

15. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. *Raschetnie modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [Design models of force resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV; 2004, 472 p.

16. Grozdov V. T. Eksperimentalnoe issledovanie raspredeleniya deformatsii v armature i betone na uchastkakh mezhdru treshchinami izgibaemikh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental study of the distribution of deformations in reinforcement and concrete in areas between cracks of bent reinforced concrete elements under short-term dynamic loading]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1997, no. 5, pp. 10–13.

17. Khakimov Sh. A. Osobennosti treshchينوobrazovaniya v balkakh s razlichnoi tolshchinoi zashchitnogo sloya betona [Features of crack formation in beams with different thicknesses of the protective layer of concrete]. *Vozdeistvie staticheskikh, dinamicheskikh i mnogokratno povtoryayushchikhsya nagruzok na beton i elementi zhelezobetonnykh konstruksii* [The Impact of Static, Dynamic and Repeated Loads on Concrete and Elements of Reinforced Concrete Structures]. Moscow: Stroyizdat; 1972, pp. 65–86.

18. Plotnikov A. I. *Dinamika uprugoplasticheskikh zhelezobetonnykh balok pri deistvii intensivnykh kratkovremennykh nagruzok avariinogo kharaktera* [Dynamics of elastic-plastic reinforced concrete beams under the action of intense short-term emergency loads]. Moscow; 1994, 375 p.

19. Balushkin A. L. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov na uchastkakh mezhdru diskretnimi treshchinami [Modeling of intensely deformed condition of reinforced members in the zones between discrete cracks]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2010, no. 4 (25), pp. 43–47.

20. Trekin N. N., Kodysh E. N., Shmakov S. D. et al. Fakticheskoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonного элемента na razlichnykh etapakh nagruzheniya [Actual stress-strain state of a reinforced concrete bending element at various stages of loading]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 5 (630), pp. 30–41. DOI: 10.37538/0005-9889-2025-5(630)-30-41.

© С. Д. Шмаков

**Ссылка для цитирования:**

Шмаков С. Д. Исследование методов расчета предельного значения несущей способности изгибаемого железобетонного элемента // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 60–69.

УДК 69.07, 624.046, 624.943.3  
DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-69-75

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ  
В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМАХ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*С. Р. Меликестян, П. А. Кайдас*

**Меликестян Сергей Романович**, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

**Кайдас Павел Анатольевич**, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru

В статье представлены результаты конечно-элементного моделирования четырех серий монолитных железобетонных рам, различающихся схемами армирования. Выполнен сравнительный анализ податливости узловых сопряжений в условиях аварийного нагружения. Нагрузочные и жесткостные характеристики назначались на основе несущей способности расчетных сечений. В качестве диагностических областей рассмотрены опорные зоны ригеля над удаляемой средней и крайней колоннами. Оценивалось изменение изгибающих моментов и параметров трещинообразования. Численные эксперименты подтвердили определяющее влияние исходного уровня статического нагружения, конструктивного армирования и податливости узлов на динамическую трещиностойкость рамных систем. Полученные данные могут быть использованы для оценки живучести зданий и сооружений при запроектных воздействиях.

**Ключевые слова:** монолитные рамные каркасы, сложное напряженно-деформированное состояние, аварийное воздействие, конечно-элементное моделирование.

**REDISTRIBUTION OF FORCES AND CRACK FORMATION IN REINFORCED CONCRETE FRAMES  
UNDER ACCIDENTAL IMPACTS**

*S. R. Melikestyan, P. A. Kaydas*

**Meliksetyan Sergey Romanovich**, Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russian Federation, phone: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

**Kaydas Pavel Anatolyevich**, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Russian Federation, phone: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru

This article presents the results of finite element modeling for four series of monolithic reinforced concrete frames with different reinforcement patterns. A comparative analysis of the joint compliance under emergency loading conditions is per-

formed. Load and stiffness characteristics were assigned based on the bearing capacity of the design sections. The beam support zones above the removed middle and outer columns are considered as diagnostic areas. Changes in bending moments and crack formation parameters were assessed. Numerical experiments confirmed the decisive influence of the initial static loading level, structural reinforcement, and joint compliance on the dynamic crack resistance of frame systems. The obtained data can be used to assess the survivability of buildings and structures under beyond-design-basis impacts.

**Keywords:** monolithic frame structures, complex stress-strain state, emergency impact, finite element modeling.

### Введение

Прогрессирующее обрушение по-прежнему относится к числу наиболее опасных и непредсказуемых воздействий в строительной сфере, что диктует необходимость совершенствования подходов к расчету несущих систем. Даже при наличии действующих нормативов достоверное прогнозирование поведения железобетонных каркасов при аварийных нагрузках остается не до конца решенной задачей. Наибольшие трудности вызывает моделирование работы элементов в условиях динамики – например, при имитации внезапного выхода из работы несущего элемента системы, – поскольку здесь принципиально важны реальная жесткость узлов и фактические параметры армирования.

Этой проблематике посвящен широкий круг работ как отечественных [1–12], так и зарубежных [13–22] специалистов, в то же время вопрос о том, как именно узлы сопряжения элементов каркаса с разным армированием сказываются на живучести при прогрессирующем обрушении, раскрыт лишь частично. В настоящей статье исследуется напряженно-деформированное состояние монолитных

железобетонных рам с варьируемым процентом армирования при сценарии внезапного выхода из работы центральной колонны первого этажа. Также при анализе рассматривались два типа узловых сопряжений – жесткие и податливые.

Ранее в работах авторов [9–12] рассматривалось влияние податливости узловых сопряжений на отдельные параметры деформирования, настоящая статья является продолжением большой работы по изучению поведения конструкции в условиях сложного напряженно-деформированного состояния с применением методов расчета в КЭ программных комплексах.

### Метод

В качестве объекта численного исследования приняты четыре серии монолитных железобетонных рам. Образцы запроектированы в масштабе 1:6 к натуральной величине. Габаритная схема рам представлена на рисунке 1а. Пролетные расстояния в осях составляют  $L = 1000$  мм, межэтажное расстояние – 500 мм. Указанные размеры соответствуют геометрическому подобию с типовым этажом многоэтажного здания.

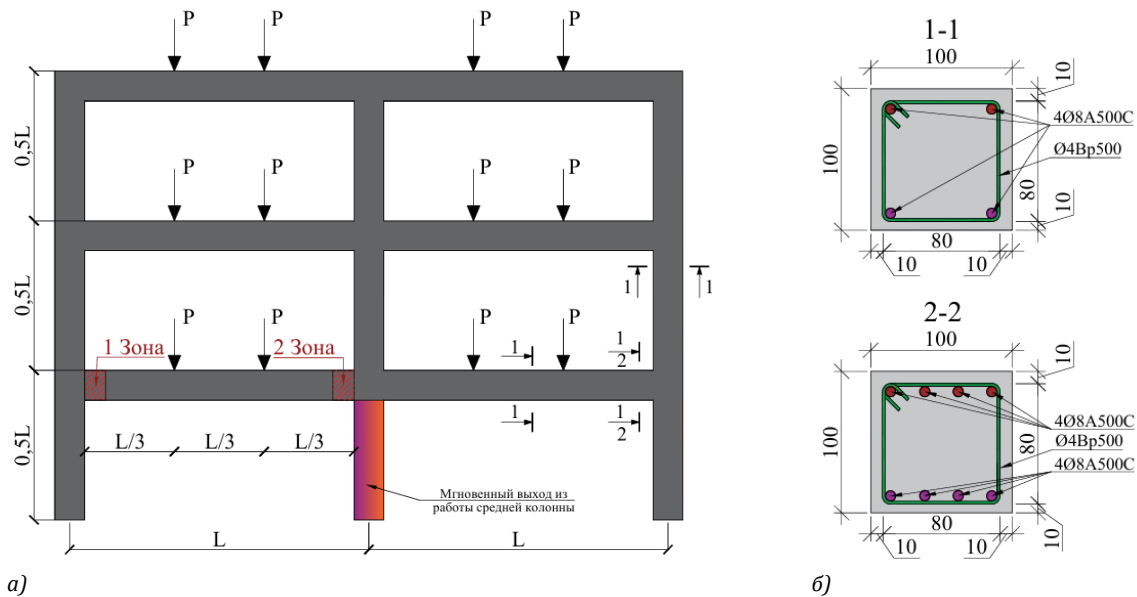


Рис. 1. Объект исследования:

а) расчетная схема фрагмента рамного каркаса; б) поперечное сечение элементов рамы (иллюстрация авторов)  
 Fig. 1. Object of research: a) cross-section of frame elements; b) calculation scheme of a frame fragment (illustration by the authors)

С целью идентификации рам были введены следующие обозначения: «Цифра» – характеризует поперечное сечение элементов рамы, «Буква» – отражает тип сопряжения узлов.

1Ж – сечение колонн и ригелей 100x100 мм, класс бетона В25, армирование принято одинаковое для всех несущих элементов, класс и диаметр арматуры – Ø8A500C, расположение арматурных включений

симметричное (рис. 1б – сечение 1-1), узлы сопряжения несущих элементов рамы жесткие.

1П – сечение колонн и ригелей 100 × 100 мм, класс бетона В25, армирование принято одинаковое для всех несущих элементов, класс и диаметр арматуры – Ø8A500C, расположение арматурных включений симметричное (рис. 1б – сечение 1-1), узлы сопряжения несущих элементов рамы податливые.

2Ж – сечение колонн и ригелей 100x100 мм, класс бетона В25, армирование колонны симметричное состоит из 4Ø8А500С (рис. 16 – сечение 1-1), армирование ригеля комбинированное, в пролетной зоне симметричное из 4Ø8А500С (рис. 16 – сечение 1-1), в опорной зоне симметричное из 8Ø8А500С (рис. 16 – сечение 2-2), узлы сопряжения несущих элементов рамы жесткие.

2П – сечение колонн и ригелей 100 × 100 мм, класс бетона В25, армирование колонны симметричное состоит из 4Ø8А500С (рис. 16 – сечение 1-1), армирование ригеля комбинированное, в пролетной зоне симметричное из 4Ø8А500С (рис. 16 – сечение 1-1), в опорной зоне симметричное из 8Ø8А500С (рис. 16 – сечение 2-2), узлы сопряжения несущих элементов рамы податливые.

Сечения элементов рам подобраны таким образом, чтобы получить картину деформирования как при пластическом, так и при хрупком характере разрушения. Поэтому важной особенностью является то, что в сечении 2-2 (опорные участки рам се-

рий 2Ж и 2П) наблюдается эффект «переармированного» сечения – относительная высота сжатой зоны бетона оказывается выше граничной.

Основным инструментом при решении выполнения исследования служило численное моделирование с использованием метода конечных элементов, реализованное в специализированном программном комплексе.

Геометрическая модель рамы строилась на базе стержневых КЭ, тип которых назначался исходя из условий физически нелинейной постановки задачи. Специальными одноузловыми КЭ учитывалась податливость узловых сопряжений.

Физико-механические свойства материалов описывались следующими законами деформирования: для бетона – экспоненциальный, для арматуры – кусочно-линейный. Расчет несущей способности элементов, выполненный с использованием деформационной модели, позволил построить диаграммы «момент – угол поворота» и «момент – изгибная жесткость» (рис. 2), необходимые для численного моделирования и последующего анализа.

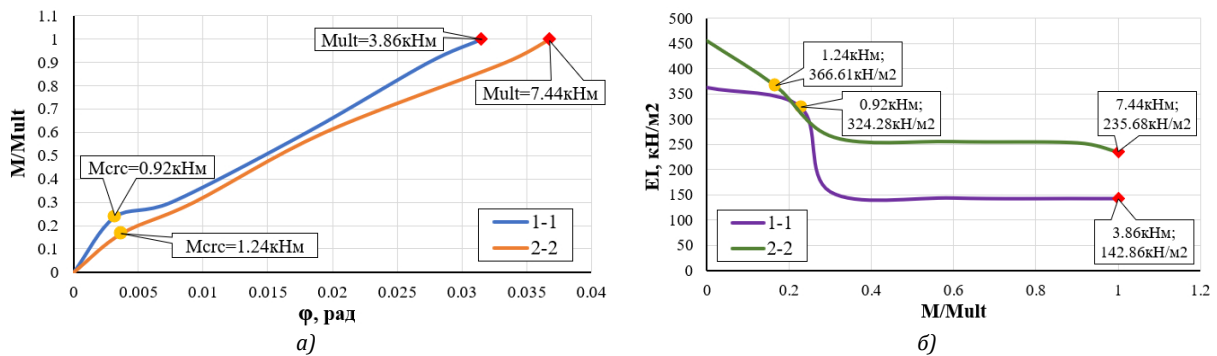


Рис. 2. Несущая способность сечения:  
 а) момент – угол поворота; б) момент – изгибная жесткость (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2. Bearing capacity of a section:  
 а) moment – angle of rotation; б) moment – bending rigidity (illustration by the authors)

Расчеты выполнялись для четырех серий рам при двух уровнях нагружения: 0.6Р<sub>эксп</sub> и 0.9Р<sub>эксп</sub>. В качестве нагрузки использовались две симметрично приложенные сосредоточенные силы. Такой способ нагружения обусловлен необходимостью воспроизвести характерное распределение усилий, обеспечивающее зону чистого изгиба в пролетной части ригеля. Величина сосредоточенных сил принималась в соответствии с несущей способностью сечения.

Аварийная ситуация моделировалась сценарием прогрессирующего обрушения. Длительность локального отказа элемента задавалась равной 0,01 сек. Удаляемым элементом выбрана центральная колонна первого этажа.

### Результаты и обсуждение

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) были выделены ключевые сечения несущей системы, в которых зафиксирован максимальный динамический отклик в результате аварийного выхода из работы средней колонны первого этажа. К ним относятся: опорный участок ригеля крайней колонны (зона-1) и опорная зона ригеля над удаленной колонной (зона-2). Расположение зон отображено на рисунке 1а.

В качестве критериев оценки изменения напряженно-деформированного состояния были приняты параметры трещинообразования, а именно глубина раскрытия трещин ( $n_{crс}$ ) в бетоне при изменении изгибных усилий во времени.

Рассмотрим зону-1 (рис. 3а) при уровне нагружения 0.6Р<sub>эксп</sub>. Приращение относительного изгибающего момента для рам 1Ж и 1П в среднем сопоставимо и составляет 0,52 ( $t = 0,055$  с), для рам 2Ж и 2П данный показатель также близок по значениям, приращение на первой полуволне достигает 0,63 ( $t = 0,065$  с). Так как скорость изменения изгибающего момента во всех сериях остается примерно одинаковой, на первой полуволне наблюдается сдвиг по времени  $+Δt = 0,01$  с для рам 2Ж и 2П.

Учет податливости позволяет несколько снизить амплитудные значения – это прослеживается как для сечения «1», так и для сечения «2». И как следствие затухание колебаний для всех серий происходит несколько быстрее.

Так как относительный уровень нагружения не велик в начальный момент времени трещины не раскрывались – на графиках этот момент соответствует

началу координат: для сечения «2» – (0), для сечения «1» – (1).

При появлении первой трещины в «переармированных» сечениях относительная глубина составляет  $h_{crс}=0,08$  (2), тогда как для нормально армированных сечений этот показатель заметно выше –  $h_{crс}=0,39$  (3). Это свидетельствует о том, что в «переармированных» элементах на данном этапе

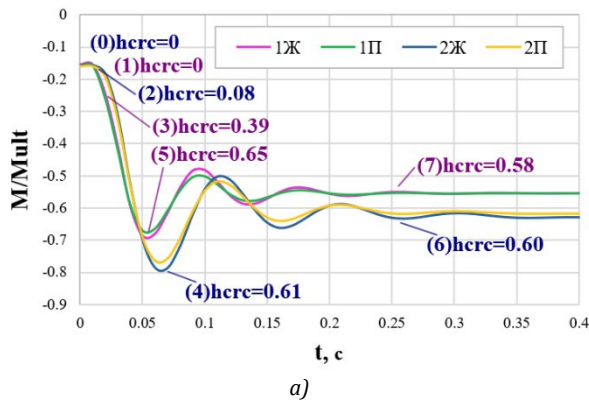


Рис. 3. Изменение изгибающего момента во времени при уровне нагружения  $0.6P_{эксп}$ : а) зона-1; б) зона-2 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Change in bending moment over time at a loading level of  $0.6P_{exp}$ : а) zone-1; б) zone-2 (illustration by the authors)

в зоне-2 (рис. 3б) при уровне нагружения  $0.6P_{эксп}$  наблюдается смена знака изгибающего момента. Поскольку при эксплуатационном нагружении момент имел постоянный знак, аварийное воздействие привело к его изменению, что отчетливо видно на указанном рисунке.

Скорость изменения относительного изгибающего момента для всех серий рам одинакова до  $t = 0,025$  с, далее с такой же скоростью происходит изменение момента только для рам 1Ж и 1П. Приращение относительного изгибающего момента для рам 1Ж и 1П в среднем сопоставимо и составляет 0,4 ( $t = 0,05$  с), для рам 2Ж и 2П данный показатель также близок по значениям, приращение составляет 0,33 ( $t = 0,067$  с). Заметим, что в зоне-1 приращение на первой полуволне было больше для «переармированных» сечений, здесь же наоборот.

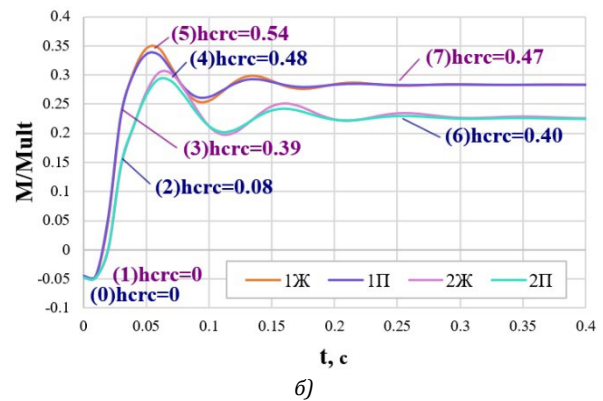
Учет податливости так же, как и в зоне-1 позволяет несколько снизить амплитудные значения, как для сечений «1», так и для сечения «2».

Появление первой трещины для всех серий рам (2) и (3) происходит в один и тот же момент времени  $t = 0,025$  с. После образования трещины на всех представленных диаграммах отчетливо фиксируется точка перелома (излом графика), характеризующая резкое изменение скорости нарастания относительного изгибающего момента. Данный излом соответствует моменту потери жесткости сечения и переходу системы в стадию активного трещинообразования. Наиболее выраженный перелом наблюдается для серий 2Ж и 2П, что свидетельствует о более интенсивном перераспределении напряжений в «переармированных» элементах.

После завершения колебательного процесса (6, 7) глубина трещины стабилизируется, но разница между сечениями «1» и «2» сохраняется. Разница

значительная часть бетона продолжает воспринимать нагрузку.

При пиковых значениях (4) и (5), несмотря на большую величину относительного изгибающего момента для сечений «2», глубина трещины оказывается несколько ниже (разница составляет 6,3 %). После завершения колебательного процесса (6, 7) глубина трещины стабилизируется и становится сопоставимой для всех серий.



в результатах составляет 16,1 %, что указывает на сохраняющееся влияние уровня армирования на трещиностойкость элементов даже после затухания динамического процесса.

Перейдем к анализу при уровне нагружения  $0.9P_{эксп}$ . Рассмотрим зону-1 (рис. 4а). Для всех серий пиковое значение приращения наблюдается при  $t = 0,06$  с. Наибольшее приращение относительного изгибающего момента первой полуволны зафиксировано для рам 1Ж составляет 1,16, далее для рам 1П – 1,1, после для рам 2Ж и 2П сопоставимо и составляет – 1,07.

Учет податливости узловых сопряжений позволяет снизить приращение изгибающего момента для сечений «1» на 5,3%, тогда как для сечений «2» результаты полностью совпадают.

При уровне статического нагружения  $0.9P_{эксп}$  в начальный момент времени в зоне-1 наблюдается явное трещинообразование. Относительная глубина трещин (0, 1) существенна как для сечений «1», так и для сечений «2» и составляет  $h_{crс} = 0,45...0,48$ .

При пиковых значениях (4) и (5) изгибающий момент достигает критической величины, что приводит к разрушению сечения и раскрытию трещин на всю глубину тела бетона. После этого колебательный процесс в рассматриваемой зоне не наблюдается.

При увеличении эксплуатационной нагрузки в зоне-2 (рис. 4б) скорость изменения относительного изгибающего момента в сечениях «1» и «2», начинает различаться практически с самого начала динамического воздействия. После образования трещин точка перегиба образуется с небольшим запаздыванием по времени. При этом пиковые значения для всех рассматриваемых серий достигаются в один и тот же момент времени  $t = 0,065$  с.

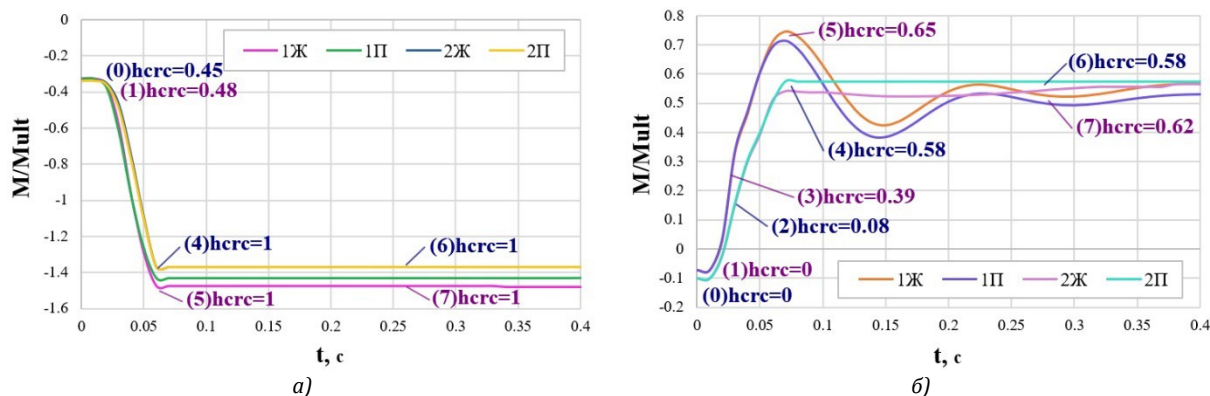


Рис. 4. Изменение изгибающего момента во времени при уровне нагружения  $0.9P_{эксп}$ :

а) зона-1; б) зона-2 (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Change in bending moment over time at a loading level of  $0.9P_{exp}$ :

а) zone-1; б) zone-2 (illustration by the authors)

Приращение относительного изгибающего момента для рам 1Ж, 1П и 2Ж, 2П уже не сопоставимо, как было при меньшем уровне статического нагружения. Разница составляет: для рам 1Ж и 1П – 6,2%, для рам 2Ж и 2П – 7,6 %.

Следует отметить, что, несмотря на более высокий относительный уровень изгибающего момента для рам 1Ж и 1П, колебательный процесс на данном уровне сохраняется. В отличие от этого, для рам с сечением «2» после достижения пикового значения график затухает, утрачивая выраженный колебательный характер.

Поскольку начальная скорость изменения изгибающего усилия для рассматриваемых рам неодинакова, образование первых трещин в сечениях «1» и «2» происходит в различные моменты времени, несмотря на существенное различие относительного уровня трещинообразования для данных сечений.

Максимальная глубина трещины в пике для сечений «1» составляет  $h_{crs} = 0,65$  (5), для сечений «2» –  $h_{crs} = 0,58$  (4), что представляется вполне ожидаемым с учетом разницы в пиковых усилиях.

Следует отметить, что в рассматриваемом временном интервале колебательный процесс для сечения «1» не завершается, однако глубина раскрытия трещины стабилизируется, достигая значения  $h_{crs} = 0,62$  (7). Для сечений «2» как было ранее сказано после пиковой полуволны происходит мгновенное затухание колебаний, и глубина раскрытия трещин становится неизменной  $h_{crs} = 0,58$  (6). В сечении «2», как было отмечено ранее, после прохождения пиковой полуволны наблюдается практически мгновенное затухание колебаний, после чего глубина раскрытия трещины остается неизменной и составляет  $h_{crs} = 0,58$  (6). Сравнительный анализ сечений «1» и «2» свидетельствует о том, что разница указанного параметра достигает 6,7 %.

### Заключение

Проведенный анализ динамического поведения рамных конструкций при уровнях нагружения  $0.6P_{эксп}$  и  $0.9P_{эксп}$  позволяет сделать следующие выводы:

1. При относительно невысоком уровне статического нагружения ( $0.6P_{эксп}$ ) динамическое воздействие не приводит к исчерпанию несущей способности сечений: трещины либо отсутствуют

в начальный момент, либо имеют незначительную глубину. Колебательный процесс носит затухающий характер с последующей стабилизацией напряженно-деформированного состояния. При увеличении нагружения до  $0.9P_{эксп}$  наблюдается качественное изменение картины деформирования: в зоне-1 происходит полное раскрытие трещин на всю глубину сечения с последующим прекращением колебаний, что свидетельствует о достижении предельного состояния.

2. Включение в расчетную модель фактора податливости узловых сопряжений, открывает возможность более строгой и обоснованной оценки характера и степени изменения изгибающих усилий в несущих конструкциях при аварийных воздействиях, сопровождающихся динамическими перегрузками и перераспределением внутренних усилий. Полученные результаты позволяют отметить, что при невысоких уровнях нагружения в условиях колебательных процессов податливость незначительно влияет на снижение амплитудных значений. При нагружениях, близких к предельным, податливость узлов способствует существенному уменьшению величины изгибающего момента в несущих элементах конструкций.

3. Установлено, что «переармированные» сечения (2Ж, 2П) характеризуются меньшей глубиной раскрытия трещин при сопоставимых или даже больших значениях изгибающего момента. Это подтверждает их повышенную жесткость на стадии трещинообразования. Вместе с тем при высоком уровне нагружения ( $0.9P_{эксп}$ ) в зоне-2 для таких сечений колебательный процесс затухает практически мгновенно после прохождения пика, тогда как нормально армированные сечения сохраняют способность к колебаниям, что и является характерной особенностью пластического характера разрушения.

4. Зона-1 и зона-2 демонстрируют принципиально разный характер деформирования. В зоне-2 зафиксирована смена знака изгибающего момента, что обусловлено аварийным воздействием. Для зоны-2 также характерно наличие ярко выраженной точки перелома на диаграммах, фиксирующей момент потери жесткости сечения и переход в стадию активного трещинообразования. Наиболее отчетливо данный эффект проявляется в «переармированных» элементах.

Таким образом, экспериментально-расчетные исследования подтверждают существенное влияние исходного уровня статического нагружения, армирования и податливости узлов на динамиче-

скую трещиностойкость рамных конструкций. Полученные результаты могут быть использованы при оценке живучести зданий и сооружений при запроектных воздействиях.

#### Список литературы

1. Белостоцкий А. М. Численное моделирование процессов деформирования конструкций, подверженных аварийным воздействиям / А. М. Белостоцкий, А. С. Павлов // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 2 (58). – С. 51–56.
2. Колчунов В. И. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях / В. И. Колчунов, В. В. Тур // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 5–15.
3. 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 // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 18–28.
4. Колчунов В. И. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова, С. Ю. Савин // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 9. – С. 42–51.
5. 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 // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2021. – Т. 16, № 10. – С. 1337–1345.
6. Федорова Н. В. Анализ деформирования и трещинообразования многоэтажных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий в предельных и запредельных состояниях / Н. В. Федорова, П. А. Кореньков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 11. – С. 8–13.
7. Федорова Н. В. Анализ нелинейного статико-динамического деформирования железобетонных рам в запредельных состояниях / Н. В. Федорова, Н. Т. Ву, М. Д. Медянкин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (64). – С. 11–24.
8. Федорова Н. В. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии / Н. В. Федорова, Ву Нгок Туен, И. А. Яковенко // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2020. – Т. 15, № 11. – С. 1513–1522.
9. Кореньков П. А. Напряженно-деформированное состояние узловых соединений железобетонных конструкций при статико-динамическом деформировании / П. А. Кореньков, Н. В. Федорова, С. Р. Меликсетян // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 2. – С. 190–199.
10. Меликсетян С. Р. Прочность и деформативность изгибаемых монолитных железобетонных элементов при динамических аварийных воздействиях / С. Р. Меликсетян, П. А. Кайдас, О. О. Коренькова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 2 (52). – С. 11–16.
11. Меликсетян С. Р. Моделирование работы узловых сопряжений железобетонных конструкций в КЭ программных комплексах / С. Р. Меликсетян, П. А. Кореньков // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник материалов семинара молодых ученых XXVII Международной научной конференции, Москва, 25–27 апреля 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2024. – С. 60–65.
12. Меликсетян С. Р. Численное моделирование узловых соединений железобетонных конструкций при аварийных воздействиях / С. Р. Меликсетян, П. А. Кореньков // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник материалов семинара молодых ученых XXVI Международной научной конференции, Ташкент, 26–28 апреля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. – С. 132–138.
13. Fialko S. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion / S. Fialko, O. Kabantsev, A. Perelmuter // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 102, № 2. – P. 10214–10214.
14. Fei-Fan Feng. 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, et al. // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 90.
15. Xu Long. 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, et al. // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 315.
16. Obaidat Y. T. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading / Y. T. Obaidat, G. A. Abu-Farsakh, A. M. Ashteyat // Constr Build Mater. – 2019. – Vol. 198. – P. 313–322.
17. Ma C. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps / C. Ma, D. Wang, Z. Wang // Compos Struct. – 2017. – Vol. 159. – P. 397–409.
18. El-Ariss B. Benchmark numerical model for progressive collapse analysis of RC beam-column sub-assemblages / B. El-Ariss, S. Elkholy, A. Shehada // Buildings. – 2022. – Vol. 12 (2). – P. 122.
19. Li Z.-X. Analytical model on progressive collapse resistance of prestressed precast concrete frame under middle column removal scenario / Z.-X. Li, H. Liu, Y. Shi, et al. // Advances in Structural Engineering. – 2022. – Vol. 25 (7). – P. 1583–1608.
20. Ahmadi R. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage / R. Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, et al. // Shock. Vib. – 2016. – P. 1–17.
21. Priti Patel. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance / Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 411.
22. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading / M. Noyan // Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 79.

#### References

1. Belostotskii A. M., Pavlov A. S. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniya konstruktssii, podverzhennikh aviariinim vozdeistviyam [Numerical modeling of deformation processes of structures subjected to emergency impacts]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2015, no. 2 (58), pp. 51–56.
2. Kolchunov V. I., Tur V. V. Napravleniya proektirovaniya konstruktivnikh sistem v osobikh raschetnikh situatsiyakh [Directions in designing structural systems in special design situations]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2023, no. 7, pp. 5–15.

3. Kolchunov V. I., Bushova O. B., Korenkov P. A. Deformirovanie i razrushenie zhelezobetonnikh ram s rigelyami, armirovannymi naklonnymi sterzhnyami, pri osobikh vozdeistviyakh [Deformation and failure of reinforced concrete frames with beams reinforced with inclined bars under special impacts]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2022, no. 1 (99), pp. 18–28.
4. Kolchunov V. I., Fedorova N. V., Savin S. Yu. Dinamicheskie effekti v staticheski neopredelimiakh fizicheski i konstruktivno nelineinikh sistemakh [Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear systems]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2022, no. 9, pp. 42–51.
5. Kolchunov V. I., Tuen V. N., Nizhegorodov D. I. Dinamicheskiy otklik konstruktivnoi sistemi zdaniya s konechnim chislom stepenei svobody pri osobom vozdeistvii [Dynamic response of a finite-degree-of-freedom building structural system under a special impact]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. 2021, vol. 16, no. 10, pp. 1337–1345.
6. Fedorova N. V., Korenkov P. A. Analiz deformirovaniya i treshchinoobrazovaniya mnogoetazhnikh zhelezobetonnikh ramno-sterzhnevikh konstruktivnikh sistem zdaniy v predelnikh i zapredelnikh sostoyaniyakh [Analysis of deformation and cracking of multi-story reinforced concrete frame-beam structural systems of buildings in limit and beyond-limit states]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2016, no. 11, pp. 8–13.
7. Fedorova N. V., Vu N. T., Medyankin M. D. Analiz nelineinogo statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnikh ram v zapredelnikh sostoyaniyakh [Analysis of nonlinear static-dynamic deformation of reinforced concrete frames in beyond-ultimate states]. *Nauchnii zhurnal stroitelstva i arkhitektury* [Scientific Journal of Construction and Architecture]. 2021, no. 4 (64), pp. 11–24.
8. Fedorova N. V., Vu Ngok Tuen, Yakovenko I. A. Kriterii prochnosti ploskonapryazhennogo zhelezobetonnogo elementa pri osobom vozdeistvii [Strength criterion of a plane-stressed reinforced concrete element under special action]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1513–1522.
9. Korenkov P. A., Fedorova N. V., Meliksetyan S. R. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie uzlovikh soedinenii zhelezobetonnikh konstruktivnykh pri statiko-dinamicheskom deformirovanii [Stress-strain state of nodal joints of reinforced concrete structures under static-dynamic deformation]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2025, no. 2, pp. 190–199.
10. Meliksetyan S. R., Kaidas P. A., Korenkova O. O. Prochnost i deformativnost izgibaemikh monolitnikh zhelezobetonnikh elementov pri dina-micheskikh avariinikh vozdeistviyakh [Strength and Deformability of Bending Monolithic Reinforced Concrete Elements under Dynamic Emergency Impacts]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Caspian Engineering and Construction Bulletin]. 2025, no. 2 (52), pp. 11–16.
11. Meliksetyan S. R., Korenkov P. A. Modelirovanie raboti uzlovikh sopryazhenii zhelezobetonnikh konstruktivnykh v KE programmnykh kompleksakh [Modeling the Operation of Nodal Joints of Reinforced Concrete Structures in FE Software Packages]. *Stroitelstvo – formirovanie sredi zhiznedeyatel'nosti : sbornik materialov seminarov molodikh uchenikh XXVII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Moskva, 25–27 aprelya 2024 goda* [Construction – Formation of the Living Environment: Collection of Materials from the Seminar of Young Scientists of the XXVII International Scientific Conference, Moscow, April 25–27, 2024]. Moscow: Natsionalnii issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennii stroitel'nii universitet; 2024, pp. 60–65.
12. Meliksetyan S. R., Korenkov P. A. Chislennoe modelirovanie uzlovikh soedinenii zhelezobetonnikh konstruktivnykh pri avariinikh vozdeistviyakh [Numerical modeling of nodal connections of reinforced concrete structures under emergency impacts]. *Stroitelstvo – formirovanie sredi zhiznedeyatel'nosti : sbornik materialov seminarov molodikh uchenikh XXVI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Tashkent, 26–28 aprelya 2023 goda* [Construction – Formation of the Living Environment: Collection of Materials from the Seminar of Young Scientists of the XXVI International Scientific Conference, Tashkent, April 26–28, 2023]. Moscow: Natsionalnii issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennii stroitel'nii universitet; 2023, pp. 132–138.
13. Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021, vol. 102, no. 2, pp. 10214–10214.
14. 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. *Journal of Building Engineering*. 2024, vol. 90.
15. Xu Long, Percy M. Iyela, YutaiSu, et al. Numerical predictions of progressive collapse in reinforced concrete beam-column sub-assemblages: A focus on 3D multiscale modeling. *Engineering Structures*. 2024, vol. 315.
16. Obaidat Y. T., Abu-Farsakh G. A., Ashteyat A. M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Constr Build Mater*. 2019, vol. 198, pp. 313–322.
17. Ma C., Wang D., Wang Z. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps. *Compos Struct*. 2017, vol. 159, pp. 397–409.
18. El-Ariss B., Elkholy S., Shehada A. Benchmark numerical model for progressive collapse analysis of RC beam-column sub-assemblages. *Buildings*. 2022, vol. 12 (2), pp. 122.
19. Li Z.-X., Liu H., Shi Y., et al. Analytical model on progressive collapse resistance of prestressed precast concrete frame under middle column removal scenario. *Advances in Structural Engineering*. 2022, vol. 25 (7), pp. 1583–1608.
20. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., et al. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage. *Shock. Vib*. 2016, pp. 1–17.
21. Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 2024, vol. 411.
22. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. *Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology*. 2014, vol. 79.

© С. Р. Меликестян, П. А. Кайдас

**Ссылка для цитирования:**

Меликестян С. Р., Кайдас П. А. Перераспределение усилий и трещинообразование в железобетонных рамах при аварийных воздействиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 69–75.