

Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 190–199.

Academia. Architecture and Construction, no. 2, pp. 190–199.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 624.075

DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-190-199

Напряженно-деформированное состояние узловых соединений железобетонных конструкций при статико-динамическом деформировании

Кореньков Павел Анатольевич (Москва). Кандидат технических наук, доцент. Кафедра промышленного гражданского строительства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: kra_gbk@mail.ru

Фёдорова Наталия Витальевна (Москва). Доктор технических наук, профессор, советник РААСН. Филиал НИУ МГСУ в г. Мытищи Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (гор. Мытищи Московской области, Олимпийский просп., 50, стр. 4. Филиал НИУ МГСУ); Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: fedorovanv@mfmgusu.ru

Меликсетян Сергей Романович (Москва). Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: MSR080802@mail.ru

Аннотация: Предложена методика более строгой оценки параметров напряжённо-деформированного состояния в конструктивно и физически нелинейных системах железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при структурных перестройках, вызванных особыми воздействиями. Установлены особенности влияния податливости узловых соединений в зависимости от характера разрушения сечения и уровня эксплуатационной нагрузки на способность конструктивной системы из монолитного железобетона сопротивляться возможному прогрессирующему обрушению вследствие выключения из работы колонны первого этажа. Определение напряжённо-деформированного состояния в рассматриваемой конструктивной системе выполнено с учётом физической и геометрической нелинейности поведения конструктивных элементов. При этом динамические догружения в элементах конструкций определены прямым динамическим методом с интегрированием уравнений движения при учёте сил демпфирования. Параметрические точки, описывающие работу узловых соединений, установлены с использованием диаграммных методов расчёта. Полученные результаты позволяют отметить, что учёт податливости узлов оказывает значительное влияние на оценку критериальных показателей особого предельного состояния, особенно в сечениях, разрушение которых происходит по бетону и находится в интервале от 30% до 45% в зависимости от уровня эксплуатационной нагрузки.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, податливость узлов, живучесть, устойчивость, железобетон

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-49-10010 (<https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

Для цитирования. Кореньков П.А., Фёдорова Н.В., Меликсетян С.Р. Напряжённо-деформированное состояние узловых соединений железобетонных конструкций при статико-динамическом деформировании // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 2. – С. 190–199. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-190-199.

Stress-Strain State of Nodal Joints of Reinforced Concrete Structures under Static-Dynamic Deformation

Koren'kov Pavel A. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Department of Industrial and Civil Engineering National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Fedorova Nataliya V. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Advisor of RAACS. Branch of The National Research Moscow State University of Civil Engineering in Mytishchi (Олимпийский просп., 50, стр. 4, Мытищи. Branch of The NRU MGSU); The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: fedorovanv@mfmgsu.ru

Meliksetyan Sergei R. (Moscow). National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: MSR080802@mail.ru

Abstract: A method is proposed for a more rigorous assessment of the stress-strain state parameters in structurally and physically nonlinear systems of reinforced concrete frames of multi-story buildings under extreme conditions during structural transformations caused by special impacts. The specific effects of nodal joint ductility, depending on the failure mode of the cross-section and the level of operational load, on the ability of a monolithic reinforced concrete structural system to resist potential progressive collapse due to the failure of a ground-floor column have been identified. The stress-strain state of the examined structural system is determined with consideration of both physical and geometric nonlinearities in the behavior of structural elements. At the same time, dynamic overloads in the structural elements are calculated using a direct dynamic method by integrating the equations of motion while accounting for damping forces. Parametric points characterizing the performance of nodal joints are identified using diagrammatic analysis methods. The obtained results show that taking into account the compliance (flexibility) of the joints has a significant impact on the assessment of criteria for a special limiting state, particularly in sections where concrete failure occurs and falls within the range of 30% to 45%, depending on the level of operational load.

Keywords: progressive collapse, joint compliance, robustness, stability, reinforced concrete

Funding. The research was carried out with the grant from the Russian Science Foundation No. 24-49-10010 (<https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

For citation. Koren'kov P.A., Fedorova N.V., Meliksetyan S.R Stress-Strain State of Nodal Joints of Reinforced Concrete Structures under Static-Dynamic Deformation. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 2, pp. 190–199, doi: 10.22337/2077-9038-2025-2-190-199.

Введение

Разрушение зданий и сооружений вследствие особых аварийных воздействий, как правило, вызвано выключением из работы одного или нескольких элементов несущей системы. Комплекс проведённых авторами экспериментальных и численных исследований [1–8] позволяет отметить важную особенность, а именно учёт степени податливости узловых соединений и уровня действующей полезной нагрузки в момент возникновения аварийной расчётной ситуации на характер изменения внутренних усилий, и как следствие – картины разрушения рассматриваемых конструктивных систем. В постановочном виде рассматриваемый вопрос применительно к зданиям с отдельными конструктивными особенностями [9–13] решён без одновременного учёта перечисленных выше факторов, которые к совокупности с учётом конструктивной

и геометрической нелинейности оказывают существенное влияние на результаты расчётного анализа.

В настоящее время, границы корректного использования упрощённых моделей сопротивления железобетона¹, используемые в программных комплексах могут допустить существенное искажение вследствие реализации специфических механизмов сопротивления конструкций. В связи с этим требуют более глубокого изучения подходы к моделированию, основанные на всестороннем экспериментальном изучении исследуемых физических процессов как для отдельных конструкций, так и несущей системы в целом. В частности,

¹ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» : актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (<https://docs.cntd.ru/document/554403082>).

авторами установлен различный тип разрушения одинаковой по топологии и строению несущей системы в зависимости от количества продольной рабочей арматуры [14–19], либо других конструктивных особенностей [20–23]. Разрушение сечения вследствие раздробления бетона сжатой зоны в наиболее нагруженных элементах конструктивной системы, а также образование пластических шарниров в прилегающих пролётных и опорных сечениях ригеля и колонны приводят к существенному изменению расчётной схемы после локального воздействия в виде удаления крайней опоры. Не менее существенным фактором, влияющим на динамические характеристики несущей системы, является уровень полезной нагрузки, исследование влияния которого тоже весьма фрагментарно встречается в публикациях. Таким образом, важнейшие вопросы, связанные с необходимостью учёта конструктивных и нагрузочных факторов для несущих стержневых систем видятся всё более актуальными в связи с повышающимися год от года требованиями по обеспечению механической безопасности при аварийных воздействиях.

Целью исследования, описанного в данной статье, является разработка методики более строгой оценки соответствия требованиям особого предельного состояния железобетонных каркасов при внезапных структурных перестройках, вызванных начальными локальными разрушениями, с учётом неупругой податливости узловых соединений стержневых элементов в зависимости от вида разрушения (хрупкое или пластическое). Основным отличием предлагаемого подхода от методов, разработанных ранее, является использование специальных нелинейных конечных элементов, учитывающих степень податливости узла, основой которой служат результаты проведённых экспериментальных исследований как конструкционных материалов [4; 17; 24–26], так и конструктивных систем при особых аварийных воздействиях.

Модель монолитного железобетонного каркаса

В качестве объекта исследования рассмотрены несколько рамных железобетонных каркасов, расчётная модель которых изображена на рисунке 1. Каркас имеет три уровня и два пролёта, что в должной мере позволяет анализировать поведение несущих элементов при прогрессирующем обрушении. Проанализировано четыре модели: C1_Ж – рама с жёстким узловым сопряжением элементов, разрушение пластическое ($\xi < \xi_R$); C1_П – рама с податливым узловым сопряжением элементов, разрушение пластическое ($\xi < \xi_R$); C2_Ж – рама с жёстким узловым сопряжением элементов, разрушение хрупкое ($\xi > \xi_R$); C2_П – рама с податливым узловым сопряжением элементов, разрушение хрупкое ($\xi > \xi_R$).

Модели рам выполнены из бетона класса В30. Расположение арматуры в теле бетона изображено на рисунке 1 б. Размер поперечного сечения колонн и ригелей 100×100 мм. Рассмотрено два варианта армирования. Поперечное армирование во всех вариантах выполнено в виде хомутов с шагом 50 мм в опирных зонах и 100 мм в пролётных, арматура

Ø4A500C. Сечение колоны во всех вариантах имеет симметрично расположенную арматуру Ø8A500C. Сечение ригеля в первом варианте имеет также симметрично расположенную арматуру Ø8A500C, а во втором варианте в растянутую зону опирных участков ригеля (1/4 пролёта) дополнительно устанавливаются ещё два стержня Ø8A500C, тем самым увеличивая несущую способность сечения и изменяя характер разрушения на хрупкий, так как относительная высота сжатой зоны сечения (ξ) больше граничной (ξ_R). Для качественной оценки поведения конструкции прочностные и деформационные характеристики материалов задавались в нелинейной интерпретации.

Нагрузочные параметры в виде сосредоточенных сил, расположенных на расстоянии 1/3 пролёта, подбирались итерационным методом, исходя из предельных значений несущей способности сечения с учётом коэффициента безопасности в соответствии с ГОСТ 8829-2018² и коэффициента надёжности по нагрузке (СП 20.13330.2018).

Степень податливости узловых соединений была учтена работой одноузловых конечных элементов (КЭ) с помощью

² ГОСТ 8829-2018. Межгосударственный стандарт «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жёсткости и трещиностойкости (<https://docs.cntd.ru/document/1200163873>).

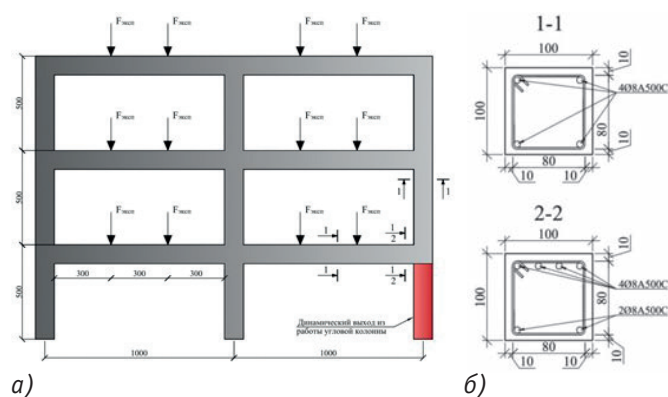


Рис. 1. Исходные данные для моделирования: а) расчётная схема железобетонной рамы, б) армирование элементов рамы

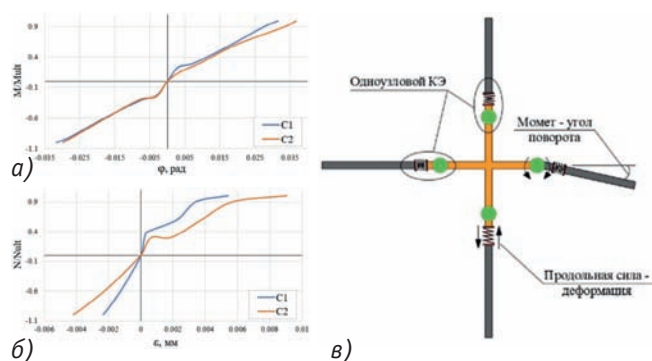


Рис. 2. Учёт податливости узлового сопряжения: а) диаграмма «момент – угол поворота», б) диаграмма «продольная сила – деформация», в) интерпретация действительной работы узлового сопряжения (КЭ-представление)

диаграмм «момент–угол поворота», «поперечная сила–деформация» (рис. 2). Построение диаграмм осуществлялось согласно основному методу действующего свода правил по проектированию железобетонных конструкций (СП 20.13330.2018), при этом переход от эпюры напряжений в бетоне и арматуре к обобщённым внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Параметры податливости углового сопряжения были установлены для двух вариантов армирования.

Предварительно производился модальный анализ конструкции с учётом удаления угловой колонны для рамы с первым и вторым вариантами армирования. Изгибная и осевая жёсткости задавались исходя из принятых сечений. Погонная масса определялась в зависимости от уровня нагружения.

Для динамического анализа необходимо было учесть демпфирование с использованием коэффициентов Реллея. Коэффициенты α и β определяются исходя из собственных колебаний конструкции, а именно – круговые частоты для двух противоположных форм колебания (рис. 3).

Общая форма системы уравнений для определения коэффициентов Реллея имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 2\zeta_1\omega_1 = \alpha + \beta\omega_1^2 \\ 2\zeta_2\omega_2 = \alpha + \beta\omega_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

Предположив, что коэффициент демпфирования $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta = 0,1$, получили:

$$\alpha = 2\zeta\omega_1 \frac{\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\zeta}{(\omega_1 + \omega_2)}. \quad (3)$$

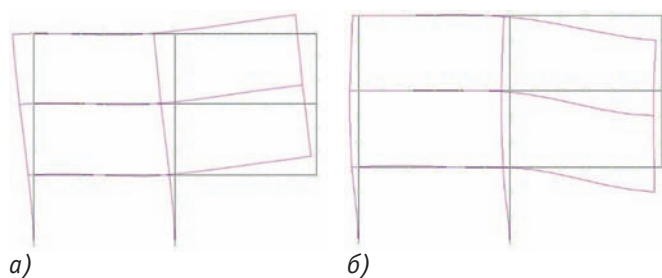


Рис. 3. Собственные формы колебания конструкции: а) первая форма, б) вторая форма

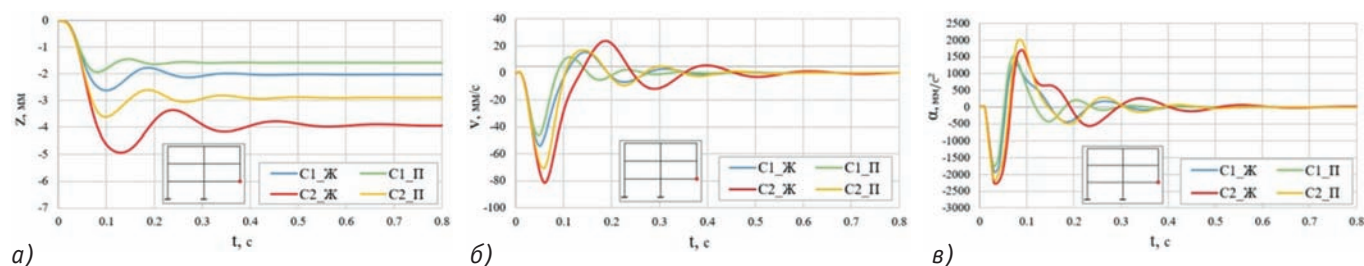


Рис. 4. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) при уровне относительной нагрузки $0,3 M_{\text{эксп}}$

Тогда для рам с пластичным характером разрушения коэффициенты будут равны:

$$\alpha = 2 \cdot 0,1 \cdot 19,351 \frac{37,993}{(19,351 + 37,993)} = 2,564;$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,1}{(19,351 + 37,993)} = 0,003488.$$

Для рам с хрупким характером разрушения коэффициенты будут равны:

$$\alpha = 2 \cdot 0,1 \cdot 14,800 \frac{29,274}{(14,800 + 29,274)} = 1,966;$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,1}{(14,800 + 29,274)} = 0,004538.$$

Оценка опасного аварийного воздействия в конструкции выполняется динамическим методом. Для этого удаляемому элементу (угловая колонна нижнего яруса) задавалось время отказа, численно равное $0,1T$ (где T – период колебаний конструкции при удаленном элементе для первой формы).

Анализ полученных результатов исследования

Расчётный анализ производился на уровне нагружения, соответствующем уровню от $0,3 M_{\text{эксп}}$ до $0,9 M_{\text{эксп}}$ для моделей рам при отказе угловой колонны первого этажа.

В результате выполненного расчётного анализа был установлен характер изменения во времени внутренних усилий для наиболее нагруженных изгибаемых элементов конструктивной системы (см. рис. 1). На обозначенных рисунках ниже напряжённое состояние представлено в относительном виде для более качественной и количественной оценки исследуемых процессов. Наиболее интересными являются элементы, получившие наибольшее динамическое догружение: 1 – участок ригеля, примыкающий к неразрушенной колонне; 2 – приопорный участок ригеля над удаляемой колонной; 3 – узел над удаляемой колонной.

Уровень нагрузки, соответствующий $0,3 M_{\text{эксп}}$

При анализе динамических характеристик рамы при отказе крайней колонны первого этажа при относительно низком уровне эксплуатационной нагрузки $0,3 M_{\text{эксп}}$ (рис. 4.) отмечаются упругие перемещения с затухающими колебаниями, где значение наименьшего перемещения лежит в интервале $1/500$ расчётного пролёта для симметрично армированного

сечения ригеля с податливым соединением элементов до 1/200 для переармированного сечения с жёстким соединением конструктивных элементов.

Максимальные значения скоростей отмечаются на 0,05 с от момента выключения колонны и находятся в пределах от 45 м/с до 80 м/с. Ускорение узла, расположенного над удалённой колонной, для всех рассмотренных типов армирования и видов сопряжения конструктивных элементов находится в интервале от 1750 м/с² до 2250 м/с². Показательным является относительно стабильный уровень ускорения в интервале от 0,12 до 0,17 с от момента аварийного воздействия. Очевидно, что в рассматриваемый момент система двигалась с равным ускорением, и происходило рассеивание энергии по поглощению колебательного процесса.

При уровне относительной нагрузки, соответствующей 0,3 $M_{\text{эксп}}$ (рис. 5.), в элементе ригеля, примыкающего к неразрушенной колонне, догружение составляет 0,47 M_{ult} для симметрично армированного сечения, и 0,51 M_{ult} для переармированного, причём для последнего отмечается более позднее достижение амплитудного значения с разницей в 0,02 с, что обусловлено его большей несущей способностью. Колебательный процесс завершается в момент времени 0,52 с, при этом напряжённое состояние обоих видов рассмотренных сечений находится на уровне, не превышающем 0,6 M_{ult} . Продольные силы получают шестикратное приращение для симметричного сечения при учёте податливости узловых соединений. Наибольшее приращение достигается в этом же сечении, но при жёстком сопряжении конструктивных элементов (почти в девять раз). После затухания колебательного процесса отмечается двукратное различие продольных сил для модели, с учетом податливости узловых соединений и без таковых. Динамическое догружение увеличивает поперечную силу в 1,3 раза для сечений С1 и в 2 раза для сечений С2, что объясняется большим абсолютным уровнем нагрузки.

При анализе характера изменения изгибающих моментов во времени в сечении рядом с удалённой колонной установлено 12-кратное приращение для сечения С1 и 9-кратное – для сечения С2. После прекращения колебаний, напряжённое состояние устанавливается в диапазоне от 0,46 M_{ult} до 0,5 M_{ult} – для симметрично армированных сечений, и от 0,3 M_{ult} до 0,4 M_{ult} для переармированных сечений соответственно. Также для сечения, примыкающего к удаляемой колонне, продольная сила вследствие отсутствия опорной реакции уменьшается почти до нулевого значения.

Уровень нагрузки, соответствующий 0,6 $M_{\text{эксп}}$

При относительном уровне нагрузки, соответствующей 0,6 $M_{\text{эксп}}$ (рис. 6.), колебательный процесс носит иной характер. Амплитудные значения перемещений для неперармированных сечений растут пропорционально увеличению уровня относительной нагрузки. Наименьшим периодом колебаний обладает симметрично армированная система при учёте податливости узлов, в то время как переармированное сечение с жёстким сопряжением узлов показывает увеличение периода колебаний в два раза, а приращение значений амплитудных перемещений – в 2,3 раза, что объясняется большими значениями колеблющихся масс (что объясняется большими значениями колеблющихся масс) при незначительном увеличении изгибной жесткости [$EI_{(1)}=345,51$ кН/м² и $EI_{(2)}=405,84$ кН/м²].

Показательной является и динамика изменения начальных скоростей и ускорения. Для симметрично армированной рамы с податливыми узлами начальная скорость перемещения узла над удалённой колонной будет на 50% меньше, чем для переармированной с жёстким сопряжением несущих элементов. Остальные значения находятся в обозначенных пределах. Анализируя характер изменения ускорений, можно отметить, что он на первом полупериоде колебаний почти не отличается для всех рассмотренных моделей, но, начиная с

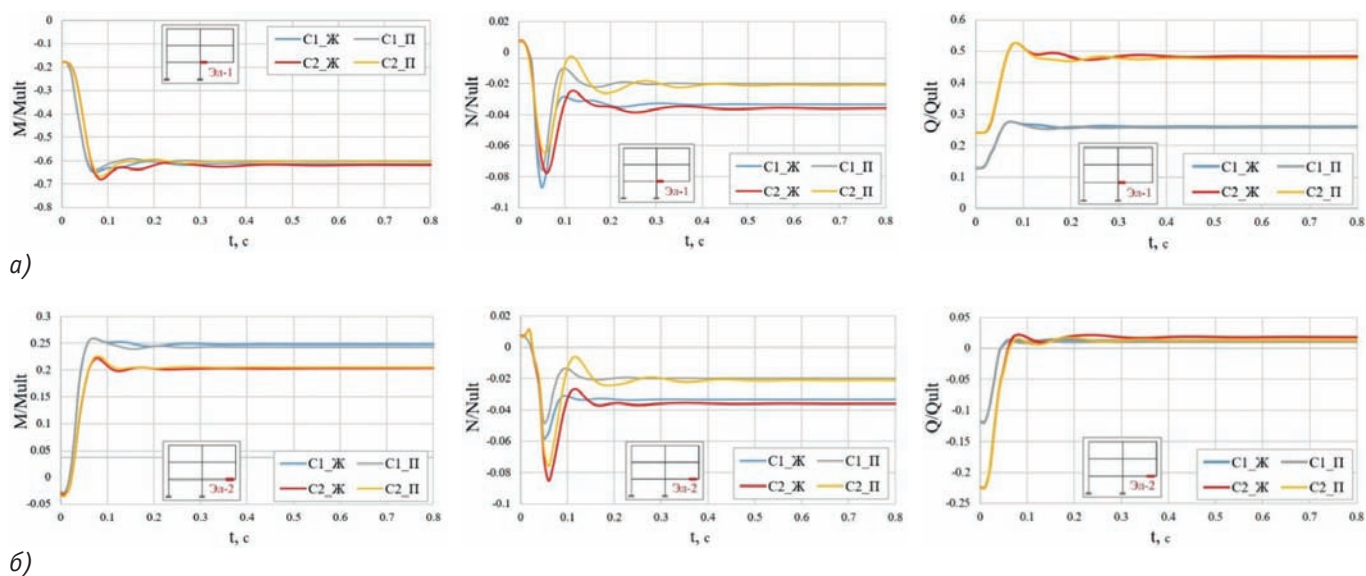


Рис. 5. Изменение во времени внутренних усилий при уровне относительной нагрузки 0,3 $M_{\text{эксп}}$: а) приопорный участок ригеля, примыкающий к неразрушенной колонне (Эл-1); б) приопорный участок ригеля над удаляемой колонной (Эл-2)

0,1 секунды, вследствие затухания колебаний растёт период и уменьшается значение ускорения. В интервале 0,1–0,2 с для переармированных сечений видим схожий характер изменения их поведения по времени ($\xi < \xi_{kr}$), хотя для сечений, в которых выполняется условие $\xi < \xi_{kr}$ расхождения начинаются уже с 0,12 секунды (а потом идут расхождения, которые для сечений с симметричной арматурой начинаются уже с 0,12 с).

При уровне относительной нагрузки, соответствующей 0,6 $M_{эксп}$ в элементах, примыкающих к неразрушенной колонне, характер изменения внутренних усилий отличается от рассмотренного ранее. Динамическое догружение сечений С1 составляет 3,4 раза, а для сечений С2 – 3,7 раза, после чего колебательный процесс для переармированных сечений заканчивается в момент времени 0,1 с с превышением несущей способности в 1,4 раза, в то время как для симметрично армированных сечений колебательный процесс завершается через 0,4 с после аварийного воздействия при уровне догружения 1,2 M_{ult} . Продольные силы в сечениях С1 увеличиваются в 20 раз, в сечениях С2 – в 15 раз, при том отмечается трёхкратное различие в амплитудных значениях установившегося значения продольных сил после затухания колебаний. Поперечные силы при учёте податливости соединения находятся на уровне 0,5 Q_{ult} , при жёстком сопряжении данный показатель увеличивается в 2,2 раза.

Изгибающий момент для сечений, примыкающих к разрушенной колонне, увеличивается в 5,5 раз для С2 и в 6,5 раз для С1. При анализе изменения поперечных усилий наблюдается картина аналогичная уровню нагружения 0,3 $M_{эксп}$, которая отличается лишь в амплитудных значениях от 0,5 Q_{ult} для сечений С1 и 1,1 Q_{ult} – для сечений С2.

Уровень нагрузки, соответствующий 0,9 $M_{эксп}$

Рассматривая особенности перемещений узла над удалённой колонной при предельном значении нагрузочных параметров, составляющих 0,9 $M_{эксп}$ (рис. 8.) можно отметить, что он кардинально отличается от двух рассмотренных ранее, в частности, полностью отсутствует колебательный процесс, что объясняется разрушением сечений несущих элементов и наступлением прогрессирующего обрушения для рамы с переармированными сечениями вследствие раздробления бетона сжатой зоны и появлению шарниров, что подтверждается экспериментальными исследованиями авторов [31–33] и других исследователей [14; 16].

Особый интерес в этой связи представляет характер изменения начальных скоростей, находящихся в интервале от 140 мм/с до 250 м/с, что на 50–66 % больше, чем при уровне нагрузки 0,6 $M_{эксп}$ и в три раза выше, чем при нагрузочном уровне 0,3 $M_{эксп}$.

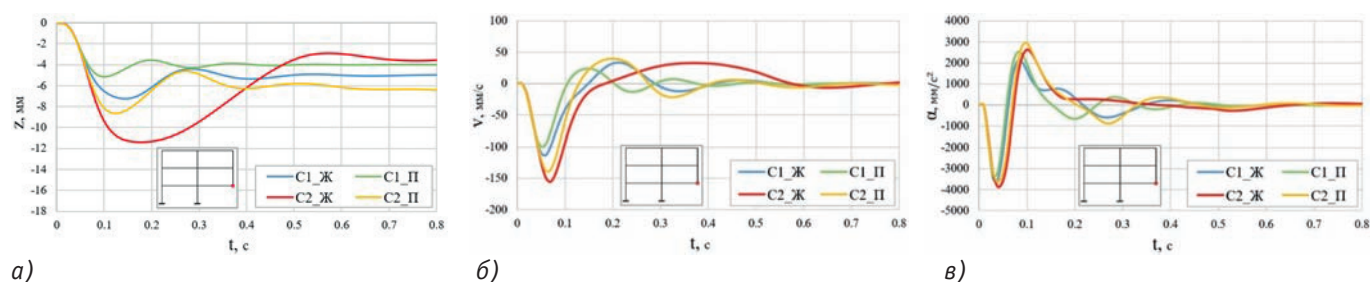


Рис. 6. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) при уровне относительной нагрузки 0,6 $M_{эксп}$

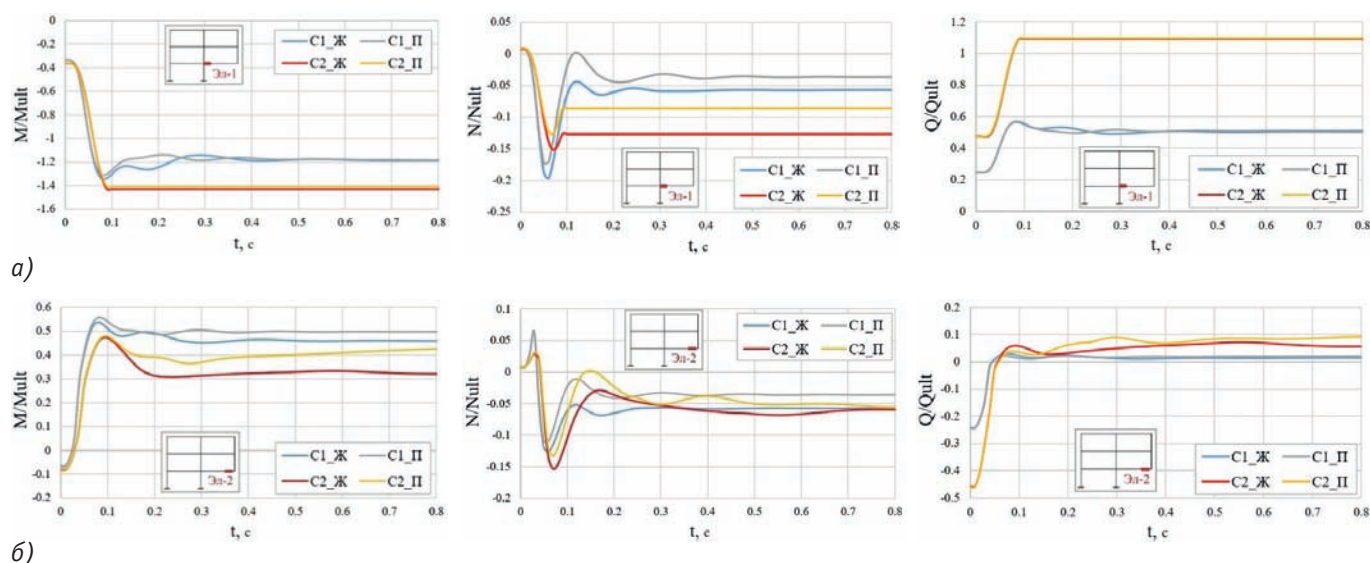


Рис. 7. Изменение во времени внутренних усилий при уровне относительной нагрузки 0,6 $M_{эксп}$: а) приопорный участок ригеля, примыкающий к неразрушенной колонне (Эл-1); б) приопорный участок ригеля над удаляемой колонной (Эл-2)

При уровне нагрузки, соответствующей $0,9 M_{\text{эксп}}$ (рис. 9) в Эл-1 происходит увеличение изгибающего момента в 4,2 и 4,5 раза для сечений С2 и С1 соответственно. При этом уровень напряжённого состояния для симметричных сечений составляет $1,6 M_{\text{ult}}$ и $1,75 M_{\text{ult}}$ для перестроированных сечений. Значительно отличается характер изменения продольных усилий: приращение для сечений С1 в момент времени 0,08 с составляет $0,35 N_{\text{ult}}$ с последующим уменьшением до значения $0,1 N_{\text{ult}}$ в момент времени 0,6 с; для сечения С2 приращение составляет $0,35 N_{\text{ult}}$ – при учёте податливости, и $0,16 N_{\text{ult}}$ – при жёстком сопряжении в момент времени 0,1 с вследствие превращения системы в геометрически изменяемую. Поперечные силы достигают уровня $0,7 Q_{\text{ult}}$ – для сечения С1, и $1,2 Q_{\text{ult}}$ – для сечения С2, что свидетельствует о разрушении как нормального, так и наклонного сечения.

При рассмотрении напряжённого состояния в элементе Эл-2 отмечается в среднем 10-кратное приращение изгибающего момента в сечениях С1 и 5-кратное в сечениях С2. Анализ изменения продольных усилий показывает снижение их до нулевого значения для сечений С2 с уровня $0,75 Q_{\text{ult}}$ для сечения С1 – с уровня $0,37 Q_{\text{ult}}$. Особый интерес представляет значительно отличающийся от всех рассмотренных ранее характер изменения продольных усилий в ригеле, в котором, в зависимости от степени сопряжения

узлов и количества продольной арматуры, устанавливается различный уровень напряжений в интервале от $0,06 N_{\text{ult}}$ до $0,22 N_{\text{ult}}$.

Заключение

Предложена методика более строгой оценки параметров напряжённо-деформированного состояния в конструктивно и физически нелинейных системах железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при структурных перестройках, вызванных особыми воздействиями. Установлена степень влияния уровня эксплуатационной нагрузки и характера сопряжения конструктивных элементов на характер измене.

Полученные результаты позволяют отметить, что учёт податливости узлов оказывает значительное влияние на оценку критериальных показателей особого предельного состояния, особенно в сечениях, разрушение которых происходит по бетону, и находится в интервале от 30% до 45% в зависимости от уровня эксплуатационной нагрузки.

В менее значительной степени учёт податливости узловых соединений оказывает влияние на параметры напряжённого состояния, не меняя количественный характер амплитудных значений действующих усилий, но показывая различный характер изменения их во времени.

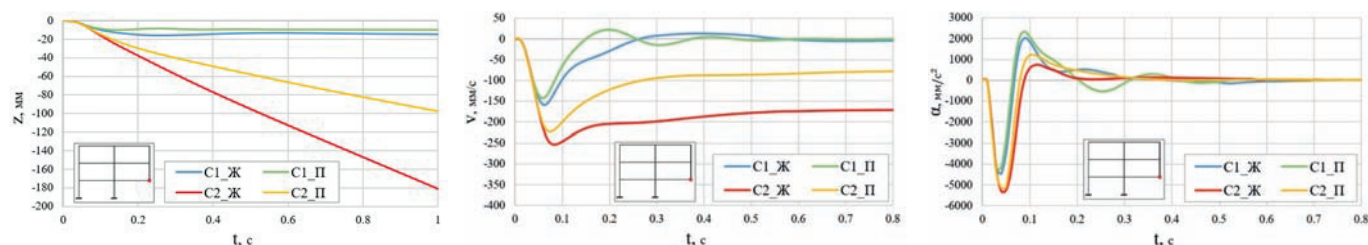


Рис. 8. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) при уровне относительной нагрузки $0,9 M_{\text{эксп}}$

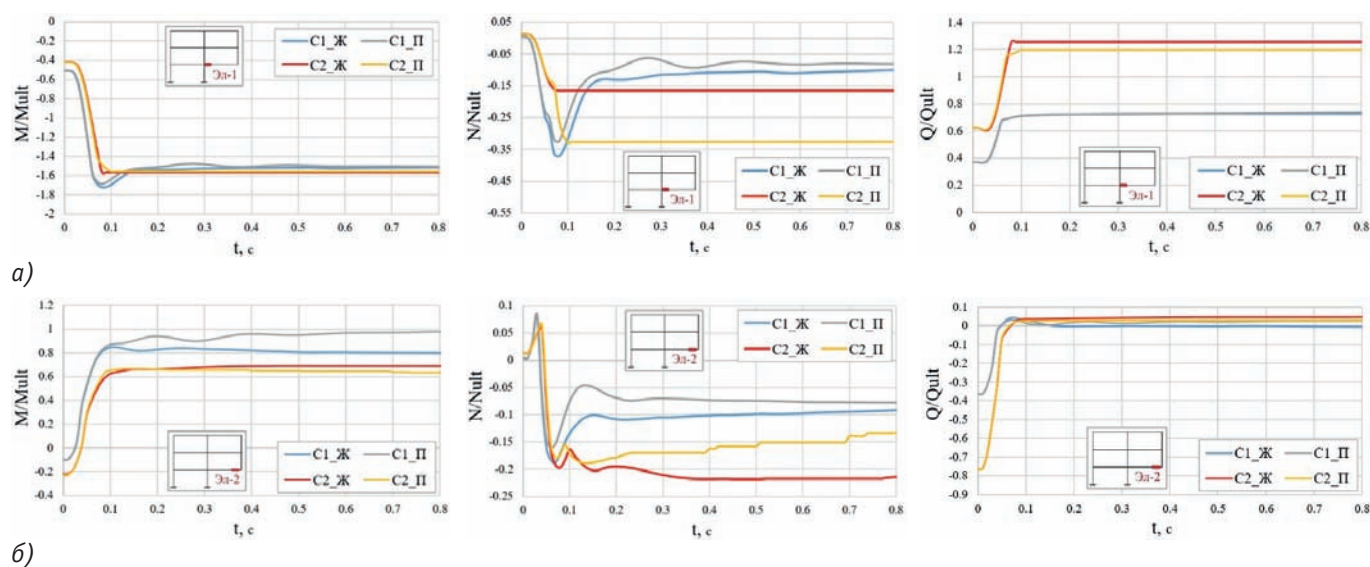


Рис. 9. Изменение во времени внутренних усилий при уровне относительной нагрузки $0,9 M_{\text{эксп}}$: а) приопорный участок ригеля, примыкающий к неразрушенной колонне (Эл-1); б) приопорный участок ригеля над удаляемой колонной (Эл-2)

Список источников

1. Колчунов, В.И. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований / В.И. Колчунов, Т.А. Ильюшенко, Н.В. Федорова [и др.] – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3 (113). – С. 31–71.
2. Колчунов, В.И. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях / В.И. Колчунов, О.Б. Бушова, П.А. Кореньков – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 18–28.
3. Колчунов, В.И. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях / В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, Д.Г. Фан. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 11. – С. 1462–1472.
4. Федорова, Н. В. Анализ нелинейного статико-динамического деформирования железобетонных рам в запредельных состояниях / Н.В. Федорова, Н.Т. Ву, М.Д. Медянкин – Текст : непосредственный // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (64). – С. 11–24.
5. Определение динамических усилий в сложнапряжённых элементах железобетонных рам при особом воздействии / Н.В. Федорова, В.С. Московцева, М.А. Амелина, А.И. Демьянов. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15. – Текст : электронный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 2 (770). – С. 5–15.
6. Nguyen, Van Hung. Progressive Collapse Behaviour of Earthquake-Damaged Interior Precast Concrete Joints with Headed Bars and Plastic Hinge Relocation / Van Hung Nguyen, Kang Hai Tan. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 306. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
7. Hamid, Mirzahosseini. Progressive Collapse Assessment of Reinforced Concrete (RC) Buildings with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) / Hamid Mirzahosseini, S. Mohammad Mirhosseini, Ehsanollah Zeighami. – Текст : электронный // Structures. – 2023. – Vol. 49. – P. 139–151. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
8. Haoran, Wang. Progressive Collapse Resistance of Self-Centering Infilled Precast Concrete Frame under Side Column Removal Scenario / Haoran Wang, Shuang Li, Changhai Zhai, Sidi Shan – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 301. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
9. Yintong, Bao. Performance of Precast Concrete Beam-Column Joint with a Hidden Corbel under Progressive Collapse Scenarios / Yintong Bao, Kang Hai Tan – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 267. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622007738?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
10. Effect of Three-Dimensional Space on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Frames under Various Column Removal Scenarios / Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou [и др.]. – Текст : электронный // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 90. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224009732?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
11. On the Progressive Collapse Performance of RC Frame Structures under Impact Column Removal / Fan Yi, Wei-Jian Yi, Jing-Ming Sun [и др.]. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 307. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624004887?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).
12. Numerical Predictions of Progressive Collapse in Reinforced Concrete Beam-Column Sub-Assemblages: a Focus on 3D Multiscale Modeling / Xu Long, Percy M. Iyela, Yutai Su, Meklit M. Atlaw, Shao-Bo Kang. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 315. (дата обращения 14.05.2025).
13. 2D-Linear Static and Non-Linear Dynamic Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Building / S. Gowtham, M. Prakash, N. Parthasarathi, K.S. Satyanarayanan, V. Thamilarasu. – Текст : электронный // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, Iss. 2, Part 3. – P. 8775–8778. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624010472?via%3Dihub> 3 (дата обращения 14.05.2025).
14. Колчунов, В.И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии / В.И. Колчунов, В.Н. Туен, Д.И. Нижегородов – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 10. – С. 1337–1345.
15. Колчунов, В.И. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах / В.И. Колчунов, Н.В. Федорова, С.Ю. Савин – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 9. – С. 42–51.
16. Колчунов, В.И. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях / В.И. Колчунов, В.В. Тур – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 5–15.
17. Фёдорова, Н.В. Экспериментальное определение параметров статико-динамического деформирования бетона при режимном нагружении / Н.В. Фёдорова, М.Д. Медянкин, О.Б. Бушова – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 3. – С. 72–81.
18. Alekseytsev, A. Numerical Analysis of the Buried Fiber Concrete Slabs Dynamics under Blast Loads / A. Alekseytsev, S. Sazonova. – DOI 10.34910/MCE.117.3. – Текст : электронный // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – № 1 (117). – P. 11703. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/numerical-analysis-of-the-buried-fiber-concrete-slabs-dynamics-under-blast-loads> (дата обращения 14.05.2025).

19. Korenkov, P. A. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard / P. A. Korenkov, S. R. Meliksetyan – Текст : электронный // E3S Web Conf. 533 02004. – 2024. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/63/e3sconf_form2024_02004.pdf (дата обращения 14.05.2025).

20. Experimental Investigation on Progressive Collapse Performance of Prestressed Precast Concrete Frames with Dry Joints / Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi [и др.]. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2021. – Volume 246. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621012086?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).

21. Hong-wei, Zhang. Seismic Behavior Test and Plastic Hinge Theory for HRB500 Prefabricated Steel Reinforcement Cage-Cast-in-Situ Concrete Columns / Hong-wei Zhang, Guo-liang Bai, Fa-jiang Luo [и др.]. – Текст : электронный // Structures. – 2024. – Vol. 62. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012424003655> (дата обращения 14.05.2025).

22. Seok Jun, Ju. Analytical Model for Progressive Collapse of RC Frame Structures Subjected to Blast Loadings / Seok Jun Ju, Hyo-Gyoung Kwak. – Текст : электронный // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 71. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223006538?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).

23. Xiao, Lu. Self-Centering Friction Beam-Column Joint: A Promising Approach to Seismic and Progressive Collapse Resilience / Xiao Lu, Hang Xu, Longhe Xu – Текст : электронный // Structures. – 2024. – Vol. 65. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012424008956?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025).

24. Медянкин, М.Д. Испытание бетонных элементов, армированных композитной неметаллической арматурой на действие изгибающей нагрузки. Анализ полученных результатов / М.Д. Медянкин, А.Т. Фаизова. – Текст : непосредственный // International Innovation Research : сборник статей X Международной научно-практической конференции. Пенза, 07 августа 2017 г. – Пенза : Наука и Просвещение, 2017. – С. 45–47.

25. Фёдорова, Н.В. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона / Н.В. Федорова, М.Д. Медянкин, О.Б. Бушова. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 1. – С. 4–11.

26. Савин, С.Ю. Деформирование фибробетона при однократном динамическом воздействии с учетом влияния начальных напряжений от статической нагрузки / С.Ю. Савин, М.Д. Медянкин, М.З. Шарипов. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 76–88.

References

1. Kolchunov V.I., Il'yushchenko T.A., N. V. Fedorova [et al.] Zhivuchest' konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzhenii: analiticheskii obzor issledovaniy [Structural Robustness: an Analytical Review]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2024, no. 3 (113), pp. 31–71 (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Koren'kov P.A. Deformirovanie i razrushenie zhelezobetonnykh ram s rigelyami, armirovannymi naklonnymi sterzhnyami, pri osobykh vozdeistviyakh [Methods of Experimental and Numerical Studies of Reinforced Concrete Frames of Multi-Storey Buildings under Special Influences]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2022, no. 1 (99), pp. 18–28. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Kolchunov V.I., Koren'kov P.A., Fan D.G. Osoboe predel'noe sostoyanie v zhelezobetonnykh karkasakh s uzlamy, usilennymi kosvennym armirovaniem pri avariinykh vozdeistviyakh [A Special Limit State of Reinforced Concrete Frames with Laterally Reinforced Nodes in the Case of Emergency Impacts]. In: *Vestnik MGSU*, 2021, Vol. 16, no 11, pp. 1462–1472. (In Russ., abstr. in Engl.)

4. Fedorova N.V., Vu N.T., Medyankin M.D. Analiz nelineinogo statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnykh ram v zapredel'nykh sostoyaniyakh [Analysis of Nonlinear Static-Dynamic Deformation of Reinforced Concrete Frames in Out-of-Limit States]. In: *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury [Russian Journal of Building Construction and Architecture]*, 2021, no. 4 (64), pp. 11–24. (In Russ., abstr. in Engl.)

5. Fedorova N.V., Moskovtseva V. S., Amelina M.A., Dem'yanov A.I. Opredelenie dinamicheskikh usilii v slozhnonapryazhennykh elementakh zhelezobetonnykh ram pri osobom vozdeistvii [Determination of Dynamic Forces in Complexly Stressed Elements of Reinforced Concrete Frames under Special Impact]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]*, 2023, no. 2 (770), pp. 5–15. DOI 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Van Hung Nguyen, Kang Hai Tan Progressive Collapse Behaviour of Earthquake-Damaged Interior Precast Concrete Joints with Headed Bars and Plastic Hinge Relocation. In: *Engineering Structures*, 2024, Vol. 306. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)

7. Hamid Mirzahosseini, . Mohammad Mirhosseini, Ehsanollah Zeighami. Progressive Collapse Assessment of Reinforced Concrete (RC) buildings with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC). In: *Structures*, 2023, Vol. 49, pp. 139–151. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)

8. Haoran Wang, Shuang Li, Changhai Zhai, Sidi Shan. Progressive Collapse Resistance of Self-Centering Infilled Precast Concrete Frame under Side Column Removal Scenario. In: *Engineering Structures*, 2024, Vol. 301. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)

9. Yintong Bao, Kang Hai Tan. Performance of Precast Concrete Beam-Column Joint with a Hidden Corbel under Progressive Collapse Scenarios. In: *Engineering Structures*, 2022, Vol. 267. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622007738?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)

10. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou [et al.]. Effect of Three-Dimensional Space on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Frames under Various Column Removal Scenarios. In: *Journal of Building Engineering*, 2024, Vol. 90. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224009732?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
11. Fan Yi, Wei-Jian Yi, Jing-Ming Sun [et al.]. On the Progressive Collapse Performance of RC Frame Structures under Impact Column Removal. In: *Engineering Structures*, 2024, Vol. 307. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624004887?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
12. Xu Long, Percy M. Iyela, Yutai Su, Numerical Predictions of Progressive Collapse in Reinforced Concrete Beam-Column Sub-Assemblages: A Focus on 3D Multiscale Modeling. In: *Engineering Structures*, 2024, Vol. 315. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624010472?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
13. Gowtham S., Prakash M., Parthasarathi N., Satyanarayanan K.S., Thamilarasu V. 2D-Linear Static and Non-Linear Dynamic Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete. In: *Materials Today: Proceedings*, 2018, Vol.5, Iss. 2, Part 3, pp. 8775–8783. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624010472?via%3Dihub> 3 (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
14. Kolchunov V. I. V. N. Tuen, D. I. Nizhegorodov Dinamicheskii otklik konstruktivnoi sistemy zdaniya s konechnym chislom stepenei svobody pri osobom vozdествii [Dynamic Response of the Building Construction System with a Finite Degree of Freedom under a Special Action]. In: *Vestnik MGSU*, 2021, Vol., no. 10, pp. 1337–1345. (In Russ., abstr. in Engl.)
15. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu. Dinamicheskie efekty v staticheskii neopredelimykh fizicheskii i konstruktivno nelineinykh sistemakh. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2022, no. 9, pp. 42–51. (In Russ., abstr. in Engl.)
16. Kolchunov V.I., Tur V.V. Napravleniya proektirovaniya konstruktivnykh sistem v osobyykh raschetnykh situatsiyakh [Directions for the Design of Structural Systems in Accidental Design Situations]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2023, no. 7, pp. 5–15. (In Russ., abstr. in Engl.)
17. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Eksperimental'noe opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona pri rezhimnom nagruzhении [Experimental Determination of the Parameters of the STATIC-Dynamic Deformation of Concrete under Loading Modal]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2020, no.3, pp. 72–81. (In Russ., abstr. in Engl.)
18. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast loads. In: *Magazine of Civil Engineering*, 2023, no. 1 (117), pp. 11703. DOI 10.34910/MCE.117.3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/numerical-analysis-of-the-buried-fiber-concrete-slabs-dynamics-under-blast-loads> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
19. Korenkov P.A., Meliksetyan S.R. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard. In: *E3S Web Conf.* 533 02004, 2024. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/63/e3sconf_form2024_02004.pdf (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
20. Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi [et al.]. Experimental Investigation on Progressive Collapse Performance of Prestressed Precast Concrete Frames with Dry Joints. In: *Engineering Structures*, 2021, Vol. 246. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621012086?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
21. Hong-wei Zhang, Guo-liang Bai, Fa-jiang Luo [et al.]. Seismic Behavior Test and Plastic Hinge Theory for HRB500 prefabricated Steel Reinforcement Cage-Cast-in-Situ Concrete Columns. In: *Structures*, 2024, Vol. 62. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012424003655> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
22. SeokJun Ju, Hyo-Gyoung Kwak. Analytical Model for Progressive Collapse of RC Frame Structures Subjected to Blast Loadings. In: *Journal of Building Engineering*, 2023, Vol. 71. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223006538?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
23. Xiao Lu., Hang Xu, Longhe Xu. Self-Centering Friction Beam-Column Joint: A Promising Approach to Seismic and Progressive Collapse Resilience. In: *Structures*, 2024, Vol. 65. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012424008956?via%3Dihub> (Accessed 05/14/2025). (In Engl.)
24. Medyankin M.D., Faizova A.T. Ispytanie betonnykh elementov, armirovannykh kompozitnoi nemetallicheskoj armaturoi na deistvie izgibayushchei nagruzki. Analiz poluchennykh [The Test Concrete Members with Fiber-Reinforced Composite Was Numetal Is Symbolic Reinforcement to the Action of Bending Loads. Analysis of the Obtained Results]. In: *International Innovation Research, Collection of articles of the X International scientific and practical conference*. Penza, August 7, 2017. Penza, Nauka i Prosveshchenie Publ, 2017, pp. 45–47. (In Russ., abstr. in Engl.)
25. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of Static-Dynamic Deformation Parameters of Concrete]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2020, no. 1, pp. 4–11. (In Russ., abstr. in Engl.)
26. Savin S.Yu., Medyankin M.D., Sharipov M.Z. Deformirovanie fibrobetona pri odnokratnom dinamicheskom vozdествii s uchetom vliyaniya nachal'nykh napryazhenii ot staticheskoi nagruzki [Deformation OF Fiber Concrete under a Single Dynamic Impact Taking into Account the Influence of Initial Stresses from the Static Load]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2022, no. 1 (99), pp. 76–88. (In Russ., abstr. in Engl.)