

В.С. МОСКОВЦЕВА^{1,2}

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

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ СО СЛОЖНОНАПРЯЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Аннотация. На энергетической основе, с использованием диаграммного метода разработан алгоритм численно-аналитического решения задачи по определению параметра живучести железобетонного рамного каркаса многоэтажного здания со сложнонапряженными элементами при статико-динамическом деформировании, вызванном особым воздействием. Определение значения параметрической нагрузки, при которой в наиболее напряженном пространственном сечении при рассматриваемом режиме нагружения наступает один из критериев особого предельного состояния получено из системы канонических уравнений неординарного варианта смешанного метода. В соответствии с этим вариантом смешанного метода, решение задачи построено таким образом, когда первоначальная исходная система подконструкции рамы описывается шарнирно-стержневой моделью, в которой места возможного выключения связей заменяют сложными шарнирами и соответственно неизвестными угловыми и линейными связями. путем выполнения численных исследований и сравнением с экспериментальными данными дана оценка эффективности и достоверности разработанной методики. Показано, что при принятых исходных гипотезах предложенная методика расчета живучести рам со сложнонапряженными элементами удовлетворительно описывает процесс их деформирования и разрушения при рассматриваемых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонная рама, сложное напряженное состояние, экспериментально-теоретические исследования, особое воздействие, расчетная модель, параметр живучести.

V.S. MOSKOVITSEVA^{1,2}

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

CALCULATION OF THE SURVIVABILITY PARAMETER OF REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH COMPLEX STRESSED ELEMENTS

Abstract. On the energy basis, using the diagrammatic method, the solution of the problem of determining the survivability parameter of the reinforced concrete frame structure of a multistory building with complex-stressed elements under static-dynamic deformation caused by a special impact is obtained. Determination of the parametric load value, at which in the most stressed spatial section at the considered loading mode one of the criteria of the special limit state comes from the system of canonical equations of the extraordinary version of the mixed method. Comparison of the experimental and design survivability parameters gives an assessment of the efficiency and reliability of the proposed design dependencies. It has been shown that with the adopted initial hypotheses, the proposed method for calculating the survivability of frames with complex stressed elements satisfactorily describes the process of their deformation and destruction under the considered impacts.

Keywords: reinforced concrete frame, complex stress state, experimental and theoretical studies, special impact, calculation model, survivability parameter.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28-31
2. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 74-84.
3. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithreinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047.
4. Демьянов А.И., Алькади С.А. Статико-динамическое деформирование железобетонных элементов пространственной рамы при их сложном сопротивлении // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 11 (719). С. 20-33
5. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
6. Alanani M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method // Case Studies in Construction Materials. Elsevier Ltd., 2020. Vol. 13. P. e00457.
7. Fialko S.Y., Kabantsev O. V, Perelmuter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102. No. 10214. doi: 10.34910/MCE.102.14
8. Федорова Н.В., Халина Т.А. (Ильющенко Т.А.) Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 5. С. 32-36.
9. Леонтьев Е.В. Поперечные колебания балки со свободными краями на упругом основании при действии динамической нагрузки // Строительство и реконструкция. 2020. № 3 (89). С. 31-44.
10. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18. No. 4. Pp. 111–123.
11. Тамразян А.Г., Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 22-28
12. Травуш В.И., Федорова Н.В. Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1. С. 21–28.
13. Marchis A. G., Botez M. D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories // Procedia Manufacturing. 2019. T. 32. P. 136-143.
14. Yu J., Gan Y. P., Liu J. Numerical study of dynamic responses of reinforced concrete infilled frames subjected to progressive collapse // Advances in Structural Engineering. 2020. С. 1369433220965273.
15. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1090 (2021) P. 012135
16. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No.3. Pp. 145–162.
17. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2018. Т. 4. № 78. С. 42–52.
18. 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. Pp. 032037.
19. Федорова Н.В., Гуок Ф.Д., Чанг Н.Т. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. №1 (87). С. 92–100.
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column //Advances in Civil Engineering. 2020. T. 2020.
21. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 643 (2021) P. 012163
22. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407

23. Федорова Н.В., Ву Нгок Туен, Яковенко И.А. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии // Вестник МГСУ 2020. Т. 15. № 11. С.1513–1522.
24. Adam J.M., Parisi F., Sagasetta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Т. 173. Pp. 122-149.
25. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. Pp. 012033.
26. Федорова Н.В., Московцева В.С., Амелина М.А., Демьянов А.И. Определение динамических усилий в сложнапряженных элементах железобетонных рам при особом воздействии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 2 (770). С. 5-15.
27. Колчунов В.И., Московцева В.С. Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными элементами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. №18(3). С. 195-203.
28. Федорова Н.В., Московцева В.С., Савин С.Ю. Деформирование и разрушение железобетонных рам со сложнапряженными элементами в запредельных состояниях // Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. Том 2. С. 458-468
29. Милейковский И.Е., Колчунов В.И. Неординарный смешанный метод расчета рамных систем с элементами сплошного и составного сечений // Известия ВУЗов. Строительство. 1995. № 7–8. С. 32–37.
30. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с.
31. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings // *British Standards Institution, London, UK*. 2004.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Konceptiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdeystviyah [The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under force and environmental influences]. *Industrial and Civil engineering*. 2013. No.2. Pp. 28-31. (rus)
2. Il'yushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Treshchinostojkost' prednapryazhennyh zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstrukcij pri osobyh vozdeystviyah [Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-core structures under special influences]. *Building and Reconstruction*. 2021. No. 1(93). Pp. 74-84. (rus)
3. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse. *MATEC Web of Conferences* / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047.
4. Dem'yanov A.I., Al'kadi S.A. Statiko-dinamicheskoe deformirovanie zhelezobetonnyh elementov prostranstvennoj ramy pri ih slozhnom soprotivlenii [Static-dynamic deformation of reinforced concrete elements of a spatial frame with their complex resistance]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018. No. 11 (719). Pp. 20-33(rus)
5. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario. *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
6. Alanani M., Ehab M., Salem H. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method. *Case Studies in Construction Materials. Elsevier Ltd.*, 2020. Vol. 13. P. e00457.
7. Fialko S.Y., Kabantsev O. V, Perelmuter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102. No. 10214. doi: 10.34910/MCE.102.14
8. Fedorova N.V., Halina T.A. (Il'yushchenko T.A.) Issledovanie dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnyh konstruktivnyh sistemah pri vnezapnyh strukturnykh perestrojkah [Investigation of dynamic overloads in reinforced concrete structural systems during sudden structural changes]. *Industrial and Civil engineering*. 2017. No.5. Pp. 32-36. (rus).
9. Leont'ev E.V. Poperechnye kolebaniya balki so svobodnymi krayamina uprugom osnovanii pri dejstvii dinamicheskoy nagruzki [Transverse vibrations of a beam with free edges on an elastic base under the action of a dynamic load]. *Building and Reconstruction*. 2020. No. 3 (89). Pp. 31-44. (rus).
10. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dynamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. ASV Publishing House*, 2022. Vol. 18. No. 4. Pp. 111–123.
11. Tamrazyan A.G., ZHivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstrukcij pri povrezhdenii [Survivability as a degree of operability of structures in case of damage]. *Industrial and Civil engineering*. 2023. No. 7. Pp. 22-28. (rus)

12. Travush V.I., Fedorova N.V. Raschet parametra zhivuchesti ramno-sterzhnevyyh konstruktivnykh sistem [Calculation of the survivability parameter of frame-rod structural systems] *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2017. No.1. Pp. 21–28. (rus).
13. Marchis A.G., Botez M.D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. Pp. 136-143.
14. Yu J., Gan Y.P., Liu J. Numerical study of dynamic responses of reinforced concrete infilled frames subjected to progressive collapse. *Advances in Structural Engineering*. 2020. P. 1369433220965273.
15. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1090 (2021) P. 012135
16. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*. 2017. Vol. 69. No.3. Pp. 145–162.
17. Fedorova N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy deformirovaniya monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy pri avariynyykh vozdeystviyakh [Methods of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts]. *Building and Reconstruction*. 2018. Vol. 4. No.78. Pp. 42–52. (rus).
18. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Koren'kov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Pp. 032037.
19. Fedorova N.V., Guok F.D., CHang N.T. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnykh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement]. *Building and Reconstruction*. 2020. No.1 (87). Pp. 92–100. (rus).
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020.
21. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 643 (2021) P. 012163
22. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407
23. Fedorova N.V., Vu Ngok Tuen, YAkovenko I.A. Kriterij prochnosti ploskonapryazhennogo zhelezobetonogo elementa pri osobom vozdeystvii [Strength criterion of a flat-stressed reinforced concrete element under special impact]. *Vestnik MGSU*. 2020. Vol. 15. No.11 Pp. 1513–1522. (rus).
24. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 122-149.
25. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. Pp.012033.
26. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Amelina M.A., Demyanov A.I. Opredelenie dinamicheskikh usilij v slozhnonapryazhennykh elementakh zhelezobetonnykh ram pri osobom vozdeystvii [Determination of dynamic forces in complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2023. No. 2. Pp. 5-15. (rus).
27. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. ZHivuchest' zhelezobetonnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy so slozhnonapryazhennymi elementami [Survivability of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with complex stress elements]. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2022. No. 18(3). Pp.195-203. (rus).
28. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Savin S.Yu. Deformirovanie i razrushenie zhelezobetonnykh ram so slozhnonapryazhennymi elementami v zapredel'nykh sostoyaniyakh [Deformation and destruction of reinforced concrete frames with complexly stressed elements in transcendent states]. *Collection of scientific papers of the RAASN. Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2022. Vol. 2. Pp. 458-468. (rus).
29. Milejkovskij I.E., Kolchunov V.I. Neordinarnyj smeshannyj metod rascheta ramnykh sistem s elementami sploshnogo i sostavnogo sechenij [An extraordinary mixed method for calculating frame systems with elements of continuous and composite sections]. *News of higher educational institutions. Construction*. 1995. No. 7–8. Pp. 32–37. (rus).
30. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyykh vozdeystviyakh. [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow: ACB, 2014. 208 p. (rus).
31. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings //British Standards Institution, London, UK. 2004.

Информация об авторе:

Московцева Виолетта Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; преподаватель кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,

инженер.

E-mail: lyavetka1@mail.ru

Information about author:

Moskovtseva Violetta S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

post-graduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; lecturer of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia,

engineer.

E-mail: lyavetka1@mail.ru