

П.А. КОРЕНЬКОВ<sup>1</sup>, Н.В. ФЕДОРОВА<sup>1</sup>, П.А. КАЙДАС<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИВУЧЕСТИ СБОРНО-МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА

*Аннотация.* Приведена методика проведения экспериментальных и численных исследований железобетонных рам-фрагментов сборно-монолитной железобетонной конструктивной системы многоэтажных зданий. Целью проведенных исследований являлось определение характера изменения параметров статико-динамического деформирования и силового сопротивления предлагаемой конструктивной системы как на стадии эксплуатации, так и при аварийном воздействии, вызванным выключением из работы одного из элементов - угловой колонны первого этажа. Для повышения сопротивляемости исследуемой системы к локальному или прогрессирующему обрушению предложены новые конструктивные решения ригелей сборно-монолитной рамы, позволяющие повысить ее сопротивляемость при внезапном изменении силовых потоков в рассматриваемой конструктивной системе. Предложены аналитические зависимости для определения параметров межсредовой зоны контакта в сборно-монолитной конструкции ригеля. Решение рассматриваемых задач выполнено с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР с учетом диаграмм работы материала, учитывающих статико-динамический характер нагружения конструкций. Приведено обоснование принятых конструктивных решений опытных конструкции рам-фрагментов для разработки программы проведения экспериментальных исследований рассматриваемой конструктивной системы при особых воздействиях.

*Ключевые слова:* живучесть, сборно-монолитный каркас, особое предельное состояние, физическая нелинейность.

P.A. KORENKOV<sup>1</sup>, N.V. FEDOROVA<sup>1</sup>, P.A. KAYDAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

## RESISTANCE OF THE PRECAST - CAST-IN-SITU REINFORCED CONCRETE FRAMES OF CIVIL BUILDINGS UNDER SPECIAL EMERGENCY IMPACT

*Abstract.* The article presents a technique for carrying out experimental and numerical studies of reinforced concrete frame-fragments of a prefabricated monolithic reinforced concrete structural system of multi-storey buildings. The purpose of the research was to determine the nature of the change in the parameters of static-dynamic deformation and force resistance of the proposed structural system both at the stage of operation and during an emergency impact caused by the shutdown of one of the elements - the corner column of the first floor. To increase the resistance of the system under study to local or progressive collapse, new design solutions for the crossbars of the prefabricated monolithic frame are proposed, which make it possible to increase its resistance to a sudden change in power flows in the structural system under consideration. Analytical dependencies are proposed to determine the parameters of the intermedium contact zone in the prefabricated-monolithic structure of the crossbar. The solution of the problems under consideration was carried out using the LIRA-SAPR software package, taking into account material operation diagrams that take into account the static-dynamic nature of the loading of structures. The substantiation of the adopted design solutions for experimental designs of frame fragments for developing a program for conducting experimental studies of the structural system under consideration under special effects is given.

**Keywords:** *survivability, precast-monolithic frame, special limiting state, material nonlinearity.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct.* 2018. 173. Pp. 122–149.
2. Мониторинг объемов жилищного строительства. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/zhilishnaya-politika/8/>
3. Мажанская Е.В. Экономические факторы, влияющие на стоимость строительства / Е.В. Мажанская, А.С. Пасечник, Д.А. Калинина [и др.] // *Экономические науки.* 2020. № 184. С. 58-61. doi:10.14451/1.184.58
4. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Шапиро Г.И., Гасанов А.А. Расчеты крупнопанельных зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения методами предельного равновесия и конечного элемента // *ACADEMIA. Архитектура и строительство.* 2016. № 4. С. 109-111.
5. Krentowski J.R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings // *Engineering Failure Analysis.* 2021. Vol. 121, 105059. ISSN 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105059>.
6. Sokolov B.S. Construction of Deformation Diagrams of Concrete Under Shear Based on the Author's Theory of Anisotropic Materials Power Resistance to Compression and Deformation Theory of Plasticity // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2019. No. 15. Pp. 149–160.
7. Baran E., Mahamid M., Baran M., Kurtoglu M., Torra-Bilal I. Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction // *Engineering Structures.* 2021. 246, 113005.
8. Barański J., Berkowski P. Computer Modelling of Precast Large-panel Buildings with Degraded Horizontal Joints // *Procedia Engineering.* 2015. 111. Pp. 89–96.
9. Xia K., Hu X. & Xue W. Experimental studies on in-plane connections of composite beam-precast concrete shear wall under reversed cyclic loading // *Structures.* 2021. 34. 1961–1972.
10. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // *Magazine of Civil Engineering.* 2019. No. 8. Pp. 155–162.
11. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Емельянов С.Г. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн // *Жилищное строительство.* 2018. № 12. С. 3-7.
12. Savin S.Y., Fedorov S.S. Stability analysis of reinforced concrete building frames damaged by corrosion under static-dynamic loading // *Journal of Physics: Conference Series.* 2019. 1425, 012043.
13. Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Almusallam T.H., Abbas H. Finite element analysis for progressive collapse potential of precast concrete beam-to-column connections strengthened with steel plates // *Journal of Building Engineering.* 2021. 34, 101875.
14. Fedorova N., Tamrazyan A., Korenkov P. Industrial constructive system of civil buildings of increased survivability // *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 97. P. 04003
15. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Фомичев С.И., Прочность железобетонных платформенных стыков жилых зданий с перекрестно-стеновой системой из панельных элементов // *Жилищное строительство.* 2009. № 12. С. 12-16.
16. Соколов Б.С., Трошков Е.О. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований штепсельных стыков сборных железобетонных колонн с плитами перекрытий // *Жилищное строительство.* 2017. № 7. С. 41-46.
17. Трошков Е.О. Экспериментальные исследования штепсельных стыков второго типа на сдвиг // Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сборник докладов IX Академических чтений РААСН – Международной научной конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 85–90.
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, Aref A. Abadel, Mohammed Alrubaidi. Precast RC structures' progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements, *Structures*, 2022. Vol. 37. Pp. 338-352. ISSN 2352-0124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.086>.
19. Johannes A.J. Huber, Hercend Mpidi Bita, Thomas Tannert, Sven Berg. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems // *Engineering Structures.* 2021. Vol. 240, 112362. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112362>.
20. Yu J., Tan K.H. Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario // *J. Struct. Eng.* 2013. Vol. 139. No. 2. Pp. 233–250.
21. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites // *Eng. Struct.* 2015.
22. Forquin P., Chen W. An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 152. P. 1068–1084.

23. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam–Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention // *J. Struct. Eng.* 2019. Vol. 145. No. 5. P. 04019020.
24. Колчунов В.И., Панченко Л.А. Расчет составных тонкостенных конструкций. М.: АСВ, 1999. 281 с.
25. Колчин Я.Е., Колчунов В.И. Исследование закономерностей деформирования и разрушения зон контакта железобетонных составных конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2010. № 2(28). С. 17–22.
26. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова. М. : АСВ, 2014. 208 с.
27. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования». ЭС НТИ "Техэксперт", 2017. 35 с.
28. Korenkov P. Determination of the scale factor in the physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads / P. Korenkov, V. Chemodurov, O. Korenkova, I. Manaenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 23–26 сентября 2020 года. – 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 2020. P. 052053. doi:10.1088/1757-899X/869/5/052053. EDN WSCSUU.
29. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1425. № 1.
30. Патент № 2642542 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/60. Устройство для экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах : № 2016130263 : заявл. 22.07.2016 : опубл. 25.01.2018 / Н.В. Ключева, П.А. Кореньков ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского". EDN QHFNGF.
31. Колчунов В.И., Колчунов Вл.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 54–60. EDN UWQAEF.

## REFERENCES

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct.* 2018. 173. Pp. 122–149.
2. Monitoring of housing construction volumes. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/zhilishnaya-politika/8/>
3. Mazhanskaya E.V. Ekonomicheskie faktory, vliyayushchie na stoimost' stroitel'stva [Economic factors that affect the cost of construction] / E.V. Mazhanskaya, A.S. Pasechnik, D.A. Kalinina [et al.] // *Economic Sciences*. 2020. No. 184. Pp. 58–61. doi:10.14451/1.184.58 (rus)
4. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V., Shapiro G.I., Gasanov A.A. Raschety krupnopanel'nykh zdaniy na ustoychivost' protiv progressiruyushchego obrusheniya metodami predel'nogo ravnovesiya i konechnogo elementa [Calculations of large-panel buildings for stability against progressive collapse by the methods of limiting equilibrium and finite element]. *ACADEMIA. Architecture and construction*. 2016. No. 4. Pp. 109–111. (rus)
5. Krentowski J.R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 121, 105059. ISSN 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105059>.
6. Sokolov B.S. Construction of Deformation Diagrams of Concrete Under Shear Based on the Author's Theory of Anisotropic Materials Power Resistance to Compression and Deformation Theory of Plasticity // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. No. 15. Pp. 149–160.
7. Baran E., Mahamid M., Baran M., Kurtoglu M., Torra-Bilal I. Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction // *Engineering Structures*. 2021. 246, 113005.
8. Barański J., Berkowski P. Computer Modelling of Precast Large-panel Buildings with Degraded Horizontal Joints // *Procedia Engineering*. 2015. 111. Pp. 89–96.
9. Xia K., Hu X. & Xue W. Experimental studies on in-plane connections of composite beam-precast concrete shear wall under reversed cyclic loading // *Structures*. 2021. 34. 1961–1972.
10. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 8. Pp. 155–162.
11. Savin S.Yu., Fedorova N.V., S.G. Emelyanov S.G. Analiz zhivuchesti sborno-monolitnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy iz zhelezobetonnykh panel'no-ramnykh element pri avariynnykh vozdeystviyakh, vyzvannykh poterey ustoychivosti odnoy iz kolonn [Survivability Analysis of Reinforced Concrete Frameworks of Multi-storey Buildings Made of Frame-panel Elements Using Combination of Prefabricated and Monolithic Concrete in Case of Accidental Impacts Caused by Loss of Stability of One of the Columns]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2018. No. 12. Pp. 3–7. (rus)
12. Savin S.Y., Fedorov S.S. Stability analysis of reinforced concrete building frames damaged by corrosion under static-dynamic loading // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1425, 012043.

13. Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Almusallam T.H., Abbas H. Finite element analysis for progressive collapse potential of precast concrete beam-to-column connections strengthened with steel plates // *Journal of Building Engineering*. 2021. 34, 101875.
14. Fedorova N., Tamrazyan A., Korenkov P. Industrial constructive system of civil buildings of increased survivability // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 04003
15. Kolchunov V.I., Osovskikh E.V., Fomichev S.I. Prochnost' zhelezobetonnykh platformennykh stykov zhilykh zdaniy s perekrestno-stenovoy sistemoy iz panel'nykh elementov [Strength of reinforced concrete platform joints of residential buildings with a cross-wall system of panel elements]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2009. No. 12. Pp. 12-16/ (rus)
16. Troshkov E.O., Sokolov B.S. Sravneniye rezul'tatov komp'yuternogo modelirovaniya i eksperimental'nykh issledovaniy shtepsel'nykh stykov sbornykh zhelezobetonnykh kolonn s plitami perekrytiy [Comparison of the results of computer modeling and experimental research of plug joints of precast concrete columns with floor slabs]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017. No 7. Pp. 41-46. (rus)
17. Troshkov E.O. Eksperimental'nyye issledovaniya shtepsel'nykh stykov vtorogo tipa na sdvig [Experimental studies of plug joints of the second type for shear]. *Dolgovechnost', prochnost' i mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitel'nykh materialov: Sbornik dokladov IX Akademicheskikh chteniy RAASN – Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Durability, strength and fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other building materials: Collection of reports of the IX Academic Readings of the RAACS - International Scientific Conference]. Saint Petersburg :SPbGASU, 2016. Pp. 85–90. (rus)
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, Aref A. Abadel, Mohammed Alrubaidi. Precast RC structures' progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements, *Structures*, 2022. Vol. 37. Pp. 338-352. ISSN 2352-0124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.086>.
19. Johannes A.J. Huber, Hercend Mpidi Bitu, Thomas Tannert, Sven Berg. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240, 112362. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112362>.
20. Yu J., Tan K.H. Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario // *J. Struct. Eng*. 2013. Vol. 139. No. 2. Pp. 233–250.
21. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites // *Eng. Struct.* 2015.
22. Forquin P., Chen W. An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 152. P. 1068–1084.
23. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam-Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention // *J. Struct. Eng*. 2019. Vol. 145. No. 5. P. 04019020.
24. Kolchunov V.I., Panchenko L.A. Raschet sostavnykh tonkostennykh konstrukcij [Calculation of composite thin-walled structures]. M.: ASV, 1999. 281 p. (rus)
25. Kolchin YA.E., Kolchunov V.I. Issledovanie zakonornostej deformirovaniya i razrusheniya zon kontakta zhelezobetonnykh sostavnykh konstrukcij // *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2010. No. 2(28). Pp. 17-22. (rus)
26. Kolchunov V.I. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnykh vozdeystviyah [Survivability of buildings and structures under beyond-design impacts] / V.I. Kolchunov, N.V. Klyueva, N.B. Androsova, A.S. Buhtiyarova. M. : ASV, 2014. 208 p. (rus)
27. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. [Protection of buildings and structures from progressive collapse] ES NTI "Tekhekspert", 2017. 35 p. (rus)
28. Korenkov P. Determination of the scale factor in the physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads / P. Korenkov, V. Chemodurov, O. Korenkova, I. Manaenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 23–26 сентября 2020 года. – 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 2020. P. 052053. doi:10.1088/1757-899X/869/5/052053. EDN WSCSUY.
29. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1425. No. 1.
30. Patent № 2642542 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 3/60. Ustrojstvo dlya eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v ramno-sterzhnevyykh konstruktivnykh sistemah : No. 2016130263 : zayavl. 22.07.2016 :opubl. 25.01.2018 / N.V. Klyueva, P.A. Koren'kov ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Krymskij federal'nyj universitet imeni V.I. Vernadskogo". EDN QHFNGF
31. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyah // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Deformation models of reinforced concrete under special effects]. 2018. No. 8. Pp. 54-60. EDN UWOAEP (rus)

**Информация об авторах:**

**Кореньков Павел Анатольевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
кандидат технических наук, доцент, и.о. зав. кафедрой технологии, организации и управления в строительстве.  
E-mail: [KorenkovPA@mgsu.ru](mailto:KorenkovPA@mgsu.ru)

**Федорова Наталия Витальевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой архитектурно-строительного проектирования.  
E-mail: [FedorovaNV@mgsu.ru](mailto:FedorovaNV@mgsu.ru)

**Кайдас Павел Анатольевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.  
E-mail: [KaydasPA@mgsu.ru](mailto:KaydasPA@mgsu.ru)

**Information about authors:**

**Korenkov Pavel An.**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
candidate of technical science, docent, acting head of the department of Technology, Organization and Management in Construction.  
E-mail: [KorenkovPA@mgsu.ru](mailto:KorenkovPA@mgsu.ru)

**Fedorova Natalya V.**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
Advisor of RAACS, doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design in Construction.  
E-mail: [FedorovaNV@mgsu.ru](mailto:FedorovaNV@mgsu.ru)

**Kaydas Pavel An.**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures  
E-mail: [KaydasPA@mgsu.ru](mailto:KaydasPA@mgsu.ru)