^{(u)}$ и $N_{s,an}^{(u)}]$ – предельное погонное усилие, воспринимаемое продольной арматурой перекрытия, с учётом временного сопротивления до разрыва и по критерию анкеровки в бетоне.

Внешний изгибающий момент $M_{xz,f(yz,f)}$ определяется из статического расчёта по вторичной расчётной схеме после удаления рассматриваемой колонны. Допускается изгибающий момент $M_{xz,f(yz,f)}$ определять по приближённой схеме

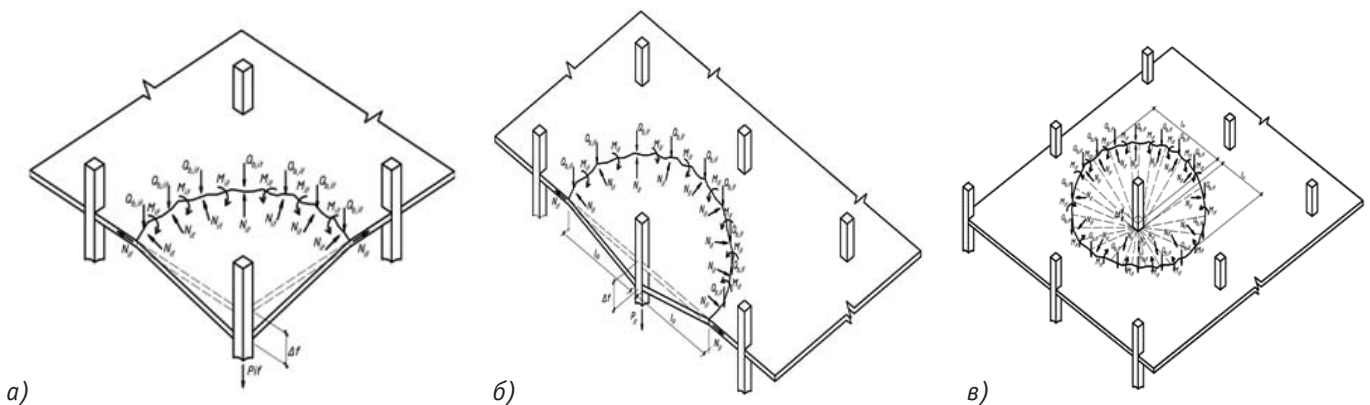


Рис. 2. Схемы деформирования и обрушения монолитного перекрытия при отказе угловой (а), крайней (б) и средней (в) колонн. Рисунок авторов статьи

в виде сосредоточенной нагрузки, приложенной к плите с защемлёнными опорами. Величина нагрузки принимается из эпюры продольных сил, определённых по рекомендациям СП 385.1325800.2018 для рассматриваемой колонны.

Вертикальное усилие, распределённое по линии излома $Q_{z,f}$, определится из пространственного расчёта в соответствии с принятой схемой разрушения перекрытия.

Максимальное погонное усилие по контуру разрушения $N_{xy,f}^{cs}$, действующее в плоскости перекрытия, возникает в результате больших перемещений участков перекрытий над удаляемой колонной, провисших на заанкеренной арматуре (вантовая система).

Вторая зона – схема обрушений перекрытий на вышерасположенных этажах, соответствующая особому предельному состоянию, когда отсутствуют обрывы рабочей арматуры и нарушения сцеплений арматуры с бетоном. Таким образом большая часть разрушенного участка перекрытий зависит на арматуре определённое время при значительных прогибах ($f > l/30$).

Условия, при которых проявляется указанная схема разрушения, имеют вид:

$$\begin{cases} M_{xz,f(yz,f)} \gg [M_{b,ult}]; Q_{z,f} \gg [Q_{b,sh}]; N_{xy,f}^{cs} \leq [N_{s,ult}^{(b)}]; \\ M_{xz,f(yz,f)} \gg [M_{s,ult}^{(b)}]; N_{xy,f}^{cs} \leq [N_{s,ult}^{(b)}]. \end{cases}$$

здесь приняты те же обозначения, что и в формулах первой зоны.

Третья зона характеризуется состоянием перекрытий в предельном равновесии, когда внутренние усилия, возникающие в сечениях по линиям перелома перекрытий с учётом нормативных значений, в частности, изгибающие моменты, уравновешивают внешние воздействия, возникающие при отказе колонны первого этажа. Это состояние записывается в виде:

$$\begin{cases} M_{xz,f(yz,f)} \leq [M_{b,ult}]; Q_{z,f} \leq [Q_{b,sh}]; \\ M_{xz,f(yz,f)} \leq [M_{s,ult}]; \end{cases}$$

Четвёртая зона характеризуется состоянием участков перекрытий с нарушением условий нормальной эксплуатации. Основными критериями для их оценки являются прогибы и ширина раскрытия трещин. Это состояние записывается в виде:

$$\begin{cases} M_{xz,f(yz,f)} \leq [M_{b,ult}]; \\ M_{xz,f(yz,f)} \leq [M_{s,ult}]; a_{cr,c} \gg [a_{cr,c}]; f_f \geq [f_{ult}]. \end{cases}$$

Пятая зона – это состояние участков перекрытий, соответствующее требованиям нормальной эксплуатации, в основном, относящимся ко второй группе предельных состояний, при безусловном выполнении требований по несущей способности. Эти требования можно записать в виде:

$$\begin{cases} M_{xz(yz)} \leq [M_{b,ult}]; \\ M_{xz(yz)} \leq [M_{s,ult}]; M_{xz(yz)} \leq [M_{cr,c}]; f \leq [f_{ult}]. \end{cases}$$

Развитие разрушений для каждой зоны выполнялось с учётом следующих постулатов:

- рост внешних усилий при отказе колонны по рассматриваемой оси вызывает последовательное образование трещин в плитах перекрытия, их чрезмерное раскрытие и достижение предельных значений по изгибающему моменту;

- изгибающий момент превышает несущую способность плиты перекрытия что приводит к раздроблению бетона сжатой зоны и достижению в растянутой арматуре предела текучести;

- существенное превышение внешней нагрузки по отношению к несущей способности сечений перекрытий (на 30% и более) приводит к нарушению сцепления рабочей и конструктивной арматуры с бетоном, изменению схемы работы. При достаточной анкеровке рабочей арматуры для угловой колонны часть перекрытия по линии излома зависит, а для средних участков перекрытий возможен переход в вантовую систему.

Рассмотрим характерные признаки напряжённо-деформированного состояния перекрытий при отказе колонны первого этажа на примере уже приведённого в настоящей работе многоэтажного каркаса из монолитного железобетона. Каждому уровню соответствуют определённые критерии. Наиболее сложным является первый уровень, поскольку описание механизмов обрушения перекрытий в технической литературе до настоящего времени не представлено. В данной схеме основным критерием является разрушение бетона и/или обрыв арматуры.

Условия, при котором разрушается бетон сжатой зоны от изгиба и среза от вертикальных нагрузок, записываются неравенствами.

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением плиты перекрытия соответственно по бетону, определяется соотношением%

$$M_{b,ult} = \xi_R h_0 b z_b R_{b,ser} \approx 0,8 \xi_R h_0^2 b R_{b,ser},$$

где b – принятая ширина плиты; ξ_R – граничная относительная высота сжатой зоны; z_b – плечо внутренней пары сил; $R_{b,ser}$ – нормативное сопротивление бетона сжатию.

Предельный изгибающий момент по арматуре запишется:

$$M_{s,ult} = \sigma_B \sum A_s z_b \approx 0,8 h_0 \sigma_B \sum A_s,$$

где σ_B – временное сопротивление арматуры разрыву.

Несущая способность сечения плит перекрытия по поперечной силе определится сопротивлением только бетона на срез по выражению:

$$Q_{z,f} = 0,5 R_{bt,ser} b h_0.$$

За второй критерий принят обрыв рабочей арматуры либо вырыв её из бетона от возникающих усилий при зависании или при работе по вантовой схеме.

Условие обрыва арматуры записывается для погонного метра линии излома в виде:

$$N_{xy,f} \gg \sigma_B \sum A_s$$

Проверку анкеровки арматурных стержней производим по выражению:

$$N_{xy,f} \gg R_{s,ser} \sum A_s \frac{l_s}{l_{an}}$$

где l_{an} – расчётная длина анкеровки; l_s – расстояние от конца анкеруемого стержня до рассматриваемого поперечного сечения.

Вторая зона характеризуется незначительным превышением действующих усилий в несущей системе (до 30%), вызванных отказом колонны первого этажа, по отношению к расчётной несущей способности перекрытия. Это состояние конструкций может быть ограничено критериями особого предельного состояния, некоторые параметры которого даны в СП 385.1325800.2018. В данном случае усилия, возникающие при изменении расчётных схем, не в состоянии вызвать обрыв рабочей арматуры. Однако нарушение анкеровки вполне возможно.

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением плиты перекрытия соответственно по бетону либо по арматуре, запишется в виде:

$$M_{b,ult} \approx 0,8 \xi_R h_0^2 b R_{b,ser}$$

$$M_{s,ult} \approx 0,8 h_0 R_{s,ser} \sum A_s$$

Выражение для оценки прочности сечений перекрытий по поперечной силе и достаточной анкеровке арматуры будет аналогично принятым для первой зоны.

Третья зона соответствует предельному состоянию сечений перекрытий, работающих на изгиб по изменённой схеме, вызванной отказом колонны первого этажа. Условие превышения предельного состояния при изгибе по нормальным сечениям перекрытий запишется в виде:

$$M \geq R_b b \xi_R h_0 z_b + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

$$M \geq R_s A_s z_b;$$

$$M \geq M_{cr} = R_{bt,ser} W_{pl};$$

$$a_{cr} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s \gg [a_{cr}];$$

где a_{cr} – ширина раскрытия трещин; φ_1 – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки; φ_2 – коэффициент, учитывающий профиль арматуры; φ_3 – коэффициент, зависящий от вида НДС; ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; W_{pl} – упругопластический момент сопротивления сечения перекрытия единичной длины.

Критериями четвёртой зоны напряжённого состояния перекрытий являются показатели нормальных условий эксплуатации – ширина раскрытия нормальных трещин и величина максимального прогиба перекрытия. Неравенства, свидетельствующие о напряжённо-деформированном со-

стоянии перекрытия, соответствующие четвёртому уровню, можно представить в виде:

$$M \leq R_b b \xi_R h_0 z_b + R_{sc} A'_s (h_0 - a');$$

$$M \leq R_s A_s z_b;$$

$$a_{cr} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s \gg [a_{cr}];$$

$$f \gg [f_{ult}].$$

В пятой зоне напряжённо-деформированное состояние перекрытия должно удовлетворять требованиям первой и второй групп предельных состояний: прочность сечений обеспечена; требования по нормальной эксплуатации выполнены, то есть прогибы и ширина раскрытия трещин не превышают предельно допустимых:

$$M \leq R_b b \xi_R h_0 z_b + R_{sc} A'_s (h_0 - a');$$

$$M \leq R_s A_s z_b;$$

$$a_{cr} \leq [a_{cr}];$$

$$f \leq [f_{ult}].$$

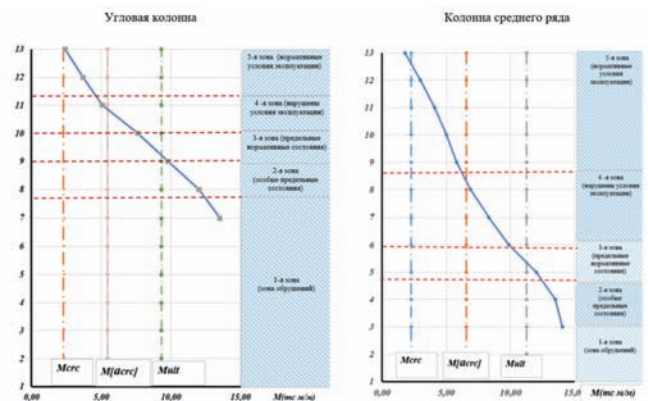


Рис. 3. Состояние перекрытий по этажам при отказе угловой и средней колонн первого этажа. Графики выполнены авторами статьи

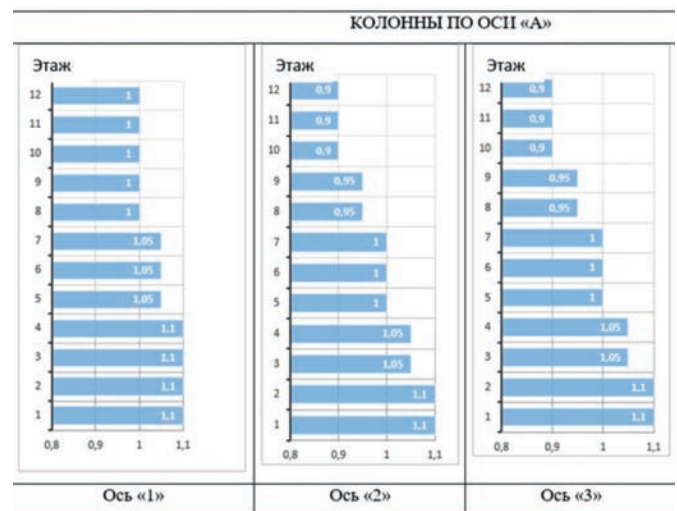


Рис. 4. Распределение коэффициентов надёжности по ответственности для колонн по оси А. Графики выполнены авторами статьи

Границы представленных зон по вертикали меняются и зависят от расположения колонны в плане. На рисунке 3 показаны графики состояний перекрытий определяющие возможность эксплуатации в зависимости от погонного изгибающего момента в сечениях перекрытий по линии излома для угловой и средней колонн первого этажа.

Анализ уровней ответственности колонн приведён для конструкций первого этажа. Изменение ответственности несущих элементов по высоте является важным показателем с точки зрения закономерностей их изменения.

Предлагается следующее распределение коэффициентов надёжности по ответственности несущих вертикальных элементов по высоте многоэтажного каркасного здания [16] в соответствии с графиками, представленными на рисунке 4 при условии сохранения границ их нормирования в пределах $\gamma_{nk} = 0,9-1,1$:

- элементы первого уровня ответственности находятся в зоне возможных лавинообразных обрушений: $\gamma_{nk} = 1,1$;
- элементы второго уровня ответственности находятся в зоне возможных частичных разрушений (особое предельное состояние): $\gamma_{nk} = 1,05$;
- элементы третьего уровня ответственности находятся в зоне нормируемых предельных состояний: $\gamma_{nk} = 1,0$;
- элементы четвёртого уровня находятся в зоне с нарушением условий эксплуатации (несущая способность не нарушена): $\gamma_{nk} = 0,95$;
- элементы пятого уровня ответственности находятся в зоне без нарушений условий эксплуатации: $\gamma_{nk} = 0,9$.

В качестве примера на рисунке 4 для рассматриваемого каркасного здания распределение коэффициентов надёжности по ответственности для колонн с учётом симметрии здания показано для колонн по оси А. Усреднённое значение коэффициентов надёжности по ответственности колонн составила 0,98. Таким образом, возможный экономический эффект от использования коэффициентов надёжности несущих конструкций по ответственности может составить 2%.

Выводы

1. Для повышения механической безопасности и рационального распределения материалов в многоэтажных каркасных зданиях наряду с коэффициентом надёжности по ответственности для здания в целом, целесообразно внедрить классификацию вертикальных несущих элементов по уровню ответственности.

2. Численные исследования на примере многоэтажного каркасного здания из монолитного бетона показали, что основным критерием для определения уровня ответственности колонн является объём разрушений, выраженный через площади перекрытий, находящихся в запредельном состоянии, вызванный отказом рассматриваемой колонны.

3. Вторым показателем уровня ответственности колонн является степень перераспределения усилий на сопрягаемые несущие элементы, вызванного отказом рассматриваемой

колонны. Расчёты показали, что величина догружения колонн может превысить их несущую способность и привести к отказу соседней колонны.

4. Проверку показателей уровня ответственности колонн рекомендуется также осуществлять на основе моделирования вероятностной задачи отказа с использованием критерия равного риска.

5. Для назначения коэффициентов надёжности по ответственности в зависимости от расположения колонны в несущей системе многоэтажного каркасного здания разработана методика, основанная на определении показателей уровня ответственности и вида напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций, включая стадию разрушения.

6. Предложена градация коэффициентов надёжности по ответственности колонн в зависимости от их расположения в плане и по высоте здания, состоящая из пяти уровней – от величины равной 1,1 для наиболее ответственных колонн и до 0,9 с шагом через 0,5.

Список источников

1. Безопасность России. Безопасность строительного комплекса / Н.А. Махутов, О.И. Лобов, К.И. Ерёмин [и др.]. – Москва : Знание, 2012. – 798 с. – Текст : непосредственный.
2. Бондаренко, В.М. Ещё раз о конструктивной безопасности и живучести зданий / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева. – Текст : непосредственный // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2007. – № 11. – С. 81–86.
3. Залесов, А.С. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А.С. Залесов, Э.Н. Кодыш, Л.Л. Лемыш, И.К. Никитин. – Москва : Стройиздат, 1988. – 320 с. – Текст : непосредственный.
4. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва : Стройиздат, 1996. – 416 с. – Текст : непосредственный.
5. Травуш, В.И. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, Е.В. Леонтьев. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 2. – С. 46–54.
6. Введение в проектирование технически сложных зданий и сооружений / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трёкин, Н.Г. Келасьев, И.А. Терехов. – Москва : АСВ, 2022. – 294 с. – ISBN 978-5-4323-0439-1// – Текст : непосредственный.
7. Мкртычев, О.В. Теория надёжности в проектировании строительных конструкций : Монография / О.В. Мкртычев, В.Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2016. – 908 с. – Текст : непосредственный.
8. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова – Москва : АСВ, 2014. – 208 с.
9. Тамразян, А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении / А.Г. Тамразян. – Текст

: непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 22–28.

10. Келасьев, Н.Г. Унификация требований нормативно-правовых актов по обеспечению безопасности зданий и сооружений / Н.Г. Келасьев, Н.Н. Трёкин, Э.Н. Кодыш, Е.В. Леонтьев, О.С. Щедрин. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 5. – С. 4–16.

11. Складнев, Н.Н. О методике определения коэффициента надёжности по назначению / Н.Н. Складнев, А.А. Федяев. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1987. – № 2. – С. 3–6.

12. Кодыш, Э.Н. Обеспечение устойчивости сборных железобетонных связевых каркасных зданий от прогрессирующего обрушения / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трёкин. – Текст : электронный // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сайт. – URL: <https://prevdis.ru/obespechenie-ustojchivosti-sbornyh-zhelezobetonnyh-svyazevyh-karkasnyh-zdaniy-ot-progressiruyushhego-obrusheniya/> (дата обращения 05.02.2025).

13. Леонтьев, Е.В. Обоснование конструктивных решений / Е.В. Леонтьев, О.С. Щедрин. – Текст : непосредственный // Вестник государственной экспертизы. – 2017. – № 03 (4). – С. 88–95.

14. Щедрин, О.С. Определение уровня ответственности конструкций монолитного многоэтажного каркасного здания / О.С. Щедрин. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 3. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/issue/195> (дата обращения 06.03.2024).

15. Трёкин, Н.Н. Совершенствование методов расчёта несущих конструкций / Н.Н. Трёкин, Э.Н. Кодыш, О.С. Щедрин. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 8. – С. 14–20.

16. Трёкин, Н.Н. Определение показателя ответственности железобетонных колонн в многоэтажных каркасных зданиях / Н.Н. Трёкин, Э.Н. Кодыш, О.С. Щедрин. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов, 2023. – С. 183–184.

References

1. Makhutov N.A., Lobov O.I., Eremin K.I. [et al.]. Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' stroitel'nogo kompleksa [Safety of Russia. Safety of the Construction Industry]. Moscow, Znanie Publ., 2012, 798 p. (In Russ.)

2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Eshche raz o konstruktivnoi bezopasnosti i zhivuchesti zdaniy [Once Again about the Structural Safety and Survivability of Buildings]. In: *Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk [Bulletin of the Division of Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]*, 2007, no. 11, pp. 81–86. (In Russ.)

3. Zalesov A.S., Kodysh E.N., Lemyshev L.L., Nikitin I.K. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsii po prochnosti,

treshchinostoikosti i [Calculation of Reinforced Concrete Structures for Strength, Crack Resistance and Deformations]. Moscow, Stroizdat Publ., 1988, 320 p. (In Russ.)

4. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General Models of Reinforced Concrete Mechanics]. Moscow, Stroizdat Publ., 1996, 416 p. (In Russ.)

5. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'ev E.V. Zashchita zdaniy i sooruzhenii ot progressiruyushchego obrusheniya v ramkakh zakonodatel'nykh i normativnykh trebovaniy [Protection of Buildings and Structures against Progressive Collapse within the Framework of Legislative and Regulatory Requirements]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2019, no. 2, pp. 46–54. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Kodysh E.N., Trekin N.N., Kelas'ev N.G., Terekhov I.A. Vvedenie v proektirovanie tekhnicheskii slozhnykh zdaniy i sooruzhenii [Introduction to the Design of Technically Complex Buildings and Structures]. Moscow, ASV Publ., 2022, 294 p. ISBN 978-5-4323-0439-1. (In Russ.)

7. Mkrtychev O.V., Raizer V.D. Teoriya nadezhnosti v proektirovanii stroitel'nykh konstruktsii [Reliability Theory in the Design of Building Structures], Monograph. Moscow, ASV Publ., 2016, 908 p. (In Russ.)

8. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenii pri zaproektnykh vozdeistviyakh [Survivability of Buildings and Structures under beyond Design Basis Impacts]. Moscow, ASV Publ., 2014, 208 p. (In Russ.)

9. Tamrazyan A.G. Zhivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstruktsii pri povrezhdenii [Survivability as the Degree of Operability of Structures in Case of Damage]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2023, no. 7, pp. 22–28. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Kelas'ev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Leont'ev E.V., Shchedrin O.S. Unifikatsiya trebovaniy normativno-pravovykh aktov po obespecheniyu bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii [Unification of the Requirements of Legislative and Regulatory Legal Acts to Ensure the Safety of Buildings and Structures]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2023, no. 5, pp. 4–16. (In Russ., abstr. in Engl.)

11. Skladnev N.N., Fedyaev A.A. O metodike opredeleniya koeffitsienta nadezhnosti po naznacheniyu [On the Methodology for Determining the Reliability Coefficient by Purpose]. In: *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]*, 1987, no. 2, pp. 3–6. (In Russ.)

12. Kodysh E.N., Trekin N.N. Obespechenie ustoichivosti sbornykh zhelezobetonnykh svyazevykh karkasnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Ensuring the Stability of Precast Reinforced Concrete Braced Frame Buildings from Progressive Collapse]. In: *Predotvrashchenie avariy zdaniy i sooruzhenii [Prevention of Accidents in Buildings and Structures]*. URL: <https://prevdis.ru/obespechenie-ustojchivosti-sbornyh-zhelezobetonnyh-svyazevyh-karkasnyh->

zdaniy-ot-progressiruyushhego-obrusheniya/ (Accessed 02/05/2025). (In Russ.)

13. Leont'ev E.V., Shchedrin O.S. Obosnovanie konstruktivnykh reshenii [Justification of Design Solutions]. In: *Vestnik gosudarstvennoi ekspertizy*, 2017, no. 3 (4), pp. 88–95. (In Russ.)

14. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shchedrin O.S. Opredelenie pokazatelya otvetstvennosti zhelezobetonnykh kolonn v mnogoetazhnykh karkasnykh zdaniyakh [Determination of the Indicator of Responsibility of Reinforced Concrete Columns in Multi-Storey Frame Buildings]. In: *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzhenii* [Actual Problems of Computer Modeling of Structures and Constructions], Abstracts of reports of the VIII international symposium. Tambov, May 17–21, 2023. Tambov, 2023, pp. 183–184. (In Russ., abstr. in Engl.)

15. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shchedrin O.S. Sovershenstvovanie metodov rascheta nesushchikh konstruksii [Improvement of Methods for Calculating Load-Bearing Structures]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 8, pp. 14–20. (In Russ., abstr. in Engl.)

16. Shchedrin, O.S. Opredelenie urovnya otvetstvennosti konstruksii monolitnogo mnogoetazhnogo karkasnogo zdaniya [Determining the Level of Responsibility of Reinforced Concrete Columns of a Monolithic Multi-Storey Frame Building]. In: *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2024, no. 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/issue/195> (Accessed 03/06/2024). (In Russ., abstr. in Engl.)