

17. Taranukha N.L., Novikov M.Yu. (2023) "Improving Designing Efficiency of Antenna-Mast Structures for Cellular Communications Based on Design Solutions Assessment", Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, vol. 26, no. 1, pp. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2023-1-84-90>
18. Amlan Das, Shiva Kumar (2015). "Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines", International Journal of Science and Research, vol. 4, no. 4, pp. 999-1003.
19. Fu X, Li H.N., Li G., Dong Zh.Q., Zhao Mi. (2021) "Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity", Engineering Structures, vol. 233, pp. 111913., available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73311833> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.111913.
20. Fu X, Wang J., Li H. N., Li J.X., Yang L.D. (2019) "Full-Scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission Tower under Extreme Wind Loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 190, pp. 119-133, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38967402> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.jweia.2019.04.011.
21. Adam, J.M., Parisi, F., Sagasetta, J., and Lu, X. (2018), "Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century", Engineering Structures, vol. 173, pp. 122-149, available at: <https://iranarze.ir/storage/uploads/2019/01/E10800-IranArze.pdf> (Accessed 21 April 2026). DOI 10.1016/J. ENGSTRUCT.2018.06.082.
22. Zheng L., Wang W., Li H. (2022) "Progressive Collapse Resistance of Composite Frame with Concrete Filled Steel Tubular Column under a Penultimate Column Removal Scenario", Journal of Constructional Steel Research, vol. 189, pp. 107085, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58587799> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107085.

© А. В. Голиков, А. В. Танасогло

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Танасогло А. В. Напряженно-деформированное состояние опор двойного назначения сплошного сечения с учетом особенностей размещения оборудования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 12-21.

УДК 624.012.45

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-21-26

**АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ВНЕЦЕНТРОННОГО СЖАТИЯ И КРУЧЕНИЯ:
ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

М. А. Амелина, М. Н. Кузнецов

Амелина Маргарита Андреевна, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (951) 073-26-98; e-mail: AmelinaMA@mgsu.ru;

Кузнецов Михаил Николаевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (985) 441-19-80; e-mail: mk_stars55@mail.ru

В статье выполнен анализ деформирования железобетонных колонн при совместном действии внецентренного сжатия и кручения. Рассмотрены теоретические подходы к расчету, включая пространственные модели трещинообразования и методики определения напряженно-деформированного состояния. Приведены результаты экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов. Показано, что учет кручения существенно влияет на перераспределение усилий и может изменять несущую способность в несколько раз. Установлено, что при сложном нагружении формируются наклонные трещины под углом 22-45°. Проанализированы современные расчетные модели (теория пластичности бетона, МКЭ). Мы разобрали, как процент армирования, размеры и форма сечения, а также свойства бетона влияют на деформации и разрушения конструкций. Сравнили результат российских и зарубежных исследований о проведении железобетонных элементов под сложными нагрузкам. Рассмотрены особенности формирования пространственных трещин, развитие деформации бетона и арматуры, а также влияние крутящего воздействия на перераспределение внутренних усилий в конструктивной системе. Отмечена необходимость совершенствования существующих методов расчета. Полученные результаты могут быть использованы при разработке расчетных моделей и улучшения методов проектирования в строительных условиях. Результаты полезны для проектирования конструкций при сложных силовых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонные колонны, внецентренное сжатие, кручение, деформирование, пространственные трещины, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования.

**ANALYSIS OF DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
UNDER COMBINED ACTION OF ECCENTRIC COMPRESSION AND TORSION:
REVIEW OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES**

M. A. Amelina, M. N. Kuznetsov

Amelina Margarita Andreyevna, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (951) 073-26-98; e-mail: AmelinaMA@mgsu.ru;

Kuznetsov Mikhail Nikolayevich, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (985) 441-19-80; e-mail: mk_stars55@mail.ru

This paper presents an analysis of the deformation behavior of reinforced concrete columns subjected to combined eccentric compression and torsion. Theoretical approaches to structural analysis are examined, including spatial crack formation models and methods for determining the stress-strain state. Experimental results from both domestic and international researchers are reported. It is shown that accounting for torsion significantly affects force redistribution and may alter the load-bearing capacity by several times. It is established that under complex loading, inclined cracks form at angles of 22–45 degrees. Modern computational models, including concrete plasticity theory and the finite element method (FEM), are analyzed. Modern computational models (theory of concrete plasticity, FEM) are analyzed. We have analyzed how the percentage of reinforcement, the size and shape of the section, as well as the properties of concrete affect the deformation and destruction of structures. We compared the results of Russian and foreign studies on the construction of reinforced concrete elements under complex loads. The results of domestic and foreign studies on the behavior of reinforced concrete elements under complex stress-strain conditions are compared. The formation of spatial cracks, the development of concrete and reinforcement deformation, and the influence of torsional effects on the redistribution of internal forces in the structural system are examined. The need to improve existing calculation methods is noted. The obtained results can be used in the development of calculation models and the improvement of design methods in construction environments. The findings are useful for the design of structures under complex loading conditions.

Keywords: reinforced concrete columns, eccentric compression, torsion, deformation, spatial cracks, stress-strain state, experimental studies.

Введение

Железобетонные колонны относятся к числу наиболее распространенных несущих элементов каркасных зданий и сооружений. В реальных условиях эксплуатации такие конструкции нередко подвергаются не только осевому или внецентренному сжатию, но и действию крутящих моментов, возникающих вследствие эксцентричного приложения нагрузок, ветровых воздействий, односторонних нагрузок на ригели или аварийных ситуаций. Совместное действие внецентренного сжатия и кручения в железобетонных колоннах сложное пространственное напряженно-деформированное состояние, изучение которого представляет значительный научный и практический интерес [1, 4, 7, 10, 11].

В полносборных каркасных системах крутящий момент в элементах может составлять 0,4–0,7 от изгибающего момента. При этом учет кручения в расчетах может привести к существенному изменению распределения усилий между элементами конструкции и даже к обрушению отдельных конструкций или здания в целом [2,6]. Особенно актуальной данная проблема становится при использовании высокопрочных бетонов, характеристики деформирования которых при сложном нагружении изучены недостаточно [4].

Теоретические основы расчета железобетонных элементов при кручении

Сложность расчета железобетонных конструкций при кручении обусловлена анизотропией материала, нарушением сплошности вследствие трещинообразования и наличием пространственного напряженного состояния [10, 14]. Существующие методики расчета основаны преимущественно на эмпирических зависимостях, полученных для бетонов средней прочности, что ограничивает их применимость для современных высокопрочных материалов [11, 15].

В работах Д. Х. Касаева предложена концепция, согласно которой кручение вызывает изгиб элемента в плоскости, проходящей под углом 45° к его продольной оси [5]. Эта модель, первоначально разработанная для пластинчатых конструкций, была распространена на стержневые элементы прямоугольного сечения. В расчетной схеме мы принимаем, что сечение остаются плоскими. Продольная и поперечная арматура работает на растяжение, бетон на сжатие. Трещины идут под углом 45° к горизонтальному граням элемента. Крутящий момент считают относительно оси, которая проходит

через точку приложения равнодействующей сжимающих направлений в бетоне. Его находят по интенсивности армирования и опытным параметрам. Впрочем, такой подход демонстрирует значительные расхождения при изменении геометрических характеристик сечения и процента армирования [3].

Модели и методы

Методы расчета наклонных сечений

Если в элементах нет поперечной арматуры, прочность наклонного сечения определяет касательное усилие в сжатой зоне бетона. Эмпирическая зависимость, предложенная М. С. Боришанским, связывает это усилие с прочностью бетона и длиной проекции наклонной трещины [1]. Позднее А. С. Залесов предложил учитывать также нагельный эффект в продольной арматуре и силы зацепления

по берегам наклонной трещины, что существенно уточнило расчетную модель.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что несущая способность наклонных сечений зависит не только от прочности бетона, но и от процента продольного армирования, высоты сечения (масштабный эффект) и характера нагружения. Европейские нормы проектирования, в отличие от отечественных, учитывают влияние продольного армирования через эмпирические коэффициенты, что приводит к различным оценкам несущей способности – расхождения могут достигать 25–30 % для элементов высотой более 300 мм [1].

Характер трещинообразования при сложном нагружении

Опыты показали: при кручении с изгибом в железобетонных элементах появляются пространственные трещины. Они идут по сложной траектории [7, 9, 19]. На нижней грани трещины наклонены к продольной оси на 22–31°, на боковых примерно 45° . Чем больше отношение крутящего момента к изгибающему, тем больше угол наклона трещин на нижней грани.

Для элементов круглого сечения характерно образование двух доминирующих трещин, тогда как для кольцевых сечений наблюдается несколько среди трещин одна главная. На ступенях нагружения перед разрушением она раскрыта шире остальных [4]. У круглого сечения немного меньше концентрация напряжений. Это связано со структурой высокопрочного бетона.

Толщины раскрыты в два-три раза меньше на уровне арматуры, чем на расстоянии 1,5–2 диаметра от оси стержня. Так получается из-за нагельного действия стержней и местного сопротивления бетона рядом с арматурой.

Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций

Методика экспериментальных исследований

Чтобы понять, как железобетонные конструкции работают при кручении с изгибом, мы разработали свои методики испытаний. Измеряли прогиб, углы закручивания, деформации бетона и арматуры. Следили за тем, как появляются трещины.

Использовали индуктивные датчики перемещений, тензорезисторы, электротензометрические розетки. Для наблюдения за развитием трещин применяли высокоскоростную съемку [7].

Важнейшими параметрами, определяемыми в ходе испытаний, являются: нагрузка трещинообразования и также фиксировали разрушающую нагрузку, места появления пространственных трещин, ширину их раскрытия на разных уровнях, расстояние между трещинами, деформации сжатого бетона и арматура при сложных нагрузках.

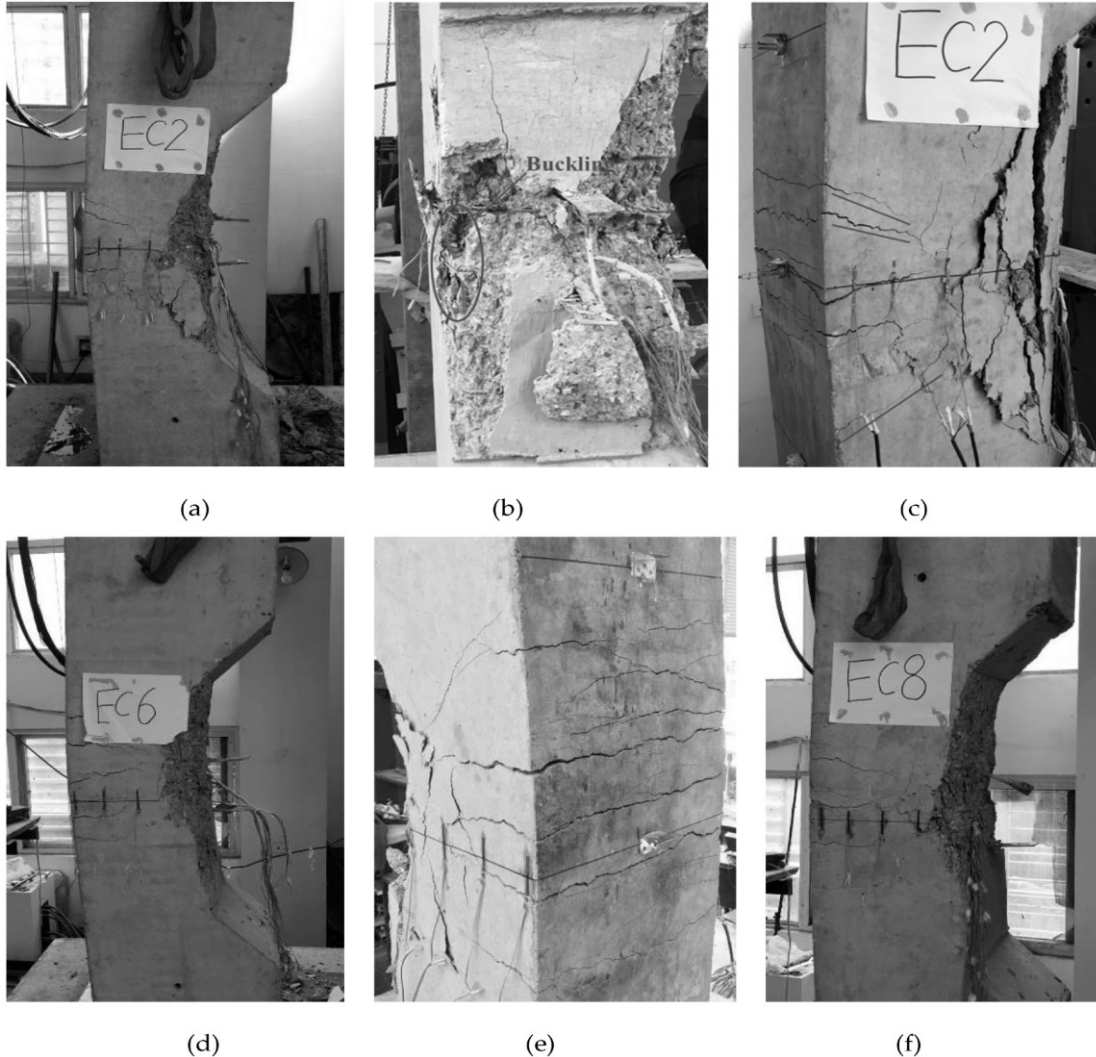


Рис. Схема экспериментальных нагружений железобетонных элементов при совместном действии внецентренного сжатия, изгиба и кручения:
 (a) окончательный вид разрушения; (b) потеря устойчивости продольного стержня; (c) трещины растяжения;
 (d) окончательный вид разрушения по стандарту; (e) крупные трещины;
 (f) окончательный вид разрушения по стандарту [источник: <https://clck.ru/3TMdtr>]
 Fig. Scheme of experimental loads of reinforced concrete elements under the combined action of off-center compression, bending and torsion:
 (a) final failure mode; (b) longitudinal bar buckling; (c) tensile cracks; (d) final failure mode according to standard;
 (e) large cracks; (f) final failure mode according to standard [source: <https://clck.ru/3TMdtr>]

Опытные образцы железобетонные балки 200 × 100 × 2000 мм. Армированы пространственным каркасом: продольная арматура класса А500С,

поперечная класса А240. Для высокопрочного бетона класса В100 были испытаны образцы круглого

диаметром 410 мм и кольцевого сечений [4]. Нагружение осуществлялось ступенчато с выдержкой на каждой ступени для снятия показаний приборов.

Результаты испытаний образцов при статическом нагружении

По результатам испытаний построены зависимости прогибов и углов поворота от нагрузки, графики деформаций бетона и арматуры. Деформации бетона, измеренные электротензометрическими розетками, позволили определить главные деформации удлинения и укорочения в различных точках расчетного сечения. Арматура была подобрана так, чтобы перед разрушением она достигла текучести, что позволило точно определить напряжения в стержнях [7].

Образцы разрушались с появлением пространственного сечения. Оно ограничено спиральной трещиной на трех растянутых гранях и трещиной в сжатой зоне. Анализ трещинообразования показал, что расстояние между трещинами и их длина изменяются по мере увеличения нагрузки, формируя два-три уровня трещинообразования к моменту разрушения.

Для элементов из высокопрочного бетона характерна меньшая деформативность по сравнению с обычным бетоном, но более хрупкий характер разрушения [4]. Координаты точек образования пространственных трещин зафиксированы с использованием трехмерной системы координат, что позволило построить детальные схемы развития трещин.

Динамическое нагружение конструкций

При испытаниях на кратковременное динамическое нагружение использовался специально разработанный стенд, позволяющий создавать одновременное действие изгибающего и крутящего моментов [18]. Мы снимали видео на 2000 кадров в секунду. Так увидели, как при динамической нагрузке образуется пространственное сечение и появляются трещины.

Трещины в растянутой зоне начинаются на уровне центра тяжести продольной арматуры. Сначала они идут перпендикулярно продольной оси элемента, потом отклоняются и становятся наклонными на нижней и боковых гранях. Разрушение происходит при достижении продольной арматурой состояния текучести.

Сравнение результатов статических и динамических испытаний показало, что характер трещинообразования принципиально не меняется, однако скорость развития трещин и несущая способность при динамическом нагружении могут отличаться на 10–15%.

Современные методы расчета и моделирования

Метод конечных элементов

Для моделирования сложного напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн при внецентренном сжатии с кручением применяется метод конечных элементов с использованием суперэлементной технологии [8, 19]. Бетон моделируется объемными элементами с восемью узлами. Арматуру

стержневыми элементами с двумя узлами, они работают на растяжение и сжатие. В узлах сетки элементы соединяем, чтобы бетон и арматура работали вместе.

Если учитываем геометрическую нелинейность, вычислим приближенную матрицу жесткости и вектор узловых сил. Эти силы статически соответствуют внутренним напряжениям. Физическая нелинейность учитывается через диаграммы деформирования материалов. Проверочные расчеты показали, что расхождение численных результатов с теоретическими значениями критической нагрузки составляет 2–3 %, что подтверждает достоверность предложенной методики [8, 19].

Однако следует отметить, что в реальности железобетонные колонны разрушаются либо от потери устойчивости, либо от пластических деформаций в бетоне и арматуре, появления раскрытия трещин, что требует дальнейшего совершенствования расчетных моделей [16].

Полуэмпирические подходы

Альтернативой полностью эмпирическим методам являются полуэмпирические подходы, основанные на модифицированной теории полей сжатия. С помощью этих методик мы учитываем процент продольного армирования при расчете касательного усилия в сжатой зоне бетона. Для элементов разной высоты результаты лучше совпадают с опытами [5, 11, 14, 15].

Для элементов с отверстиями при кручении с изгибом, предложены расчетные модели, учитывающие различные формы разрушения: положительный изгиб, боковой изгиб и отрицательный изгиб. Предельный крутящий момент определяется как минимальное значение из трех возможных сценариев разрушения. Установлено, что с увеличением размеров отверстия несущая способность снижается, а усиление зоны отверстия диагональными стержнями повышает прочность на 15–20 %.

Влияние процента армирования на несущую способность

Опыт показывает: прочность изгибающихся элементов при срезе сильно зависит от доли продольной арматуры. С ростом процента армирования с 1 до 3 % может привести к возрастанию несущей способности на 30–40 % [5]. Это объясняется усилением нагельного эффекта и повышением жесткости элемента, что препятствует развитию наклонных трещин.

Для пластинчато-стержневых конструкций, в которых элементы ориентированы большей стороной сечения перпендикулярно плоскости конструкции, влияние продольного армирования проявляется еще более отчетливо. При изменении крутильной жесткости отдельных элементов в четыре раза изгибающие моменты в соседних элементах могут изменяться в несколько раз, что накладывает существенный отпечаток на напряженно-деформированное состояние всей конструкции [2].

Практические рекомендации по проектированию

При проектировании железобетонных колонн, подверженных внецентренному сжатию с кручением, следует учитывать следующие факторы:

- необходимость детального анализа возможных сценариев нагружения, включая аварийные ситуации;
- обязательный учет крутильной жесткости элементов при расчете пространственных систем [2];
- рациональное армирование с учетом пространственного характера трещинообразования;
- применение конструктивных мероприятий, повышающих сопротивление кручению (замкнутые хомуты, спиральное армирование);
- использование современных методов численного моделирования для проверки расчетных схем [8].

Для элементов из высокопрочного бетона особое внимание должно уделяться обеспечению пластичности конструкции путем рационального армирования, высокопрочные бетоны разрушаются более хрупко [4].

Заключение

Когда на колонну одновременно действуют внецентренное сжатие и кручение, в ней возникает сложное пространственное напряженное состояние. Появляются наклонные трещины, усилия перерас-

пределяются между элементами конструкции. Экспериментальные исследования показали, что учет кручения в расчетах может привести к существенному изменению несущей способности конструкций.

Современные расчетные методы, основанные на методе конечных элементов и полуэмпирических зависимостях, позволяют с достаточной точностью моделировать поведение железобетонных элементов при сложном нагружении. Однако для элементов из высокопрочных бетонов требуются дополнительные исследования, направленные на уточнение параметров деформирования и критериев прочности.

Дальнейшее развитие теории расчета железобетонных конструкций при кручении с внецентренным сжатием должно быть направлено на создание более совершенных физических моделей, учитывающих реальное поведение материалов при сложном напряженном состоянии, разработку практических методик расчета, адаптированных к современным нормативным документам, и накопление экспериментальных данных для широкого диапазона конструктивных решений и классов бетона.

Список литературы

1. Филатов В.Б., Арцыбасов А.С., Багаутдинов М.А., Гордеев Д.И., Кортуннов А.И., Никитин Р.А. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 100–106.
2. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 51–61.
3. Топилин А.Н. Пластинчато-стержневые железобетонные конструкции с повышенной сопротивляемостью кручению // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 180–185.
4. Меликсетян С.Р., Кайдас П.А., Коренькова О.О. Прочность и деформативность изгибаемых монолитных железобетонных элементов при динамических аварийных воздействиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2025. № 2 (52). С. 11–16.
5. Касаев Д.Х. Прочность элементов железобетонных конструкций при кручении и изгибе с кручением. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 2001. 176 с.
6. Шамшина К.В. Результаты экспериментальных исследований деформационных свойств сжимаемых железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 1 (31). С. 26–33.
7. Агапов В.П., Васильев А.В. Учет геометрической нелинейности при расчете железобетонных колонн прямоугольного сечения методом конечных элементов // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 16–24.
8. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Покусаев А.А. Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 6. С. 37–44.
9. Rahal K.N., Collins M.P. Analysis of sections subjected to combined shear and torsion // ACI Structural Journal. 1996. Vol. 93. No. 4. Pp. 459–469.
10. Onsongo M. Behavior of reinforced concrete beams subjected to combined torsion, bending and shear // ACI Journal Proceedings. 1978. Vol. 75. No. 11. Pp. 535–542.
11. Qian K., Li B. Dynamic performance of RC beam-column substructures under the scenario of the loss of a corner column: Experimental results // Engineering Structures. 2012. Vol. 42. Pp. 154–167.
12. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 210. Article 110414.
13. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. Experimental studies of 3D RC substructures under exterior and corner column removal scenarios // Engineering Structures. 2017. Vol. 150. Pp. 409–427.
14. Rabbat B.G., Collins M.P. Finite element analysis of reinforced concrete members subjected to combined loading // Journal of Structural Engineering. 1982. Vol. 108. No. 6. Pp. 1298–1315.
15. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework // Engineering Structures. 2008. Vol. 30. No. 5. Pp. 1308–1318.
16. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application // Engineering Structures. 2008. Vol. 30. No. 5. Pp. 1424–1438.
17. Qian K., Li B. Performance of three-dimensional reinforced concrete beam-column substructures under loss of a corner column scenario // Journal of Structural Engineering. 2013. Vol. 139. No. 4. Pp. 584–594.
18. Hsu T.T.C. Torsion of Reinforced Concrete. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. 520 p.
19. Vecchio F.J., Collins M.P. The Modified Compression Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear // ACI Journal. 1986. Vol. 83. No. 2. Pp. 219–231

20. Lampert P., Thürlimann B. Ultimate strength and design of reinforced concrete beams in torsion and bending // IABSE Publications. 1968. Vol. 28. Pp. 157–179.

References

1. Agapov, V.P., & Vasiliev, A.V. (2014). Accounting for geometric nonlinearity in the calculation of reinforced concrete rectangular columns by the finite element method. *Vestnik MGSU (Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering)*, (4), 16–24.
2. Filatov, V.B., Artsybasov, A.S., Bagautdinov, M.A., Gordeev, D.I., Kortunov, A.I., & Nikitin, R.A. (2014). Analysis of calculation models for strength analysis of inclined sections of reinforced concrete beams under shear forces. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN (Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*, 16(4), 100–106.
3. Rahal, K.N., & Collins, M.P. (1996). Analysis of sections subjected to combined shear and torsion. *ACI Structural Journal*, 93(4), 459–469.
4. Onsongo, M. (1978). Behavior of reinforced concrete beams subjected to combined torsion, bending and shear. *ACI Journal Proceedings*, 75(11), 535–542.
5. Adam, J.M., Buitrago, M., Bertolesi, E., Sagaseta, J., & Moragues, J.J. (2020). Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Engineering Structures*, 210, Article 110414.
6. Qian, K., & Li, B. (2012). Dynamic performance of RC beam-column substructures under the scenario of the loss of a corner column: Experimental results. *Engineering Structures*, 42, 154–167.
7. Demyanov, A.I., Kolchunov, V.I., & Pokusaev, A.A. (2017). Experimental studies of deformation of reinforced concrete structures under torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy (Construction Mechanics of Engineering Structures and Structures)*, (6), 37–44.
8. Lim, N.S., Tan, K.H., & Lee, C.K. (2017). Experimental studies of 3D RC substructures under exterior and corner column removal scenarios. *Engineering Structures*, 150, 409–427.
9. Rabbat, B.G., & Collins, M.P. (1982). Finite element analysis of reinforced concrete members subjected to combined load-ing. *Journal of Structural Engineering*, 108(6), 1298–1315.
10. Travush, V.I., Karpenko, N.I., Kolchunov, V.I., Kaprielov, S.S., Demyanov, A.I., & Konorev, A.V. (2019). Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete B100 of circular and annular sections under torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy (Construction Mechanics of Engineering Structures and Structures)*, 15(1), 51–61.
11. Qian, K., & Li, B. (2013). Performance of three-dimensional reinforced concrete beam-column substructures under loss of a corner column scenario. *Journal of Structural Engineering*, 139(4), 584–594.
12. Topilin, A.N. (2011). Plate-rod reinforced concrete structures with increased torsional resistance. *Vestnik MGSU (Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering)*, (2), 180–185.
13. Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., & Nethercot, D.A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*, 30(5), 1308–1318.
14. Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., & Nethercot, D.A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application. *Engineering Structures*, 30(5), 1424–1438.
15. Shamshina, K.V. (2020). Results of experimental studies of deformation properties of compressed reinforced concrete structures with corrosion longitudinal cracks in the protective layer of concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya (Civil Engineering Bulletin of the Caspian Region)*, (1), 26–33.
16. Kasaev, D.Kh. (2001). *Strength of reinforced concrete structural elements under torsion and bending with torsion*. Rostov-on-Don: Rostov University Press.
17. Meliksetyan, S.R., Kaidas, P.A., & Korenkova, O.O. (2025). Strength and deformability of bent monolithic reinforced concrete elements under dynamic emergency impacts. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya (Civil Engineering Bulletin of the Caspian Region)*, (2), 11–16.
18. Vecchio, F.J., & Collins, M.P. (1986). The Modified Compression Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, 83(2), 219–231.
19. Hsu, T.T.C. (1984). *Torsion of Reinforced Concrete*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
20. Lampert, P., & Thürlimann, B. (1968). Ultimate strength and design of reinforced concrete beams in torsion and bending. *IABSE Publications*, 28, 157–179.

© М. А. Амелина, М. Н. Кузнецов

Ссылка для цитирования:

Амелина М. А., Кузнецов М. Н. Анализ деформирования железобетонных колонн при совместном действии внецентренного сжатия и кручения: обзор теоретических и экспериментальных исследований // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 21–26.