

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.072.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177

Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций

Владимир Иванович Колчунов, Павел Анатолиевич Кореньков,
Наталья Витальевна Федорова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы проведены ряд экспериментальных и значительное количество численных исследований с целью изучения механизмов сопротивления железобетонных каркасов зданий как при проектных нагрузках, так и при аварийных и особых аварийных воздействиях. Актуальность подобных исследований определяется необходимостью оценки деформирования и разрушения таких конструктивных систем в целом и фрагментарным изучением узлов рам и стен, содержащих как зоны чистого изгиба, так и зоны поперечного изгиба при наличии и отсутствии продольных сил. Напряженно-деформированное состояние (НДС) и координаты точек образования пространственных трещин в конструкциях таких фрагментов остаются малоизученными, в совокупности с неисследованными эффектами, возникающими при нарушении сплошности железобетона.

Материалы и методы. При разработке объема экспериментальных исследований особое внимание было уделено такому моделированию узлов рам и стен, которые не искажали бы НДС изучаемых зон при местном приложении нагрузки, предельно упростили бы исследование узлов сопряжения (статически определяемые фрагменты узлов) и в то же время позволяли оценивать перераспределение усилий в статически неопределимых системах с учетом податливости узлов и реальной картины трещинообразования.

Результаты. Выполнено обоснование принятых конструктивных решений опытных железобетонных конструкций узлов, разработаны программа и методика проведения исследований рассматриваемых типов узловых соединений рамных систем, которые дают возможность составить схему испытаний для экспериментального выявления особенности действительной работы указанного вида конструкций.

Выводы. Разработаны программа и методика экспериментальных исследований по изучению особенностей трещинообразования, деформирования и разрушения узлов железобетонных рамных конструкций с учетом различного характера их НДС. Особое внимание уделено определению углов поворота, оценке деформативности и податливости узлов, а также прогибов, схем образования, развития и раскрытия трещин, деформированию бетона в сложно напряженных областях узлов железобетонных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции, сложное напряженное состояние, углы поворота, прогибы, раскрытие пространственных трещин, экспериментальная проверка расчетной модели

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колчунов В.И., Кореньков П.А., Федорова Н.В. Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1165–1177. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177

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

Experimental research programme of complex stressed nodes of reinforced concrete structures

Vladimir I. Kolchunov, Pavel A. Korenkov, Natalia V. Fedorova

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

ABSTRACT

Introduction. In recent years, a number of experimental and a significant number of numerical studies have been conducted to study the resistance mechanisms of reinforced concrete building frames both under design loads and under emergency and special emergency impacts. The relevance of such studies is determined by both the need to assess the deformation and destruction of such structural systems as a whole and by a fragmentary study of frame and wall units containing both pure bending zones and transverse bending zones in the presence and absence of longitudinal forces. The stress-strain state and the coordinates of the points of formation of spatial cracks in the structures of such fragments remain poorly understood, together with the unexplored effects that arise when the continuity of reinforced concrete is violated.

Materials and methods. When developing the volume of experimental studies, special attention was paid to such modelling of frame and wall nodes that would not distort the stress-strain state of the studied zones with local application of load, would simplify the study of mating nodes (statically determinate fragments of nodes) to the maximum and at the same time allow for the evaluation of the redistribution of forces in statically indeterminate systems taking into account the flexibility of nodes and the real picture of crack formation.

Results. The justification of the adopted design solutions of experimental reinforced concrete structures of nodes was completed and a programme and methodology for conducting research on the considered types of nodal connections of frame systems was developed, which allows for the development of a test scheme for the experimental identification of the features of the actual operation of the specified type of structures.

Conclusions. A programme and methodology of experimental research were developed to study the characteristics of crack formation, deformation and destruction of reinforced concrete frame structures, taking into account the different nature of their stress-strain state. Particular attention is paid to determining rotation angles, assessing the deformability and flexibility of nodes, as well as deflections, patterns of formation, development and opening of cracks, as well as deformation of concrete in complex stressed areas of reinforced concrete structures.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, complex stress state, rotation angles, deflections, opening of spatial cracks, experimental verification of the calculation model

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-49-10010 (URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

FOR CITATION: Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Fedorova N.V. Experimental research programme of complex stressed nodes of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1165-1177. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей преодоления трудностей при решении различных вопросов теории железобетона является построение и реализация адекватных расчетных моделей. Однако этот подход предъявляет большие требования к экспериментам, результаты которых закладываются в основу модели. Поэтому при наборе объема экспериментальных исследований особое внимание необходимо уделять таким фрагментам узлов рам и стен, которые не искажали бы напряженно-деформированное состояние (НДС) изучаемых зон при местном приложении нагрузки, предельно упрощали бы исследование узлов сопряжения (статически определимые фрагменты узлов) и в то же время позволяли достаточно строго оценивать перераспределение усилий в статически неопределимых нелинейно деформируемых системах с учетом податливости узлов.

Экспериментальные исследования показывают, что трещинообразование в узловых зонах начинается на ранних этапах нагружения, поэтому использование жесткого соединения ригеля и колонны при проведении инженерных расчетов служит грубым допущением [1–4]. Характер разрушения узловых зон, как правило, определяется типом соединения непосредственно узловой зоны и участков колонны и балки, к нему прилегающей, и схемами армирования этих зон, что оказывает решающее влияние на характер распределения внутренних усилий в конструктивной системе^{1, 2}.

¹ Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 412 с.

² Гольшиев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев : Основа, 2009. 432 с.

^{3, 4, 5} [5–10]. Построение адекватных моделей расчетного сопротивления узловых зон требует проведения целенаправленных экспериментальных исследований с учетом отмеченных физических особенностей деформирования.

Сегодня известны отдельные случаи проведения опытных исследований железобетонных конструкций (ЖБК) монолитных узлов железобетонных рам, подверженных сложному напряженному состоянию, в которых отражено относительно малое количество рассматриваемых параметров [11, 12], в основном ограничиваясь сейсмическими воздействиями [13–17]. Исследования направлены на изучение работы узловых соединений из новых видов бетонов, в основном ограничиваясь сталефибробетонами [18]. Нет исследований конструкций узлов сплошного и составного сечения из высокопрочного тяжелого и легкого бетонов.

В проведенных в последние годы экспериментах отражен так называемый деформационный эффект (эффект нарушения сплошности) [19, 20], возникающий в областях пересечения трещинами рабочей арматуры. В частности, в результате исследований проф. В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунова³ установлено, что воздействие этого эффекта на равно-

³ Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона : монография. М. : АСВ, 2004. 471 с.

⁴ Мамин А.Н. Расчет железобетонных конструкций многоэтажных зданий с учетом нелинейности и изменяющейся податливости на основе многоуровневой дискретизации несущих систем : дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 437 с.

⁵ Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости узловых сопряжений сборных железобетонных конструкций. М. : Ассоциация «Железобетон», ОАО «ЦНИИПромзданий», 2002. 88 с.

весие усилий в поперечном сечении может достигать порядка 40 %. Это обуславливает актуальность анализа такого дифференциального параметра, как трещиностойкость при изучении ЖБК в рассматриваемом напряженном состоянии. Названные параметры — основополагающие для выполнения анализа сопротивления железобетона в окрестностях, примыкающих к местам пересечения трещинами рабочей арматуры.

До настоящего времени при осуществлении экспериментальных исследований не были изучены фрагменты узлов рам и стен, содержащие как зоны чистого изгиба, так и зоны поперечного изгиба при наличии и при отсутствии продольных сил. Напряженно-деформированное состояние и координаты точек образования пространственных трещин в таких конструкциях остаются малоизученными. При этом остаются не исследованными эффекты, возникающие при нарушении сплошности железобетона, накоплено незначительное количество экспериментальных данных, характеризующих длину и приращение трещин при возрастании нагрузки.

Поэтому дальнейшее уточнение зависимостей, используемых для определения таких параметров, как обобщенная нагрузка образования различных пространственных трещин $R_{sup,crc}$, и координат их образования, связано с проведением новых целенаправленных экспериментальных исследований ЖБК. Информация, полученная в результате этих исследований, позволит более полно и адекватно раскрыть особенности сопротивления железобетонных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На начальном этапе для оценки особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения конструкции узловых соединений были проанализированы результаты экспериментальных исследований узловых соединений конструктивных элементов. Опираясь на опыт результатов изучения конструктивных систем, приведенных в работах [1–4, 11–19], в качестве физической и соответственно расчетной модели для анализа НДС приняты крестообразные узлы как наиболее полные³ (рис. 1). Фраг-

менты ограничены удалением консолей от центра узла на расстояние $2h$, что позволяет исключить влияние зон местного приложения нагрузок на НДС исследуемого узла сопряжения (рис. 2, а).

Армирование конструкций соединения ригеля и колонны выполнено пространственными каркасами. Рабочая продольная арматура изготовлена из стрежней диаметром 6 и 8 мм класса А240С, поперечная диаметром 6 мм класса А240С. Основная продольная арматура установлена без обрывов, однако в нижней и верхней зонах присутствуют дополнительные стержни, наличие которых отражает действительную схему армирования балочных элементов, при которой некоторая часть рабочей арматуры обрывается, согласно эпюры изгибающих моментов. Принятый класс продольного армирования обусловлен значительным продольным удлинением с сохранением постоянства напряжений арматуры класса А240С, что позволит детально изучить механику трещинообразования, деформирования и разрушения конструкций из новых бетонов на всех уровнях нагружения.

Материал конструкций узлов — тяжелый бетон класса В30, высокопрочный тяжелый класса В100 и высокопрочный легкий бетон класса В70. Также в качестве объекта исследования планируется рассмотреть фрагменты стен связевых каркасов. Армирование и схема приложения нагрузок приведены на рис. 2, б. Материал конструкций стен высокопрочный легкий бетон класса В60.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цели и задачи эксперимента

Для выполнения экспериментальных исследований железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений сформулированы следующие задачи:

- 1) разработка программы и методики сопротивления ЖБК из обычного, высокопрочного и легкого высокопрочного бетона;
- 2) формулирование исходных предпосылок для построения расчетного аппарата по уточнению расчета трещиностойкости железобетонных узлов конструкций (в том числе сложных) с учетом взаим-

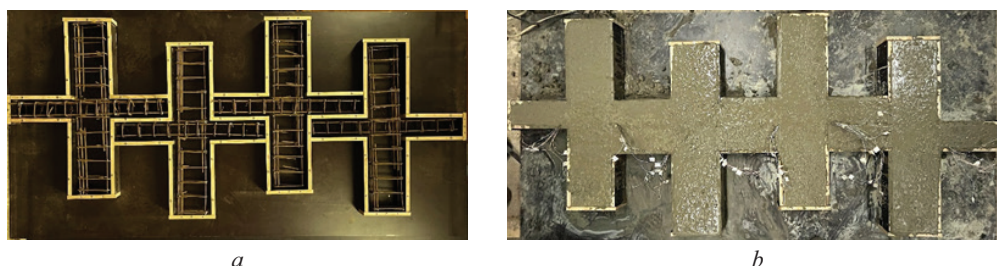


Рис. 1. Опалубочные формы с установленными арматурными каркасами (а) и общий вид забетонированных опытных образцов (б)

Fig. 1. Formwork forms with installed reinforcement cages (а) and general view of concreted test specimens (б)



ного деформирования арматуры и бетона и эффекта нарушения сплошности;

3) изучение закономерностей НДС железобетонных конструкций (в том числе сложных) при действии деформационного воздействия.

Количество опытных образцов от одного до трех штук назначено исходя из рассматриваемых параметров с тем, чтобы довести их общее количество до 18 штук исходя из расчетных сочетаний нагрузок (РСН) их параметров. Схема экспериментальных опытных ЖБК представлены на рис. 2, 3.

Экспериментальные исследования железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений, шифр для серий «У-И-РСН-тб» с изгибающим моментом, приложенных к ригелю; серия «У-В-РСН-тб» учитывает дополнительную горизонтальную силу в колонне; шифр серии «У-Т-тб» испытывает сдвиговые деформации в уровне ригеля. Шифры серии «У-И-Т-тб» и «У-И-В-тб» моделируют совместное действие изгиба и горизонтальных воздействий в ригеле и колонне соответственно. В серии «У-Сум-РСН-тб» рассматривается совместное действие всех обозначенных ранее силовых и деформационных воздействий.

Серии «У-И-РСН-вл» и «У-В-РСН-вл» аналогичны первой и второй с такой разницей, что выполнены из высокопрочного легкого бетона. Серия «У-В-РСН-вт» аналогична второй и шестой, но изготовлена из высокопрочного тяжелого бетона.

В сериях «С-И-РСН-вл» и «С-И-РСН-вл» будут изучены крестообразные пересечения монолитных стен, выполненных из высокопрочного легкого бетона и подверженных действию изгибных и сдвиговых воздействий соответственно.

В ходе проведения эксперимента планируется получить следующие параметры:

- опытное значение обобщенной опорной реакции $R_{sup,crc}$ в момент образования пространственных трещин и при разрушении $R_{sup,u}$ конструкций железобетонных узлов;
- координаты образования пространственных трещин: расстояние по горизонтали x от опорной реакции и расстояние по вертикали y от геометрической оси;
- фактическую высоту сжатой зоны x_{fact} и высоту сжатого бетона над наклонной трещиной x_v в рабочем сечении I–I и сечении III–III, проходящем через конец пространственной трещины;
- прогибы и углы поворота сечений конструкций на разных этапах нагружения;
- ширину раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля пространственной трещины;
- изменение расстояния между трещинами l_{crc} и длины трещин h_{crc} в зависимости от уровня (ступеней) нагружения;

- главные деформации в сжатом и растянутом бетоне в наиболее напряженных рабочих сечениях I–I и III–III над пространственной трещиной;
- значение проекций пространственных трещин на горизонтальную ось конструкции узлов;
- поэтапные картины цифровой фотофиксации схем образования, развития и раскрытия пространственных трещин по всем граням узлов железобетонных конструкций.

Схемы нагружения и конструкции опытных образцов

Программа исследований включает лабораторные испытания одиннадцати серий железобетонных узлов конструкций из тяжелого, высокопрочного тяжелого и легкого бетонов; девять серий опытных образцов крестообразных узлов габаритными размерами 800×900 мм и две серии пересекающихся стен габаритными размерами 1300×1300 мм.

Опытные конструкции испытываются в вертикальном положении (со свободным доступом к растянутой зоне), что дает возможность тщательно изучить картину образования, развития и раскрытия трещин. Испытательный стенд позволяет реализовать проверяемые схемы нагружения.

Схемы нагружения железобетонных узлов рамных каркасов зданий и сооружений приведены на рис. 3. В зависимости от вида соединения ригеля с колонной, вида воздействия и вида бетона приняты следующие обозначения серий опытных конструкций:

- шифр для серий «У-И-РСН-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; И — изгиб; тб — тяжелый бетон с изгибающим моментом, приложенным к ригелю (2 шт.);
- шифр серии «У-В-РСН-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; тб — тяжелый бетон с учетом дополнительной горизонтальной силы в колонне, которая возникает от значительных деформационных смещений колонны от экстремальных природных и техногенных воздействий (2 шт.);
- шифр серии «У-Т-тб»: У — узловое соединение ригеля и колонны; Т — горизонтальная сила, приложенная к ригелю; тб — тяжелый бетон. Основным предметом исследования будет оценка влияния сдвиговых деформаций в уровне ригеля (2 шт.);
- шифр серий опытных образцов и «У-И-Т-тб» (1 шт.) и серия «У-И-В-тб» (1 шт.). Образцы моделируют совместное действие изгиба и горизонтальных воздействий в ригеле и колонне соответственно.

В шестой серии «У-Сум-РСН-тб» (1 шт.) рассматривается совместное действие всех обозначенных ранее силовых и деформационных воздействий.

Седьмая «У-И-РСН-вл»: У — узловое соединение ригеля и колонны; И — изгиб; вл — высокопрочный легкий бетон (2 шт.).

Восьмая «У-В-РСН-вл»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила,

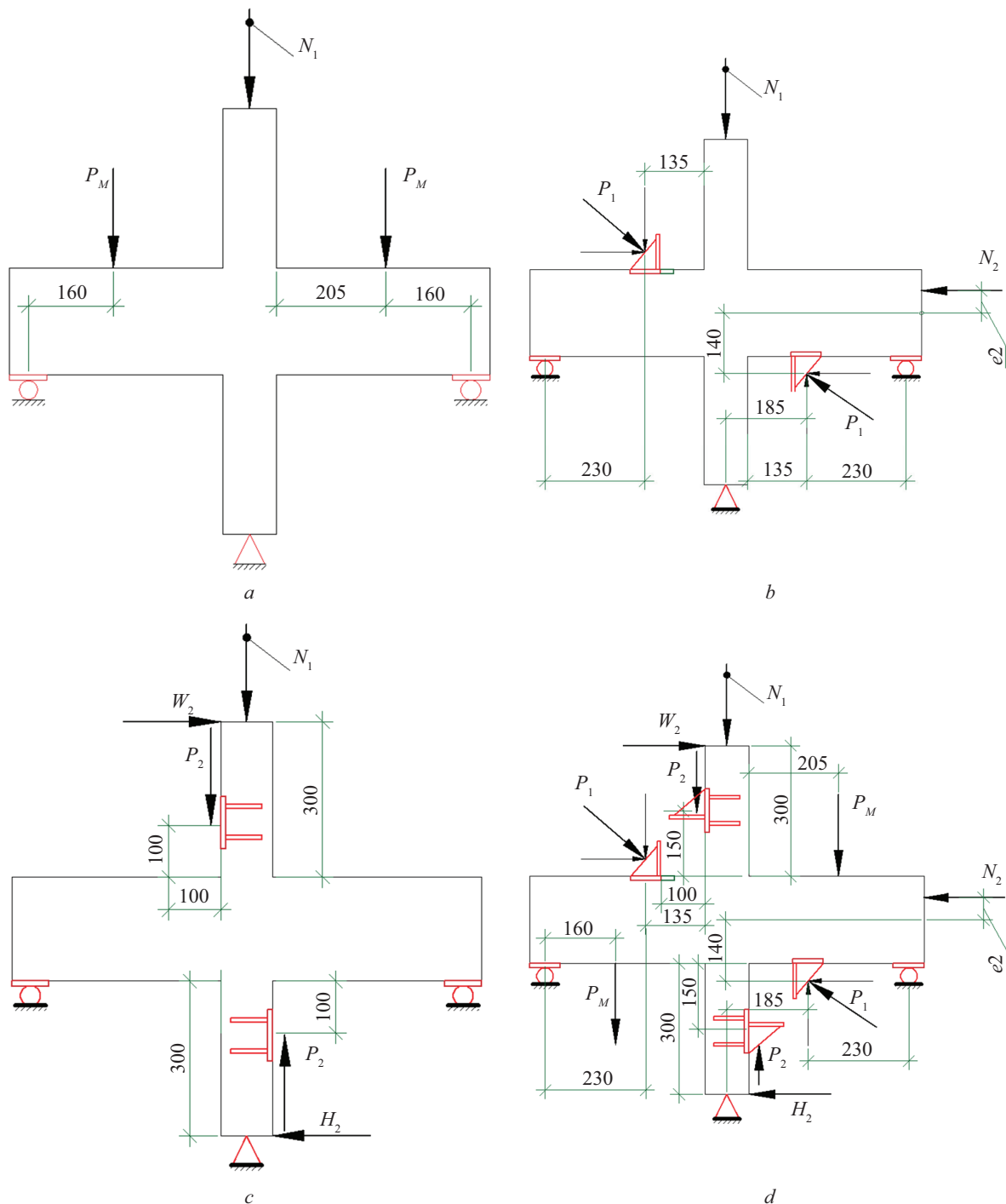


Рис. 3. Схема нагружения конструкции опытных образцов при изгибе (а); воздействии сдвигающей силы на ригели (b); сдвигающей силы на колонны (с); суммарном воздействии изгиба, сдвигающих сил в ригеле и колонне (d)
Fig. 3. Loading scheme of the experimental specimen structure under bending (a); shear force on beams (b); shear force on columns (c); total effect of bending, shear forces in the beam and column (d)

приложенная к колонне; вл — высокопрочный легкий бетон (1 шт.). Серии аналогичны первой и второй с той разницей, что выполнены из высокопрочного легкого бетона.

Девятая серия моделей узловых соединений «У-В-РСН-вт»: У — узловое соединение ригеля и колонны; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; вт — высокопрочный тяжелый бетон,

аналогична второй и шестой, но выполнена из высокопрочного тяжелого бетона (2 шт.).

Образцы серии 10 и 11 направлены на изучение крестообразных пересечений монолитных участков стен, изготовленных из высокопрочного легкого бетона и подверженных действию изгибных (серия «С-И-РСН-вл» — 2 шт.) и сдвиговых воздействий (серия «С-И-РСН-вл» — 2 шт.).

Объем и характеристики экспериментальных конструкций узловых соединений
Volume and characteristics of experimental designs of nodal connections

Номер серии Series Number	Шифр фрагментов Fragment cipher	Схема испытаний Test scheme	Проектные размеры, мм Design dimensions, mm			Класс бетона Concrete class	Тип бетона Type of concrete	Арматура Reinforcement		Количество, шт. Quantity, pes.
			высота/ширина, мм height/width, mm	размеры колонны (b × h), мм column dimensions (b × h), mm	размеры ригеля (b × h), мм crossbar dimensions (b × h), mm			Продольная Longitudinal	Поперечная Transverse	
1	У-И-РСН-тб	Рис. 2, а Fig. 2, a	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A40C	2
2	У-В-РСН-тб	Рис. 2, с Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	2
3	У-Т-тб	Рис. 2, b Fig. 2, b	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A 240C	2
4	У-И-Т-тб	Рис. 2, a, b Fig. 2, a, b	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
5	У-И-В-тб	Рис. 2, a, c Fig. 2, a, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
6	У-Сум-РСН-тб	Рис. 2, d Fig. 2, d	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B30	Тяжелый Heavy	A240C	A240C	1
7	У-И-РСН-вл	Рис. 2, a Fig. 2, a	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
8	У-В-РСН-вл	Рис. 2, c Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	1
9	У-В-РСН-вт	Рис. 2, c Fig. 2, c	800 × 900	100 × 100	100 × 200	B100	Высокопрочный тяжелый High strength heavy	A240C	A240C	2
10	С-И-РСН-вл	Рис. 1, b Fig. 1, b	1300 × 1300	80 × 400	80 × 400	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
11	С-Т-РСН-вл	Рис. 1, b Fig. 1, b	1300 × 1300	80 × 400	80 × 400	B60	Высокопрочный легкий High strength lightweight	A240C	A240C	2
Bcero / Total										18

Примечание: шифр конструкции включает: У — узловое соединение ригеля и колонны; С — узел пересечения стеной; И — изгиб; В — горизонтальная сила, приложенная к колонне; Т — горизонтальная сила, приложенная к ригелю; Сум — суммарное воздействие изгиба, сдвига в колонне и ригеле; РСН — расчетное сочетание нагрузок (собственный вес, постоянная (оборудование и эксплуатационных нагрузок)), временная нагрузка — ветер, снег, сейсмика и неравномерные осадки грунтов, а также РСУ в зданиях и сооружениях; тб — тяжелый бетон; вл — высокопрочный легкий бетон; вт — высокопрочный тяжелый бетон. Арматура поперечных хомутов Ø6 мм А240С раскатывалась из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести).

Note: the design code includes: N — nodal connection of the beam and column; W — wall intersection node; B — bending; V — horizontal force applied to the column; T — horizontal force applied to the beam; Tot — total effect of bending, shear in the column and beam; DCL — design combination of loads (self-weight, permanent (equipment and operational loads)), temporary load — wind, snow, seismicity and uneven soil settlements, as well as CCE in buildings and structures; HC — heavy concrete; HL — high-strength lightweight concrete; HH — high-strength heavy concrete. The reinforcement of the transverse stirrups Ø6 mm A240C was rolled out of a coil manually, and not using rollers (to avoid stretching at the yield point).

Объем и характеристики экспериментальных конструкций узловых соединений представлены в таблице.

Схемы установки измерительных приборов

Учитывая, что исследования такого дифференциального параметра, как ширина раскрытия трещин, проводятся в том числе и с позиции механики разрушения, то это учитывается и находит отражение в методике проведения эксперимента. В частности, электротензорезисторы в виде розеток, образованных четырьмя датчиками под углом 45°, устанавливались в фибровых волокнах и в сжатой зоне бетона, расположенной под концом опасной пространственной трещины (рис. 4).

Целью установки этих электротензорезисторов является определение фибровых и главных деформаций в сжатой зоне бетона, прилегающей к концу опасной пространственной трещины (в окрестности расчетных сечений I–I (группы тензорезисторов 10, 11) и сечения III–III (группы тензорезисторов 1, 4, 8 и 2, 6, 9), проходящего через конец пространственной трещины). Размещение на опытных конструкциях зон установки электротензорезисторов с базой 30 мм на бетон показано на рис. 3, а. Группы датчиков 3 и 7 размещены для оценки деформативности в уровне поперечной арматуры колонн, последняя группа тензорезисторов 5 расположена в геометрическом центре пересечения осей ригеля и колонны с целью извлечения информации о деформировании каждого опытного образца с доведением его до разрушения. Нагружение ЖБК будет проводиться плавно, небольшими ступенями,

составляющими $0,1 M_{cre}, q_{cre}$. После образования трещин на бетон по ее берегам будет установлена группа тензорезисторов для замера деформаций в непосредственной близости от трещины — зоне, где проявляется деформационный эффект железобетона (рис. 5).

Наибольший интерес представляет характер трещинообразования узловой зоны, ограниченный гранями ригеля и колонны (РМС-3). На рис. 6, а показаны координаты, по которым отслеживается пространственная трещина.

Также на стороне Б узлового соединения полностью отсутствуют измерительные приборы, для фиксации характера образования и раскрытия трещин устанавливается камера высокого разрешения со скоростью записи 240 кадров в секунду (рис. 6, б, с). Для измерения линейных перемещений и углов поворота размещаются прогибомеры часового типа, а также «мишени-ловушки», установленные в характерных точках опытной конструкции (рис. 6, д).

С целью контроля и подтверждения изучаемой модели деформирования рассматриваемых конструкций предусмотрена также система механических приборов для измерения деформаций контрольных точек, характеризующих сложное НДС узлов железобетонных конструкций (см. рис. 4, б).

Обработка показаний электротензорезисторов при плоском напряженном состоянии характеризуется величинами главных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 , а также углом ϕ между направлением ϵ_1 и другим известным базовым направлением. Показания розеток электротензорезисторов определяются в процессе

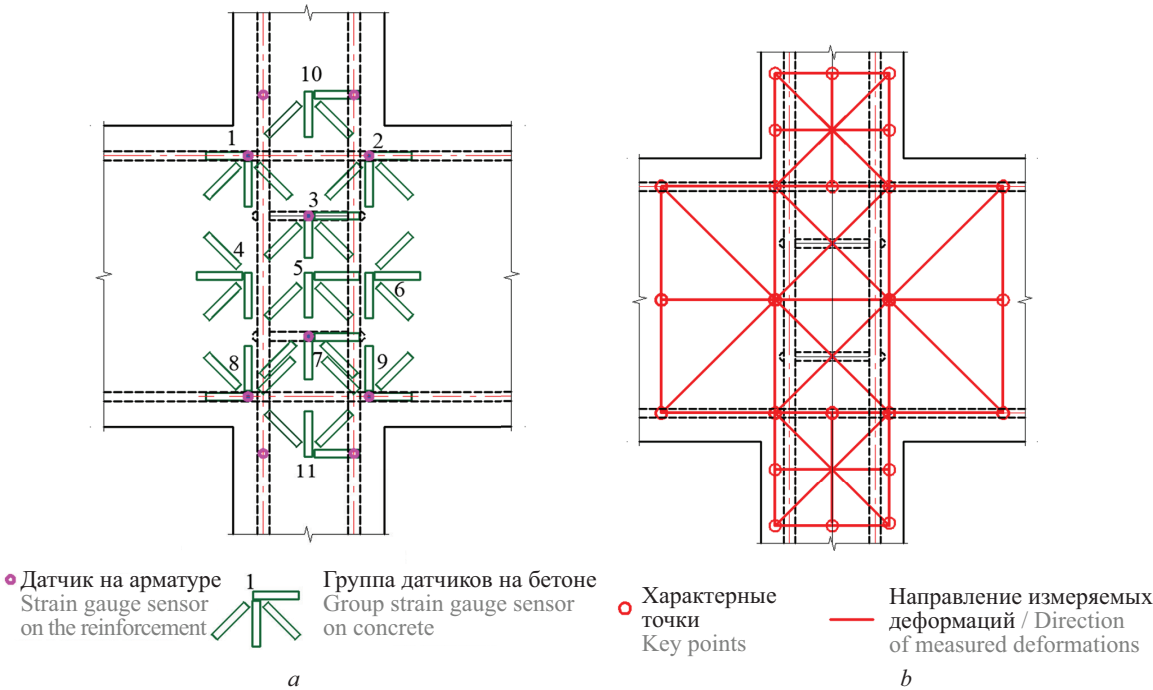


Рис. 4. Схема расположения групп электротензорезисторов на прямой стороне (а) опытных образцов узлов и схема размещения характерных точек для оценки деформативности узлового соединения (б)

Fig. 4. The layout of the groups of electrical strain gauges on the straight side (a) of the experimental specimens of the nodes, the layout of the characteristic points for assessing the deformability of the nodal connection (b)

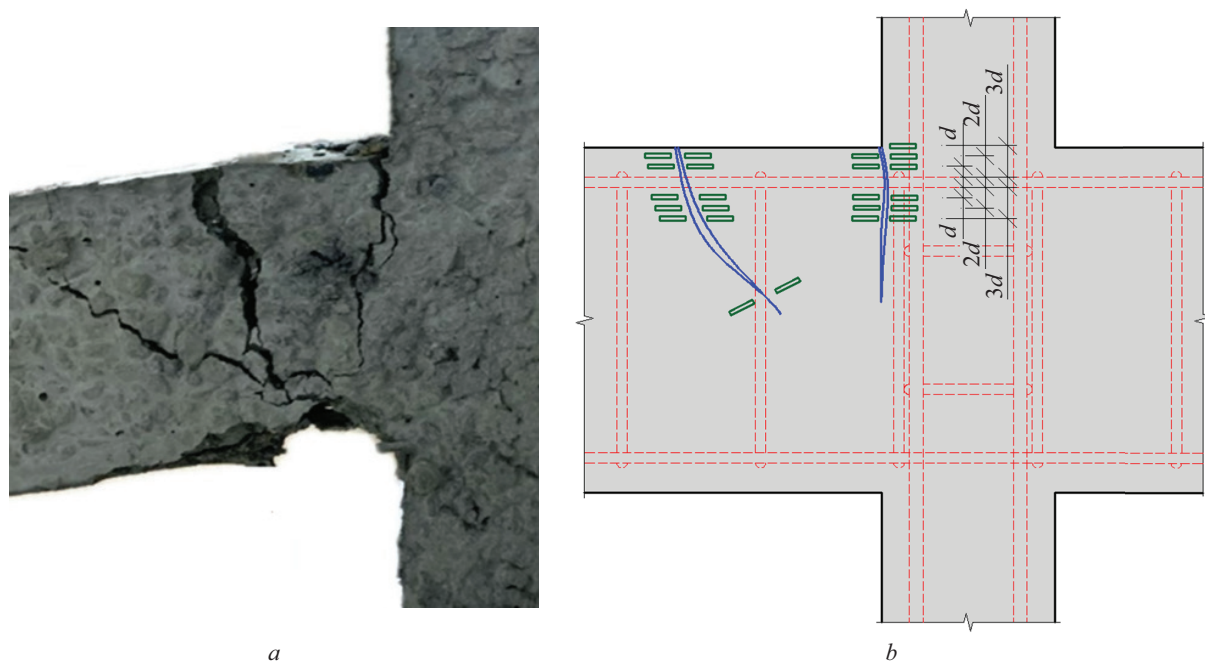
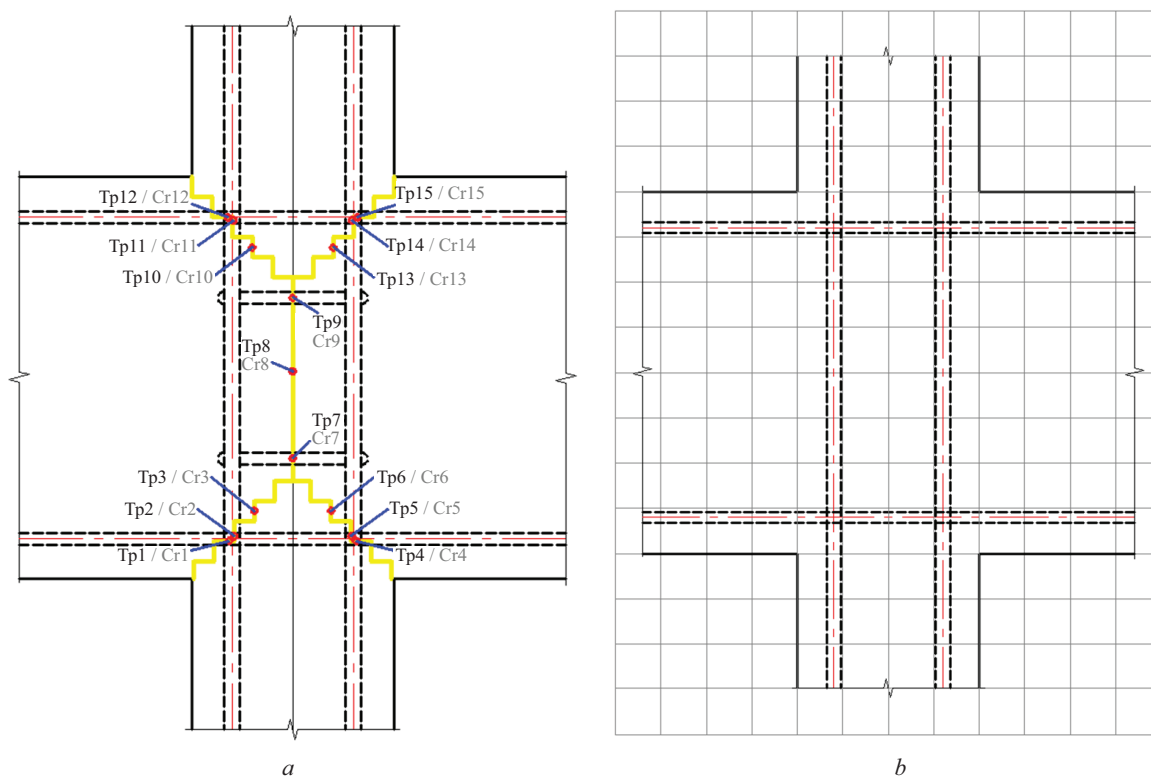


Рис. 5. Характер разрушения узловой зоны [21] и схема установки тензодатчиков для оценки деформационного эффекта железобетона

Fig. 5. Nature of destruction of the nodal zone [21] and the scheme of installation of strain gauges for assessing the deformation effect of reinforced concrete



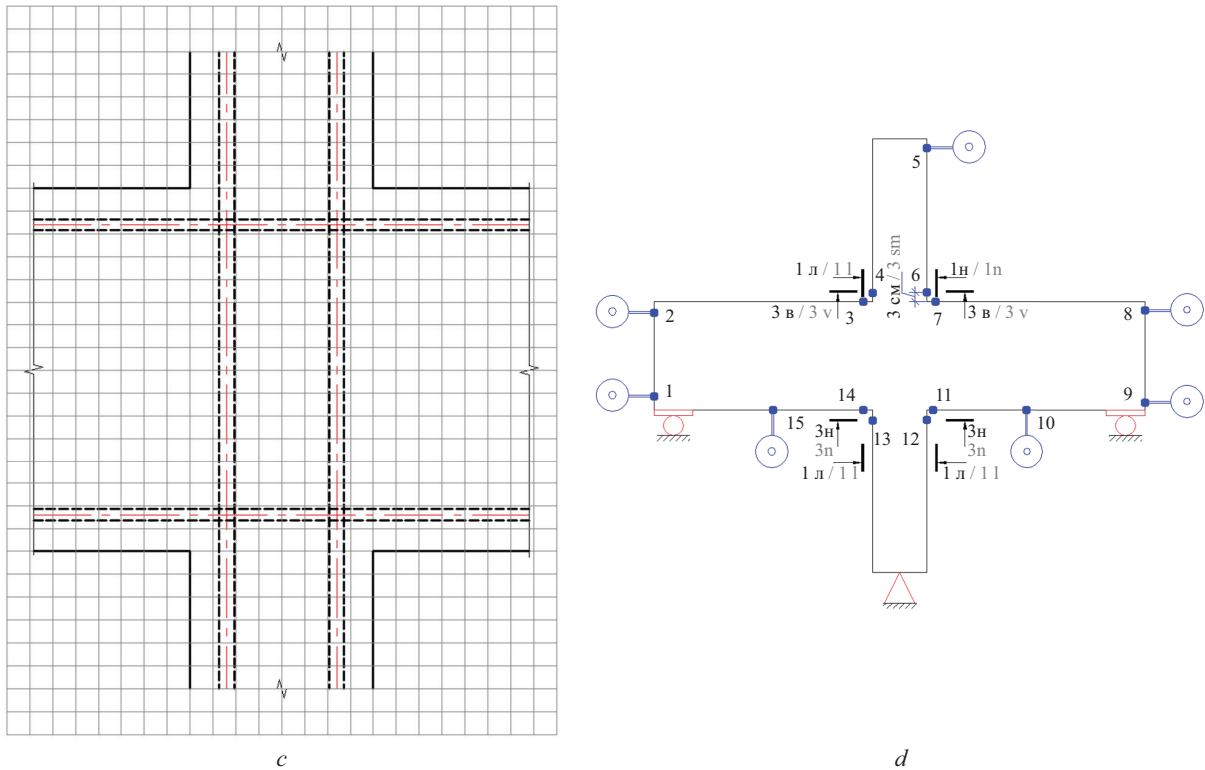


Рис. 6. Характерные точки измерения ширины раскрытия трещин: a_{cr} и Δa_{cr} (a); общий вид обратной стороны образца для фиксации параметров развития и раскрытия трещин в железобетонных конструкциях на основе оптических измерений (b, c); «мишени-ловушки» для фиксации линейных и угловых перемещений (d)

Fig. 6. Characteristic points for measuring the crack opening width: a_{cr} and Δa_{cr} (a); general view of the reverse side for recording the parameters of crack kinematics in reinforced concrete structures based on optical measurements (b, c); “target traps” for recording linear and angular displacements (d)

эксперимента для получения значений деформаций при следующих соотношениях нагрузок $P_i/P_{max} = 0,4; 0,6; 0,8; 1$ по следующим зависимостям:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$ — значения деформаций бетона для тензорезисторов, расположенных под углами 0, 45 и 90° к продольной оси образца соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ экспериментальных исследований как авторского коллектива, так и широкого круга исследователей в области деформирования ЖБК позволил спланировать экспериментальные исследования по изучению особенностей трещинообразования, деформирования и разрушения узлов и стен рамных ЖБК, с учетом различного вида и характера НДС. Выполнено обоснование принятых конструктивных решений опытных конструкций узлов и разработана программа и методика проведения экспериментальных исследований рассматриваемых типов узловых соединений, которая дает возможность экспериментально выявить новые закономерности и особенности действительной работы указанного вида железобетонных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Анализ деформирования и трещинообразования многоэтажных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий в предельных и запредельных состояниях // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 8–13. EDN XACMTX.
2. 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. Issue 3. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037. EDN HBZKBR.

3. Бу Н.Т. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 73–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84. EDN OREECE.

4. 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. № 11. С. 1462–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472. EDN ZBNYMY.

5. Nadir W., Ali A.Y., Jawdhari A., Kadhim M.M.A., Majdi A. Cyclic behavior of UHPC corner beam-column joints under bi-directional bending // Structures. 2024. Vol. 60. P. 105857. DOI: 10.1016/J. ISTRUC. 2024.105857

6. Palomo I.R.I., Frappa G., de Almeida L.C., Trautwein L.M., Pauletta M. Analytical and numerical models to determine the strength of RC exterior beam-column joints retrofitted with UHPFRC // Engineering Structures. 2024. Vol. 312. P. 118244. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.118244

7. Mitra N., Lowes L.N. Evaluation, Calibration, and Verification of a Reinforced Concrete Beam-Column Joint Model // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133. Issue 1. Pp. 105–120. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(105)

8. Hou S., Shi D., Fan J., Wu T., Sun W., Wu G. et al. Comparative study on failure mechanism of full-scale precast and cast-in-place beam-column joints based on acoustic emission technology // Structures. 2024. Vol. 65. P. 106629. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106629

9. Selim M., Khalifa R., Elshamy E., Zaghlal M. Structural efficiency of fly-ash based concrete beam-column joint reinforced by hybrid GFRP and steel bars // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e02927. DOI: 10.1016/J. CSCM.2024.E02927

10. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Петряшев Н.О., Петряшев С.О., Негрозов О.А. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций высотного здания с учетом фактического положения железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 50–68. EDN TPKOQP.

11. Yang R., Luo K.H., Huang S.M., Qiao Y.M. Influence of column-to-beam flexural modulus ratio on the failure mode of RC frame inner joints: Theoretical analysis and experimental investigation // Structures. 2025. Vol. 71. P. 108105. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.108105

12. Cosgun C., Turk A.M., Mangir A., Cosgun T., Kiyamaz G. Experimental behaviour and failure of beam-column joints with plain bars, low-strength concrete and different anchorage details // Engineering Failure

Analysis. 2020. Vol. 109. P. 104247. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104247

13. Hu G., Zhang Z., Cao B., Pan Z., Zeng L. Seismic behavior of precast concrete beam-column joints with bending moment-shear separation controllable plastic hinge // Engineering Structures. 2024. Vol. 304. P. 117585. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.117585

14. Kalogeropoulos G., Tsonos A.D., Iakovidis P. Hysteresis Behavior of RC Beam-Column Joints of Existing Substandard RC Structures Subjected to Seismic Loading-Experimental and Analytical Investigation // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1609. DOI: 10.3390/buildings14061609

15. Mao W.H., Liu J.P., Qi H.T., Nishiwaki T., Ding Y. Anchorage characteristics and their impacts on the seismic performance of HECC/RC composites external beam-column joint // Structures. 2024. Vol. 63. P. 106469. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106469

16. Tong Z., Xu L., Wei C., Chi Y., Huang L. Upgrading seismic performance of beam-column joints using steel-polypropylene hybrid fiber: Experiment and numerical simulation // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 86. P. 108681. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.108681

17. Zhang X., Li B. Investigation on effect of ECC coverage condition on seismic behavior of beam-column joint // Structures. 2024. Vol. 62. P. 106195. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106195

18. Patel P., Desai A., Bid S., Desai P. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. P. 134511. DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT.2023.134511

19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 290–297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.

20. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. Issue 3 (47). Pp. 6–26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001. EDN LOHTQP.

21. Федорова Н.В., Колчунов В.И., Бушова О.Б. Расчет параметров деформирования железобетонных рам при разрушении ригелей по наклонному сечению // Строительство и реконструкция. 2023. № 2 (106). С. 90–100. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-90-100. EDN TPMSGY.

Поступила в редакцию 10 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 15 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Иванович Колчунов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3990-0345, Scopus: 57219135548, ResearcherID: S-7792-2016, ORCID: 0000-0001-5075-1134; vlik52@mail.ru;

Павел Анатолиевич Кореньков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Наталья Витальевна Федорова — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57196437054, Researcher ID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfmgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fedorova N.V., Korenkov P.A. Analysis of deformation and crack formation of multistory monolithic reinforced concrete frame-bar structural systems under limit and beyond-limit conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 11:8-13. EDN XACMTX. (rus.).
2. 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; 753(3):032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037. EDN HBZKBR.
3. Vu N.T. Study of survivability of reinforced concrete constructive nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic formulation. *Building and Reconstruction*. 2020; 4(90):73-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84. EDN OREECE. (rus.).
4. 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. EDN ZBNYMY. (rus.).
5. Nadir W., Ali A.Y., Jawdhari A., Kadhimi M.M.A., Majidi A. Cyclic behavior of UHPC corner beam-column joints under bi-directional bending. *Structures*. 2024; 60:105857. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.105857
6. Palomo I.R.I., Frappa G., de Almeida L.C., Trautwein L.M., Pauletta M. Analytical and numerical models to determine the strength of RC exterior beam-column joints retrofitted with UHPFRC. *Engineering Structures*. 2024; 312:118244. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.118244
7. Mitra N., Lowes L.N. Evaluation, Calibration, and Verification of a Reinforced Concrete Beam-Column Joint Model. *Journal of Structural Engineering*. 2007; 133(1):105-120. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(105)
8. Hou S., Shi D., Fan J., Wu T., Sun W., Wu G. et al. Comparative study on failure mechanism of full-scale precast and cast-in-place beam-column joints based on acoustic emission technology. *Structures*. 2024; 65:106629. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.106629
9. Selim M., Khalifa R., Elshamy E., Zaghlat M. Structural efficiency of fly-ash based concrete beam-column joint reinforced by hybrid GFRP and steel bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e02927. DOI: 10.1016/J. CSCM.2024.E02927
10. Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Petryashev N.O., Petryashev S.O., Negrozov O.A. Strength and Stability Analysis of Load-Bearing Structures of a High-Rise Building with Account for Actual Positions of Reinforced Concrete Structural Members. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 4:50-68. EDN TPKOQP. (rus.).
11. Yang R., Luo K.H., Huang S.M., Qiao Y.M. Influence of column-to-beam flexural modulus ratio on the failure mode of RC frame inner joints: Theoretical analysis and experimental investigation. *Structures*. 2025; 71:108105. DOI: 10.1016/J. ISTRUC.2024.108105
12. Cosgun C., Turk A.M., Mangir A., Cosgun T., Kiyamaz G. Experimental behaviour and failure of beam-column joints with plain bars, low-strength concrete and different anchorage details. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 109:104247. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104247

13. Hu G., Zhang Z., Cao B., Pan Z., Zeng L. Seismic behavior of precast concrete beam-column joints with bending moment-shear separation controllable plastic hinge. *Engineering Structures*. 2024; 304:117585. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2024.117585
14. Kalogeropoulos G., Tsonos A.D., Iakovidis P. Hysteresis Behavior of RC Beam–Column Joints of Existing Substandard RC Structures Subjected to Seismic Loading–Experimental and Analytical Investigation. *Buildings*. 2024; 14(6):1609. DOI: 10.3390/buildings-14061609
15. Mao W.H., Liu J.P., Qi H.T., Nishiwaki T., Ding Y. Anchorage characteristics and their impacts on the seismic performance of HECC/RC composites external beam-column joint. *Structures*. 2024; 63:106469. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106469
16. Tong Z., Xu L., Wei C., Chi Y., Huang L. Upgrading seismic performance of beam-column joints using steel-polypropylene hybrid fiber: Experiment and numerical simulation. *Journal of Building Engineering*. 2024; 86:108681. DOI: 10.1016/J. JOBE.2024.108681
17. Zhang X., Li B. Investigation on effect of ECC coverage condition on seismic behavior of beam-column joint. *Structures*. 2024; 62:106195. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106195
18. Patel P., Desai A., Bid S., Desai P. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134511. DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT.2023.134511
19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(4):290-297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCQ.
20. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 3(47):6-26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001. EDN LOHTQP.
21. Fedorova N.V., Kolchunov V.I., Bushova O.B. Calculation of parameters of deformation of reinforced concrete frames during the destruction of crossbars along an inclined section. *Building and Reconstruction*. 2023; 2(106):90-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-90-100. EDN TPMSGY. (rus.).

Received April 10, 2025.

Adopted in revised form on April 15, 2025.

Approved for publication on June 15, 2025.

B I O N O T E S : **Vladimir I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling, Corresponding Member of RAACS; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3990-0345, Scopus: 57219135548, ResearcherID: S-7792-2016, ORCID: 0000-0001-5075-1134; vlik52@mail.ru;

Pavel A. Korenkov — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Natalia V. Fedorova — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering, Advisor of RAACS; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57196437054, Researcher ID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfngsu.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.