

Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях

Виталий Иванович Колчунов^{1,3}, Павел Анатолиевич Кореньков², Фан Динь Гуок³

¹ Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия;

² Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); г. Симферополь, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост количества отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам конструктивной безопасности и живучести зданий и сооружений, отражает большой интерес к исследованию проблемы защиты несущих систем от прогрессирующего обрушения. Актуальность таких исследований обусловлена постоянным увеличением на здания и сооружения воздействий техногенного, природного и террористического характера, в связи с этим определяющим фактором является расширение экспериментальных и теоретических исследований обеспечения требуемого уровня живучести несущих систем при таких особых воздействиях и создание способов защиты от прогрессирующего обрушения.

Материалы и методы. Приведены новые результаты экспериментального изучения моделей фрагмента многоэтажного здания, выполненного из монолитного железобетона, узлы сопряжения ригеля и колонны которого усилены сетками косвенного армирования на эксплуатационную статическую нагрузку и аварийное особое воздействие, вызванное внезапным выключением из работы несущей системы одной из колонн первого этажа.

Результаты. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости железобетонных рам-фрагментов каркасов многоэтажных зданий из монолитного железобетона, узлы которых усилены косвенным армированием. Данные о силовом сопротивлении конструкций получены при статическом загрузении конструкции эксплуатационной нагрузкой и особом аварийном воздействии, вызванном мгновенным удалением одной из колонн первого этажа. Выполнен сопоставительный анализ динамики образования, развития и раскрытия трещин. Произведена критериальная оценка параметров предельных и запредельных состояний, а также элементов конструктивных систем с узлами, усиленными сетками косвенного армирования, и без него.

Выводы. Установлен характер действительного деформирования и разрушения элементов несущей системы, узлы которой усилены косвенным армированием. Экспериментально установлены основные свойства элементов конструкций, которые позволяют производить более строгую оценку деформативности и несущей способности влияния косвенного армирования на сопротивление конструктивных систем в запредельных состояниях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, железобетонные конструкции, косвенное армирование, динамическое догружение, живучесть, особое предельное состояние, физическая нелинейность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колчунов В.И., Кореньков П.А., Фан Динь Гуок. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 11. С. 1462–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472

Автор, ответственный за переписку: Павел Анатолиевич Кореньков, kra_gbk@mail.ru.

A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts

Vitaly I. Kolchunov^{1,3}, Pavel A. Korenkov², Phan Dinh Quoc³

¹ Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation;

² V.I. Vernadsky Crimean Federal University (CFU); Simferopol, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The increasing number of domestic and foreign publications on structural safety and survivability of buildings and structures evidences a great interest in the study of the problem of protecting bearing systems from progressive collapse. The relevance of these studies is determined by the ongoing rise in the number of man-induced, natural and terrorist impacts

on buildings and structures. In this regard, the decisive factor is the expansion of experimental and theoretical studies, focused on ensuring the required level of survivability of bearing systems under such special impacts and, respectively, developing methods for protection from progressive collapse.

Materials and methods. This work presents new results of experimental studies on models of a fragment of a multi-storied building made of monolithic reinforced concrete, whose nodes, connecting the girder and the column, are reinforced with laterally reinforced meshes designed to resist operational static loads and a special emergency impact caused by the failure of one ground-floor column in the framework.

Results. The article presents the results of experimental and theoretical studies on the stress-strain state and crack resistance of reinforced concrete frames or fragments of multi-storied frameworks of buildings, made of monolithic reinforced concrete. Nodes of these buildings are laterally reinforced. The data on force-induced resistance of structures were obtained for cases of the static operational loading of a structure and special emergency impacts caused by the instantaneous withdrawal of one column on the ground floor. A comparative analysis of the pace of cracking, crack development and opening is made. The co-authors have made a benchmark assessment of parameters of limit and beyond-the-limit states, as well as elements of structural systems, having nodes with/without laterally reinforced meshes.

Conclusions. The co-authors have identified the nature of actual deformation and destruction of elements in the bearing system, whose nodes are laterally reinforced. The co-authors have experimentally identified the principal properties of structural elements to allow for a more rigorous assessment of deformability and the bearing capacity of the effect produced by the lateral reinforcement on the resistance of structural systems in beyond-the-limit states.

KEYWORDS: progressive collapse, reinforced concrete structures, lateral reinforcement, additional dynamic loading, survivability, special limit state, physical nonlinearity

FOR CITATION: Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Phan Dinh Quoc. A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(11):1462-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472

Corresponding author: Pavel A. Korenkov, kpa_gbk@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Решение вопроса защиты конструкций каркасов многоэтажных зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [1–3] может быть найдено различными средствами. В настоящее время известны предложения с использованием предварительного напряжения ригелей [4], устройства ауригерных этажей¹, увеличение сечений несущих конструкций перекрытий под первым этажом, пропорционально возрастающим внутренним усилиям [5], изменение конструктивных решений несущей системы [6]. Одним из перспективных и малозатратных способов увеличения живучести рамных, рамно-связевых и других типов железобетонных конструктивных систем зданий представляется введение в узлы сопряжения конструктивных элементов косвенного армирования [7–10], которое может быть выполнено как традиционным, так и принципиально новыми методами [11].

На сегодняшний день отсутствуют сведения о работе несущих элементов с косвенным армированием в рассматриваемых системах при статико-динамических режимах деформирования. Это определяет актуальность данной тематики.

Известно, что косвенное армирование сжатых железобетонных элементов существенно повышает их прочность и предельную деформативность, что подтверждается не только результатами исследований [12–17], но и действующими нормативными

документами². В связи с этим предположение о том, что применение косвенной арматуры в изгибаемых, внецентренно сжатых и сжатых элементах может оказать значительное влияние на изменения перераспределения силовых потоков в конструктивной системе при ее структурной перестройке, находит свое подтверждение в работах отечественных и зарубежных авторов [18–23].

Так же необходимо отметить, что простое увеличение площади сечения растянутой арматуры пропорционально увеличению внутренних усилий, вызванных динамическим догружением при рассматриваемых аварийных воздействиях, имеет ограниченные рамки и не всегда является эффективным способом защиты от прогрессирующего обрушения без обеспечения пластического характера разрушения [6]. В то же время деформативность косвенного армированного бетона, лимитированная величиной ϵ_{b2} , почти в три раза выше, чем без такого армирования, это может стать существенным резервом при разработке способов защиты конструкций от прогрессирующего обрушения (рис. 1).

Другим плюсом такого конструктивного решения служит возможность увеличения площади растянутой арматуры без необходимости увеличивать геометрические размеры сечения³. Количественный анализ изменения динамической прочности и времени динамического догружения в сечении нагруженного изгибаемого железобетонного элемента,

¹ Патент РФ № 151757, МПК E02B 1/00. Рамный каркас многоэтажного здания / П.А. Кореньков; заявитель и патентообл. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. № 2014154656/93 от 21.12.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

² СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003. М., 2018.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. ЭС НТИ «Техэксперт», 2017. 35 с.

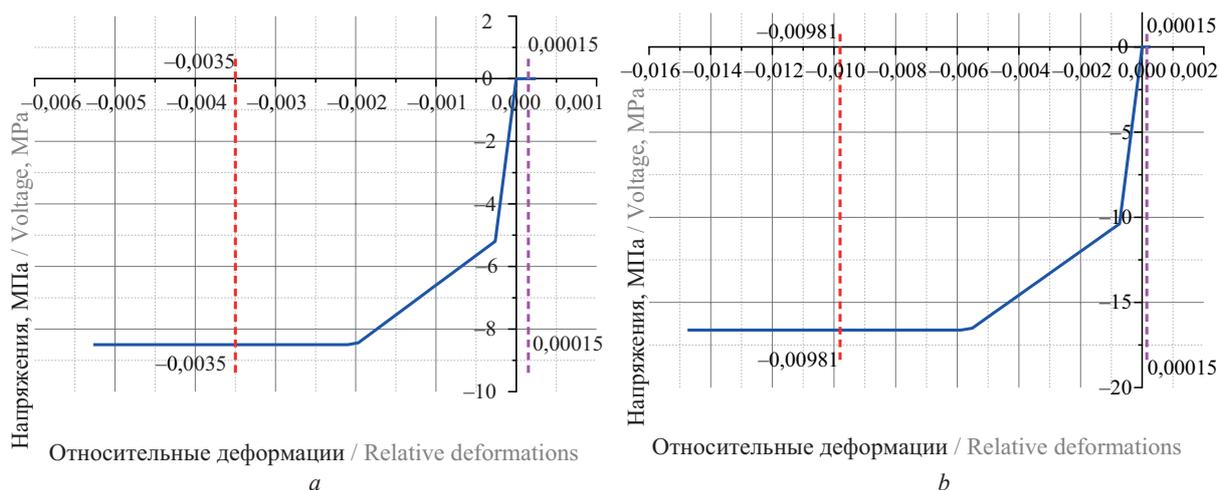


Рис. 1. Диаграммы «напряжения-деформации» бетона класса В15: *a* — обычного; *b* — усиленного сетками косвенного армирования

Fig. 1. Deformation stress diagrams made for B15 concrete: *a* is for conventional concrete; *b* is for concrete that has lateral reinforcement meshes

усиленного косвенным армированием при его динамическом догружении, для оценки эффективности такой защиты выполнен авторами в работах [16, 24].

Настоящее исследование посвящено оценке качественного и количественного характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивной системы и экспериментальной проверке критериев особого предельного состояния в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения сформулированных задач была разработана методика и проведены экспериментальные исследования конструкций железобетонных рам, моделирующих фрагмент каркаса многоэтажного здания. Испытано три серии рам: РЖ-1 — рама с внезапно выключающейся центральной стойкой без усиления косвенным армированием; РЖ-2 — такая же, но с ригелями, усиленными сетками косвенного армирования; РЖ-3 — рама с внезапно выключающейся крайней стойкой и ригелями, усиленными сетками косвенного армирования.

Рамы изготовлены из бетона класса В15. Ригели рам армированы в верхней и нижней зонах симметричной арматурой по высоте сечения в виде двух стержней диаметром 6 мм класса А240 (рис. 2, *a-d*). Участки ригелей, примыкающие к колоннам, с целью защиты от прогрессирующего обрушения дополнительно армированы сетками косвенного армирования на длину 290 мм от наружной грани колонны. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2 мм шагом 50 и 100 мм у опор и в пролете соответственно. Такое армирование назначено по результатам расчета опытных конструкций рам на заданную проектную нагрузку

в виде сосредоточенных сил P_i , приложенных попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 1/3 пролета ригеля.

Для передачи проектной нагрузки была использована механическая гравитационная рычажная установка⁴, состоящая из рычага и комплекта тяжей и распределительных балок, передающих на раму нагрузку от платформы со штучными грузами. Испытания проводились по методике [25] с измерением и фиксацией прогибов, перемещений, деформаций бетона и арматуры, фиксаций характера образования, развития и раскрытия, закрытия трещин на разных этапах нагружения. Рассматриваемыми сценариями особого воздействия выбраны удаление средней и крайней колонны первого этажа.

Для измерения перемещений элементов конструкции рамы установлены прогибомеры 6ПАО (рис. 2).

Измерение продольных деформаций сжатого и растянутого бетона, фиксация нагрузки трещинообразования производились методом электротензометрии. Углы поворота и прогибы ригелей измеряли с помощью прогибомеров П1-П4 (цена деления 0,01 мм). Для регистрации показаний тензорезисторов использовался измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1. Ширина раскрытия трещин измерялась микроскопом МПБ-2 с ценой деления 0,02 мм, а расстояние между трещинами на каждом этапе нагружения — штангенциркулем по ГОСТ 166-89. Всплеск

⁴ Патент РФ № 2642542, МПК G01N3/60. Устройство для экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах / Н.В. Клюева, П.А. Кореньков ; заявитель и патентообл. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. № 2016130263 от 22.07.2016; опубл. 25.01.2018., Бюл. № 3.

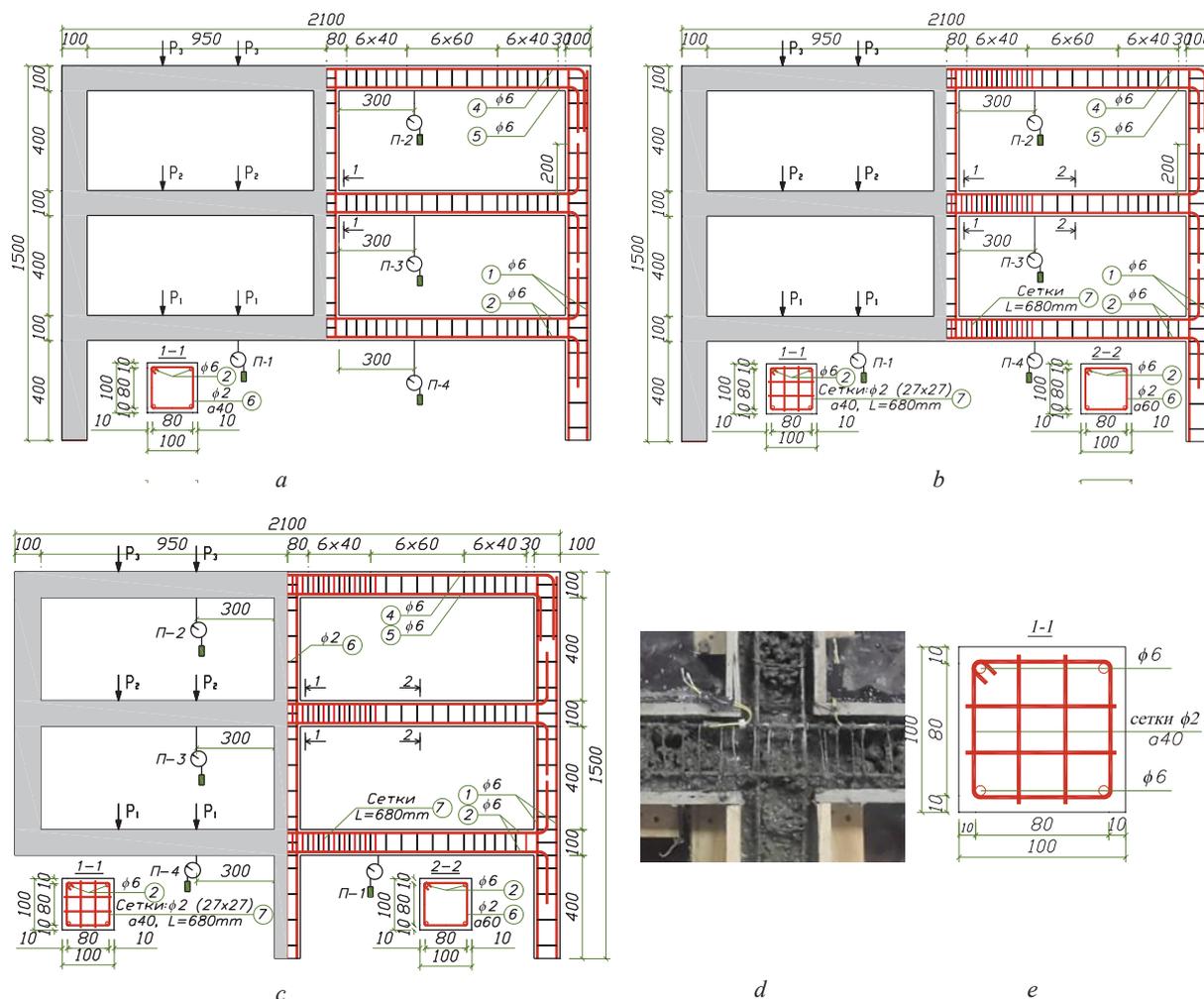


Рис. 2. Армирование и схема приложения нагрузок, расстановка измерительных приборов в раме первой (а); второй (б) и третьей (с) серий; расположение косвенного армирования в конструкции рам (д); сечение 1-1 (е)

Fig. 2. The reinforcement and loading diagram; arrangement of measuring devices in the frame of the first (a); second (b) and third (c) series; location of lateral reinforcement in the structure of frames (d); section 1-1 (e)

перемещений в пролетах рамы при приложении за- проектного воздействия фиксировался с записью показаний прогибомеров на цифровые видеокamеры с частотой съемки 240 кадров в секунду [24].

Цель испытаний — определение параметров статико-динамического деформирования элементов конструктивной системы после внезапной структурной перестройки, анализ трещинообразования и проверка критериев особого предельного состояния железобетонных рам для оценки эффективности применения косвенного армирования узлов сопряжения конструктивных элементов как способа защиты от прогрессирующего обрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важным параметром изучения статико-динамического деформирования железобетонных рам, вызванного особым воздействием в виде внезапного удаления одной из колонн, является коэффициент динамического догружения в конструктивных элементах рамы. Анализ трещинообразования

в опытных конструкциях рам до приложения особого воздействия показал, что значения нагрузки трещинообразования в раме с косвенной арматурой существенно выше (см. рис. 3). Значения нагрузок на ступенях загрузки показаны в табл.

После выключения из работы средней колонны характер работы несущей системы с усилением узлов (рама РЖ-2) и без усиления (рама РЖ-1) отличался следующим. В раме РЖ-1 трещины в растянутой зоне самого нагруженного ригеля первого этажа имеют характер повреждений, аналогичный исследованиям [25, 26], а именно отрыв ригеля от колонны с образованием значительных трещин от 2 до 10 мм в зоне сопряжения ригеля и колонны, свидетельствующим о превышении несущей способности нормального сечения. Необходимо отметить и значительную длину образовавшихся трещин, которые пересекают все сечение ригеля и имеют продолжение вдоль колонны на четверть ее длины, т.е. до места изменения знака действующего изгибающего момента. Аналогичная картина

Значения нагрузки на ступенях, кН

Load values in steps, kN

Значения нагрузки на ступенях, кН Load values in steps, kN							
Номер ступени Step number	P_1	P_2	P_3	Номер ступени Step number	P_1	P_2	P_3
1	0,490	0,330	0,240	7	1,61	1,05	0,73
2	0,670	0,450	0,320	8	1,98	1,29	0,9
3	0,860	0,570	0,400	9	2,35	1,53	1,06
4	1,040	0,690	0,480	10	2,72	1,77	1,23
5*	1,230	0,810	0,570	11	3,100	2,010	1,400
6	1,420	0,930	0,650	12**	3,280	2,130	1,480

Примечание: * — этап трещинообразования; ** — этап перед удалением колонны.

Note: * is the cracking step; ** is the step before the column withdrawal.

трещинообразования наблюдалась и в ригелях 2-го и 3-го уровней, где также произошел отрыв ригеля от колонны с образованием трещин от 5 до 12 мм в ригеле второго этажа, и 3 и 3,5 мм в колонне верхнего уровня с одновременным приращением имеющихся трещин в ригеле первого уровня до 1 и 2,1 мм соответственно. На верхнем этаже наблюдалось разрушение как ригеля, так и колоны из-за большего эксцентриситета и уменьшения величины продольной силы.

Характер и схемы трещин в раме без косвенного армирования были аналогичны ранее проведенным исследованиям монолитных железобетонных рам, выполненных под руководством В.И. Колчунова [6] и Н.В. Федоровой [27]. Присутствовали как нормальные (тип 1) в верхней (а) и нижней (б) зоне, наклонные (тип 2) в ригелях, так и нормальные (тип 3) в колоннах. В отличие от рамы без косвенного армирования в раме серии РЖ-2 отсутствуют трещины 2-го и 3-го типа. Вследствие принятой схемы нагрузки на ригели рамы силами в 1/3 пролета имелась возможность дополнительно изучить работу нормальных и наклонных сечений, разграничив зону чистого изгиба с участком, на котором действует и поперечная сила постоянной величины, и изгибающий момент в эксплуатационной стадии и после запроектного воздействия. Сопоставив картины трещинообразования, можно видеть отсутствие наклонных трещин в раме с косвенным армированием, что объясняется увеличением значения поперечной силы, воспринимаемой таким сечением.

Переходя к анализу динамического догружения сечений элементов рамы после аварийного воздействия, отметим, что косвенное армирование не повышает прочность бетона на растяжение, а следовательно, и трещиностойкость бетона, но увеличение прочности бетона на сжатие ввиду создания объемного напряженного состояния и ограничения поперечных деформаций сжатого бетона увеличивают прочность на сжатие и деформативность всего косвенно армированного сечения изгибаемого элемента. Из-за повышения прочности сжатого бетона в узлах сопряжения ригелей с колоннами нормаль-

ные трещины образовывались вне зон косвенного армирования и по границе контакта армированных зон с бетоном без дополнительного усиления. Также следует указать на ширину раскрытия уже имеющихся и открытия новых трещин в пределах до 1–1,2 мм. Для сравнения, в раме без усиления узлов сетками ширина трещин после запроектного воздействия достигала 10–12 мм, т.е. имеет место почти 10-кратное снижение трещинообразования.

Оценка приращения напряжений в арматуре (рис. 3) была выполнена путем сопоставления ширины раскрытия трещин до и после аварийного воздействия. Данный прием вполне уместен ввиду известной связи между шириной раскрытия трещины и величиной действующих напряжений в трещине.

Сопоставлением опытных данных установлено, что в самых нагруженных сечениях рам происходит пятикратное снижение напряжений в арматуре в сечениях, усиленных косвенным армированием, вследствие изменения диссипативных свойств таких элементов при мгновенном динамическом догружении. Такое снижение деформативности сечения приводит к тому, что разрушение сечения будет осуществляться по «мягкому» варианту ввиду достижения арматурой своих предельных прочностных характеристик, сохраняя пластический характер деформирования в стадии III.

Картина деформированного состояния нижних ригелей рам всех серий (как самых нагруженных) после аварийного воздействия показана на рис. 4, где визуально прослеживаются сделанные ранее выводы.

Требованиями норм⁵ в качестве одного из критериев предельного состояния принят деформационный критерий, позволяющий с позиции требований особого предельного состояния оценить, насколько элементы конструктивной системы деформировались в зоне возможного локального обрушения.

⁵ Пособие по проектированию мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М., 2020.

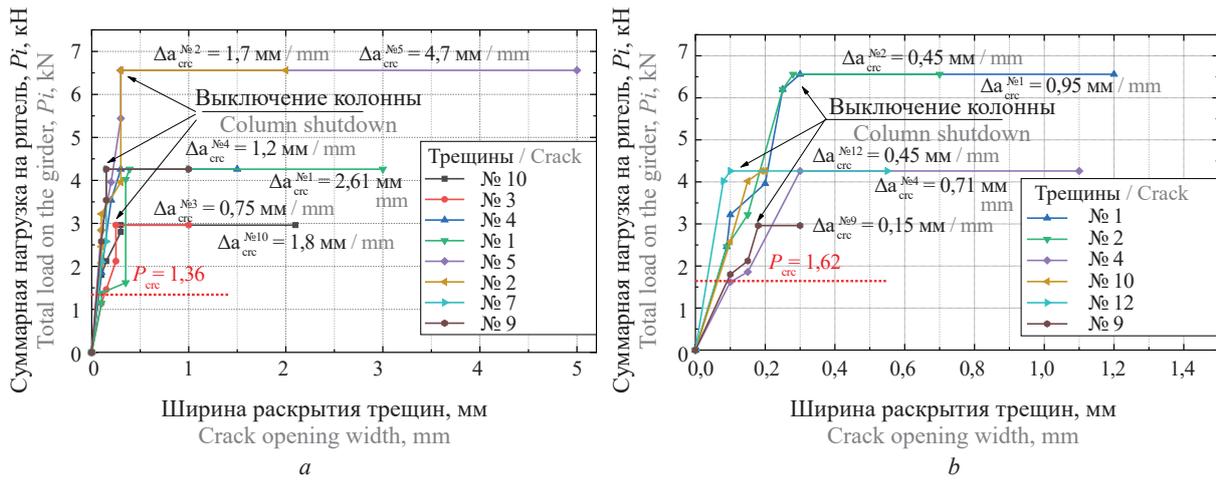


Рис. 3. Ширина раскрытия трещин при статической проектной и после запроектной нагрузке в рамах первой (а); второй (b) серий

Fig. 3. Crack opening width under the static design load and after the beyond-design load in the frames of the first (a); second (b) series

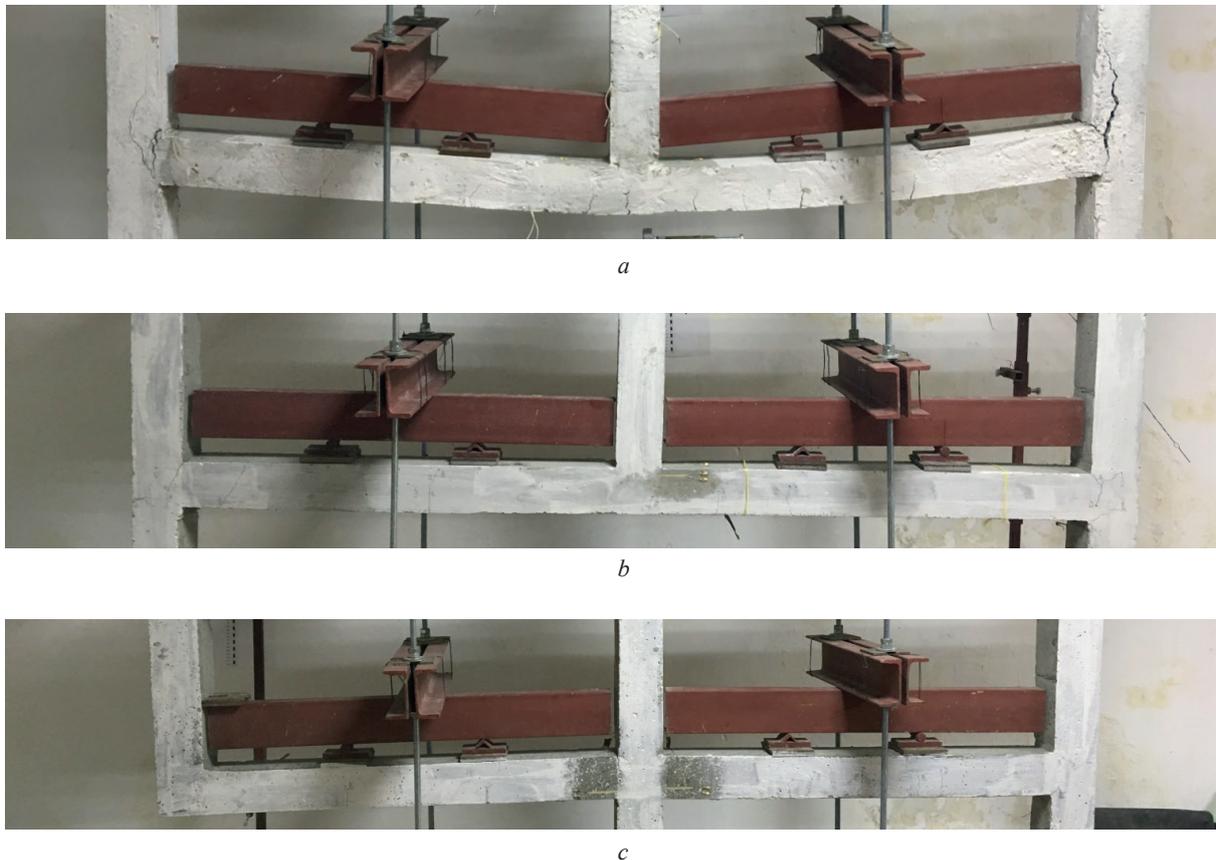


Рис. 4. Картина разрушения и деформирования нижних ригелей у рам первой (а); второй (b) и третьей (c) серий

Fig. 4. Bottom crossbars of frames of the first (a); second (b) and third (c) series: the scene of destruction and deformation

Анализируя графики зависимости прогиба от суммарной нагрузки, действующей на ригель (рис. 5), можно видеть последовательное развитие прогибов, характеризующееся сначала линейной зависимостью, а после появления и раскрытия трещин носящее явно выраженный нелинейный характер. Также можно отметить уменьшение пролетного прогиба в раме РЖ-3 на предпослед-

ней степени нагружения, что свидетельствует о наличии перераспределения моментов в самом нагруженном ригеле первого этажа. Деформационный критерий особого предельного состояния регламентирован пособием к СП 385⁵ для конструкций, расположенных в зоне локального обрушения, равен 1/30 расчетного пролета 1000 мм и составляет 33 мм.

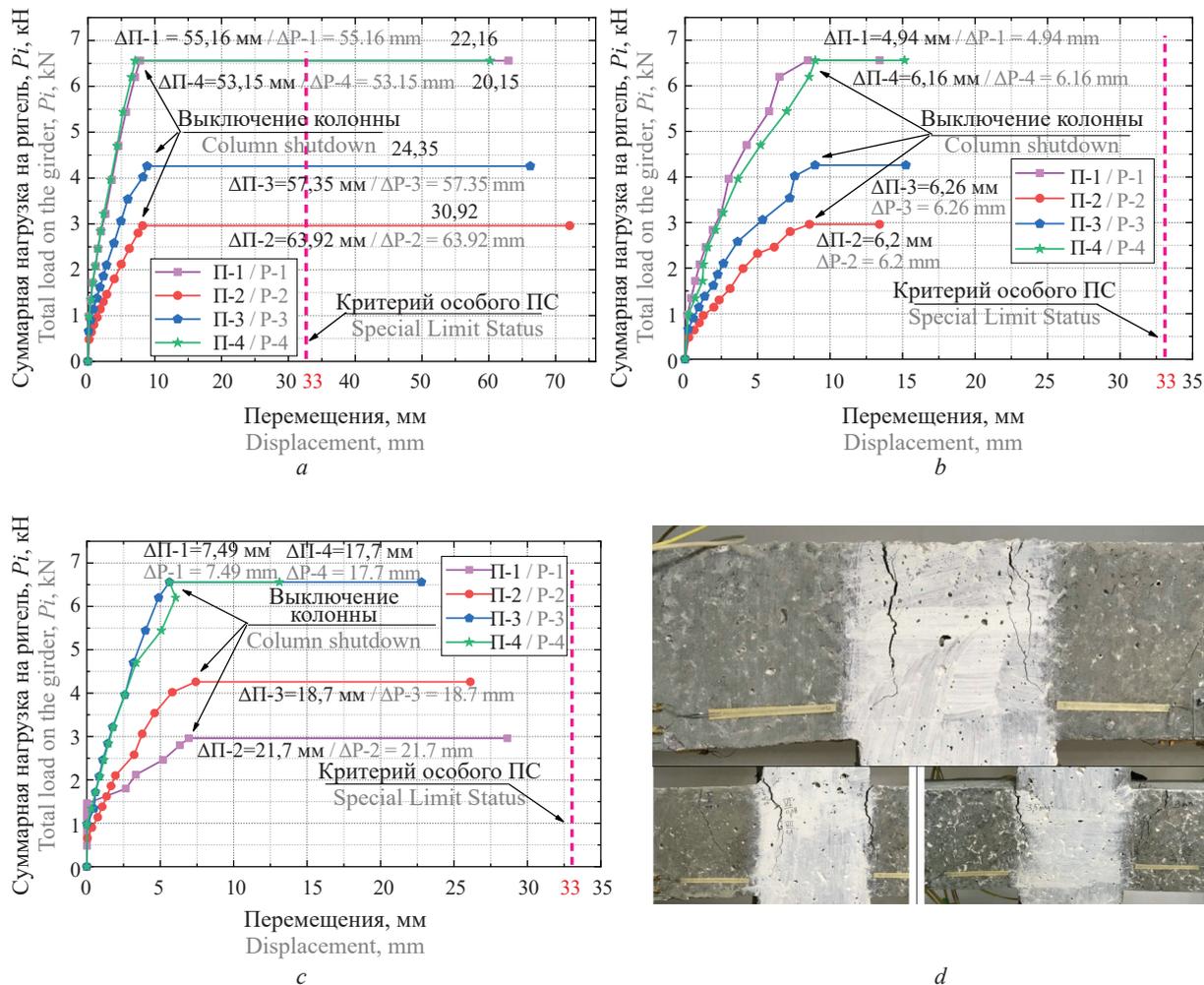


Рис. 5. Прогибы в рамах первой (а); второй (б) и третьей (с) серий при статической проектной и динамической запроектной нагрузках, характер деформирования узлов рамы третьей серии (д)

Fig. 5. Deflections in the frames of the first (a), second (b) and third (c) series under the design static load and the dynamic beyond-design load; the nature of deformation in the frame nodes of the third series (d)

Для ригелей 1-го и 2-го уровней рамы первой серии значение прогиба превысило нормируемый более чем в два раза. В раме второй серии для самого нагруженного ригеля первого этажа деформационный критерий находился в пределах для рассматриваемого.

Анализ перемещений для рамы третьей серии с учетом характерной картины деформирования ее узлов позволил сделать вывод о недостижении во всех ригелях, примыкающих к удаляемому пролету, близкого к предельному состоянию и составил 1/35, 1/40 и 1/45 для ригелей 1-го, 2-го и 3-го уровней соответственно.

В пролете, примыкающем к удаляемой колонне, прогиб составил 1/135 расчетного пролета, что соответствует требованиям для пролета 1000 мм. Также можно наблюдать незначительную (до 0,4 мм) ширину раскрытия трещин в данном пролете. Интерес представляет значительное раскрытие трещин в опорных ригелях пролета, примыкающих

к аварийному, в то время как на противоположной опоре наибольшее раскрытие трещин отмечалось в нижней зоне ригеля. В раме без косвенного армирования ширина раскрытия трещин после особого воздействия от 0,8 до 1,8 мм для рассматриваемых рам с усилением узлов не превысила нормируемую и составила от 0,08 до 0,15 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования деформирования, трещинообразования и разрушения монолитных железобетонных рам с узлами, усиленными косвенным армированием, и анализ полученных результатов позволили установить действительный характер изменения НДС такой несущей рамной системы при проектных нагрузках и запроектном динамическом воздействии, вызванном удалением из работы одной из колонн первого этажа.

Экспериментально подтверждены выдвинутые авторами гипотезы об увеличении жесткости конструктивной системы за счет усиления косвенным армированием узлов в монолитных железобетонных каркасах и дополнительных резервах пластического деформирования сечений железобетонных элементов. Показано увеличение не только предельной деформативности сечений вследствие трехкратного увеличения значения ε_{b2} косвенно армированного бетона, но и возможность дополнительного роста прочности сечений

железобетонных элементов за счет увеличения площади растянутой арматуры без угрозы хрупкого разрушения.

Полученные результаты дают возможность более полно оценивать работу рассмотренных несущих систем при критериальной оценке параметров особого предельного состояния.

Эти результаты могут быть использованы при разработке способов защиты железобетонных каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang Q., Zhao Y.G., Kolozvari K., Xu L. Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 215. P. 110688. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110688
2. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 211. P. 110425. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110425
3. Kiakojouri F., De B.V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061
4. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1 (93). С. 74–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84
5. Zhang L., Zhao H., Wang T., Chen Q. Dynamic increase factor for RC frame with specially shaped columns against progressive collapse // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. Issue 1. Pp. 419–433. DOI: 10.21595/jve.2016.17371
6. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М. : Изд-во АСВ, 2014. 208 с.
7. Ахрамочкина Т.И. Экспериментальные исследования силы сцепления стальной оцинкованной пластины и бетона // *Строительство: наука и образование*. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1
8. Attiyah A.N., Hussain H.M. Analytical approach to predict nonlinear parameters for dynamic analysis of structures applied to blast loads // *Kufa Journal of Engineering*. 2019. Vol. 10. Issue 3. Pp. 1–18. DOI: 10.30572/2018/kje/100301
9. Mirza S.A. Examination of strength modeling reliability of physical tests on structural concrete columns // *Advances in Civil Engineering*. 2011. Vol. 2011. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2011/428367
10. Mostoufinezhad D., Saadatmand H. A procedure for predicting the behavior of FRP confined concrete using the FE method // *Scientia Iranica*. 2010. Vol. 17. Issue 6. Pp. 471–481.
11. Vieira A.D.A., Triantafyllou S.P., Bournas D.A. Strengthening of RC frame subassemblies against progressive collapse using TRM and NSM reinforcement // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 207. P. 110002. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110002
12. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 7. С. 41–44.
13. Кришан А.Л., Сабиров Р.Р., Кришан М.А. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками // *Архитектура. Строительство. Образование*. 2014. № 1 (3). С. 215–224.
14. Baduge S.K., Mendis P., Ngo T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 177. Pp. 795–808. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.008
15. Manaenkov I., Korenkov P., Grezeva A.S., Zinoveva E. Calculation of deformations of concrete with indirect reinforcement according to limit state design // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 052033. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052033
16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032
17. Kedziora S., Anwaar M.O. Concrete-filled steel tubular (CFTS) columns subjected to eccentric compressive load // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2060. Issue 1. P. 020004. DOI: 10.1063/1.5086135
18. Feng F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment

frames under progressive collapse // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 213. P. 110612. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110612

19. Zhou Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 214. P. 110675. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110675

20. Feng D.C., Xie S.C., Xu J., Qian K. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 202. P. 109877. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109877

21. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110001. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110001

22. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. Pp. 728–741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.043

23. Qian K., Liang S.L., Xiong X.Y., Fu F., Fang Q. Quasi-static and dynamic behavior of precast concrete

frames with high performance dry connections subjected to loss of a penultimate column scenario // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 205. P. 110115. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110115

24. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037

25. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4 (78). С. 42–52.

26. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // *Строительство и реконструкция*. 2020. Т. 90. № 4. С. 73–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84

27. Федорова Н.В., Ву Нгок Туен, Яковенко И.А. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1513–1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522

Поступила в редакцию 22 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 15 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 17 ноября 2021 г.

Об авторах: **Виталий Иванович Колчунов** — доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; Kolchunovvi@mgsu.ru;

Павел Анатольевич Кореньков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295007, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; SPIN-код: 4512-6499, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Фан Динь Гуок — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; d2nucevn@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhang Q., Zhao Y.G., Kolozvari K., Xu L. Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss. *Engineering Structures*. 2020; 215:110688. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110688

2. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive

collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020; 211:110425. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110425

3. Kiakoouri F., De B.V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering*

- Structures*. 2020; 206:110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061
4. Iiushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame structure systems under special impact. *Building and Reconstruction*. 2021; 1(93):74-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84 (rus.).
 5. Zhang L., Zhao H., Wang T., Chen Q. Dynamic increase factor for RC frame with specially shaped columns against progressive collapse. *Journal of Vibration Engineering*. 2017; 19(1):419-433. DOI: 10.21595/jve.2016.17371
 6. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. *Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts*. Moscow, Publishing house ASV, 2014; 208. (rus.).
 7. Akhramochkina T.I. Experimental studies of the adhesion force between a zinc-coated steel plate and concrete. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):1-16. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.1 (rus.).
 8. Attiyah A.N., Hussain H.M. Analytical approach to predict nonlinear parameters for dynamic analysis of structures applied to blast loads. *Kufa Journal of Engineering*. 2019; 10(3):1-18. DOI: 10.30572/2018/kje/100301
 9. Mirza S.A. Examination of strength modeling reliability of physical tests on structural concrete columns. *Advances in Civil Engineering*. 2011; 2011:1-16. DOI: 10.1155/2011/428367
 10. Mostoufinezhad D., Saadatmand H. A procedure for predicting the behavior of FRP confined concrete using the FE method. *Scientia Iranica*. 2010; 17(6):471-481.
 11. Vieira A.D.A., Triantafyllou S.P., Bournas D.A. Strengthening of RC frame subassemblies against progressive collapse using TRM and NSM reinforcement. *Engineering Structures*. 2020; 207:110002. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110002
 12. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. On calculation of concrete flexural elements with indirect reinforcement of a compressed zone. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:41-44. (rus.).
 13. Krishan A.L., Sabirov R.R., Krishan M.A. Calculation of the strength of compressed reinforced concrete elements with indirect reinforcement with mesh. *Architecture. Building. Education*. 2014; 1(3):215-224. (rus.).
 14. Baduge S.K., Mendis P., Ngo T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement. *Engineering Structures*. 2018; 177:795-808. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.008
 15. Manaenkov I., Korenkov P., Grezeva A.S., Zinoveva E. Calculation of deformations of concrete with indirect reinforcement according to limit state design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869:052033. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052033
 16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect reinforcement of reinforced concrete elements as a means of protecting a constructive system from a progressive collapse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032
 17. Kedziora S., Anwaar M.O. Concrete-filled steel tubular (CFTS) columns subjected to eccentric compressive load. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 2060(1):020004. DOI: 10.1063/1.5086135
 18. Feng F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2020; 213:110612. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110612
 19. Zhou Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures. *Engineering Structures*. 2020; 214:110675. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110675
 20. Feng D.C., Xie S.C., Xu J., Qian K. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method. *Engineering Structures*. 2020; 202:109877. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109877
 21. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios. *Engineering Structures*. 2020; 209:110001. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110001
 22. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2019; 180:728-741. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.043
 23. Qian K., Liang S.L., Xiong X.Y., Fu F., Fang Q. Quasi-static and dynamic behavior of precast concrete frames with high performance dry connections subjected to loss of a penultimate column scenario. *Engineering Structures*. 2020; 205:110115. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110115
 24. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and Failure of a Monolithic Reinforced Concrete Frame under Accidental Actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037
 25. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Vu N.T. Technique of experimental studies of the deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts. *Construction and Reconstruction*. 2018; 4(78):42-52. (rus.).
 26. Vu Ngoc Tuyen. Investigation of the survivability of a reinforced concrete structurally nonlinear frame-bar system of the frame of a multistorey building in a dy-

namic setting. *Construction and Reconstruction*. 2020; 90(4):73-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84
27. Fedorova N.V., Vu Ngoc Tuyen, Yakovenko I.A. Strength criterion for a plane stress reinforced

concrete element under a special action. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1513-1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522 (rus.).

Received October 22, 2021.

Adopted in revised form on November 15, 2021.

Approved for publication on November 17, 2021.

B I O N O T E S: **Vitaly I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Department of Unique Buildings and Structures; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040; Russian Federation; Professor of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; Kolchunovvi@mgsu.ru;

Pavel A. Korenkov — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department Building Structures; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University (CFU)**; 4 Vernadsky avenue, Simferopol, 295007, Russian Federation; SPIN-code: 4512-6499, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Phan Dinh Quoc — postgraduate of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; d2nucevn@gmail.com.

Authors' contributions: All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.