

В.С. МОСКОВЦЕВА<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,<sup>2</sup>ФГБУ «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<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia<sup>2</sup>Scientific 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.

## Введение

Исследования по проблеме живучести сооружений и разработки методов их защиты от прогрессирующего обрушения становятся все более актуальными в связи с постоянным увеличением вызовов природного и техногенного характера. Здесь под живучестью понимается способность системы распределять нагрузку между остальными элементами в случае повреждения или ослабления одного из элементов [1]. В отдельных странах, включая Россию, стран решение этой проблемы вышло на уровень разработки нормативных документов нового поколения. В то же время ряд направлений в исследованиях и решениях задач этой проблемы остается недостаточно изученным. Это касается как фундаментальных проблем теории живучести физически и конструктивно нелинейных систем, так и решения ряда задач прикладного характера. Так, в известных публикациях, например в российских [2-4] и зарубежных [5-7] приведены результаты в основном численных или численно-аналитических исследований конструктивных систем при их структурных перестройках. Незначительное число публикаций последних лет посвящено созданию аналитических и полуаналитических моделей деформирования таких систем в запредельных состояниях [8-11]. Анализируя теоретические [12-16] и экспериментальные [17-22] исследования отечественных и зарубежных ученых можно заметить, что в предлагаемых решениях для железобетонных рамно-стрешневых и рамных конструкций рассмотрены в основном простейшие напряженные состояния в конструктивных элементах: растяжение – сжатие, изгиб [23,24], внецентренное сжатие [5,25] и другие. В то же время в несущих элементах железобетонных рамных каркасов многоэтажных зданий при отдельных схемах нагружения, например, при неравномерных нагрузках на перекрытия, разных размерах смежных пролетов, в обвязочных ригелях наружного контура здания и других случаях, может возникать сложное напряженное состояние – например, кручение с изгибом. Касаясь вопросов обеспечения механической безопасности зданий и сооружений, можно сказать, что совместное действие изгибающего и крутящего моментов относится к достаточно распространенному виду сочетания силовых воздействий, а решение задач по защите каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными железобетонными элементами в запредельных состояниях в известных публикациях отсутствуют.

В связи с этим в работе [26] на энергетической основе был предложен вариант полуаналитического решения задачи по определению приращений динамических усилий в сложнапряженных железобетонных элементах многоэтажных рам в запредельных состояниях, вызванных структурной перестройкой конструкции при особом воздействии. Целью настоящей работы является разработка алгоритма численно-аналитического решения этой задачи и апробация достоверности и эффективности разработанной методики путем выполнения численных исследований и сравнением с экспериментальными данными.

## Метод

Решение сформулированной задачи расчетного анализа параметров деформирования железобетонной рамы в предельном и запредельном состоянии построено применительно к фрагменту железобетонной рамно-стержневой конструктивной системы каркаса многоэтажного здания со сложным напряженным состоянием в ригелях при совместном действии крутящих и изгибающих моментов от сил  $P_i$ , приложенных к ригелям первого этажа с эксцентриситетом (рисунок 1), на которых были проведены экспериментальные исследования [27, 28].

Оценка живучести статически неопределимой рамной железобетонной конструктивной системы со сложнапряженными элементами выполнена с использованием параметра живучести  $\lambda$ . Этот параметр определяется относительным значением параметрической нагрузки, при действии которой значение одного из критериев превысит допустимое в каком-либо из рассматриваемых сложнапряженных сечений элемента системы, при ее статико-динамическом режиме нагружения.

На первом этапе расчета к статически неопределимой рамно-стержневой конструктивной системе приложена проектная нагрузка в виде сил  $\lambda_m P_i$ . Вычисление неизвестных усилий в рассматриваемой подконструкции ( $M_j$ ,  $Z_i$ ) выполнено с использованием неординарного смешанного метода [29, 30].

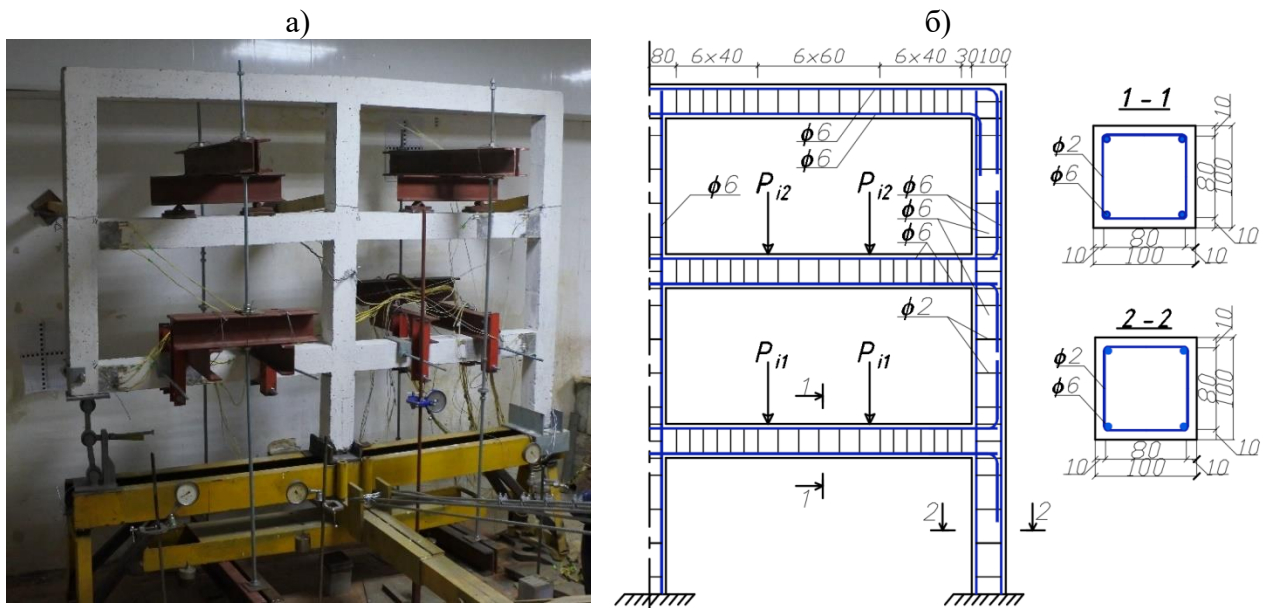


Рисунок 1 – Общий вид испытаний (а) и схема армирования (б) железобетонной рамы

Решение задачи по оценке живучести построено в виде следующего алгоритма.

1. На первом этапе формируется расчетная схема всей конструкции рамной системы для расчета численным методом с использованием программных комплексов и выполняется расчет рамы.

2. На втором этапе расчета из конструкции рамы в зоне возможного локального разрушения выделяется подконструкция ригеля, примыкающего к удаляемой при особом воздействии колонне. Эта подконструкция моделируется шарнирно-стержневым полигоном, в котором места возможного выключения связей заменяют сложными шарнирами и, соответственно, неизвестными угловыми  $M_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ),  $T_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ) и линейными  $Z_i$  ( $i = k+1, k+2, \dots, n$ ) связями (рисунок 2).

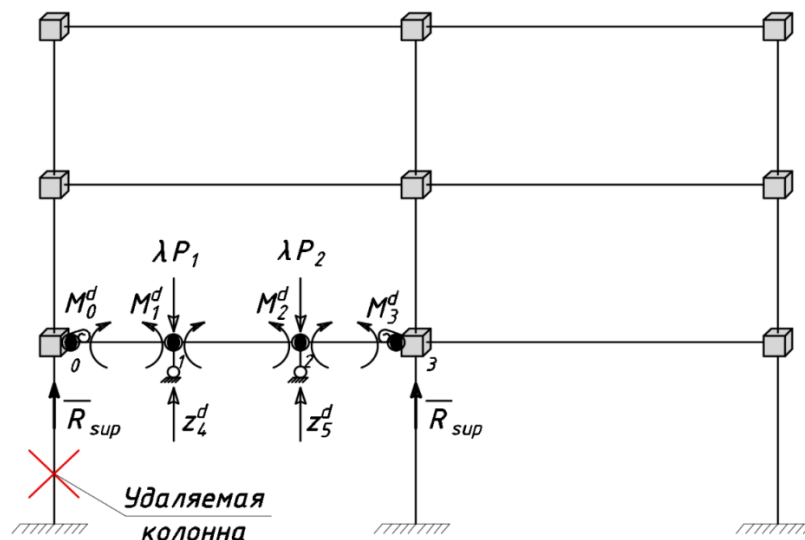


Рисунок 2 – Основная система для расчета подконструкции зоны возможного разрушения плоской рамной системы

3. Формируется исходная система канонических уравнений в матричной форме (1):

$$\begin{cases} A \cdot M + B \cdot Z + \Delta_q + \delta_p \cdot \lambda = 0 \\ C \cdot M + 0 + R_q + r_p \cdot \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

4. Выполняется решение системы (1) с использованием Mathcad:

$$\begin{Bmatrix} \vec{M} \\ \vec{Z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{M}_q \\ \vec{Z}_q \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \vec{m}_p \\ \vec{z}_p \end{Bmatrix} \cdot \lambda, \quad (2)$$

где

$$\begin{Bmatrix} \vec{M}_q \\ \vec{Z}_q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{Bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \vec{\Delta}_q \\ \vec{R}_q \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} \vec{m}_p \\ \vec{z}_p \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{Bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ \vec{r}_p \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

5. Вычисляются моменты в выключающихся связях (пространственных шарнирах) рассматриваемой подконструкции рамы от суммарного действия заданной и рассматриваемой параметрической нагрузок (4):

$$M_j = M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda, \quad (j=1, 2, \dots, k), \quad (4)$$

где  $M_{jq}$  и  $m_{jp}$  - элементы матрицы столбцов  $\vec{M}_q$  и  $\vec{m}_p$

6. Определяется минимальное значение параметрической нагрузки - параметра живучести  $\lambda_m, (m=1, 2, 3)$  при которой после выключения из работы элемента достигается особое предельное состояние в наиболее нагруженном сечении ригеля  $C_j$ :

$$\lambda_m = \min \left( \frac{M_{j,ult}^d \pm |M_{jq}^d|}{m_{jp}^d} \right), \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

7. При выключении из работы  $j$ -ой связи степень статической неопределимости рамы уменьшается на единицу. Из системы уравнений при этом исключается  $j$ -ое неизвестное. Исходная матрица уравнений смешанного метода преобразуются следующим образом: 1) в матрице  $A$  исключается  $j$ -ая строка и  $j$ -ый столбец; 2) в матрице  $B$  исключается  $j$ -ая строка; 3) в матрицах-столбцах значения грузовых коэффициентов  $\vec{\Delta}_q$  и  $\vec{R}_q$  уточняются с использованием формул (6):

$$\begin{cases} \Delta_{iq}^{(l)} = \Delta_{iq} + \delta_{ip} \cdot \lambda_m + \delta_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d) \\ R_{iq}^{(l)} = R_{iq} + r_{ip} \cdot \lambda_m + r_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d) \end{cases} \quad (6)$$

8. Далее система уравнений снова преобразуется аналогичным образом, но исходной уже будет являться система, полученная после предыдущего шага решения задачи. При этом на втором и последующих шагах получим приращение параметрической нагрузки, значение которой на  $i$ -ом шаге будет определяться по формуле:

$$\lambda_{mi} = \lambda_{m,i-1} + \Delta_{m,i-1} \quad (7)$$

Таким образом критерием живучести, исследуемой конструктивной рамной системы, в зоне возможного локального разрушения является последовательное изменение параметра  $\lambda_m, (m=1, 2, 3)$  при переходе от статически неопределимой рамной системы со сложнапряженными элементами в систему, изменяемую по мере последовательного образования пространственных пластических шарниров.

### Результаты

Численное определение параметра живучести рассмотрим на примере простейшей подконструкции плоской рамы – ригеля, примыкающего к удаляемой колонне первого этажа при следующих исходных данных: пролет  $l=0,9$ м, сечение ригеля  $0,1 \times 0,1$ м, момент инерции  $I=8,33 \cdot 10^{-6}$  м<sup>4</sup>, бетон класса В15  $E_b=2,3 \cdot 10^7$  кН/м<sup>2</sup>,  $M_{np}=1,8$ кНм.

В результате расчета (рисунок 3) было вычислено минимальное значение параметрической нагрузки - параметра живучести, при которой вначале образовался пространственный шарнир в сечениях  $C_0$  и  $C_1$  ( $\lambda_1 = 1,44$ ), а затем значение параметрической нагрузки  $\lambda_2 = 1,84$  при которой образуются пространственные шарниры в сечениях  $C_2$  и  $C_3$  и подконструкция ригеля превращается в геометрически изменяемую систему.

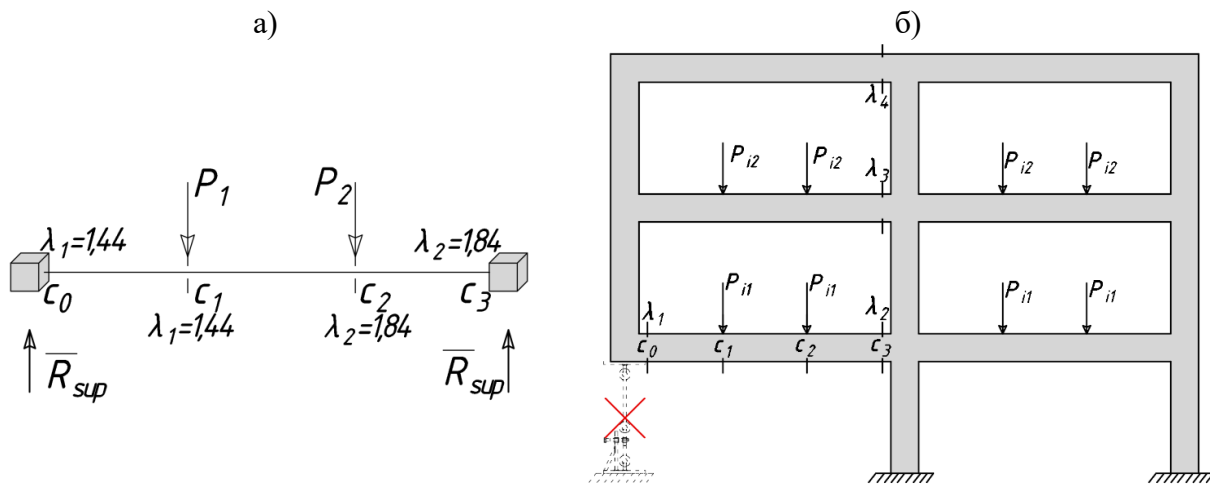


Рисунок 3 – Расчетное значение параметра живучести для подконструкции рамы (а) и последовательность выключения сечений ригеля при увеличении параметрической нагрузки (б)

По результатам расчета параметра живучести рамы со сложнапряженными ригелями была выполнена оценка ширины раскрытия пространственных трещин на разных этапах нагружения конструкций после особого воздействия в виде внезапного удаления крайней колонны (рисунок 4). Установлено, что на всех этапах нагружения теоретические значения ширины раскрытия трещин, определенные по действующим нормам [31] более чем на 40% меньше опытных значений. Из этого следует вывод о том, что при рассматриваемом сложном напряженном состоянии и рассматриваемом режиме двухэтапного нагружения расчетные зависимости для расчета ширины раскрытия трещин требуют уточнения.

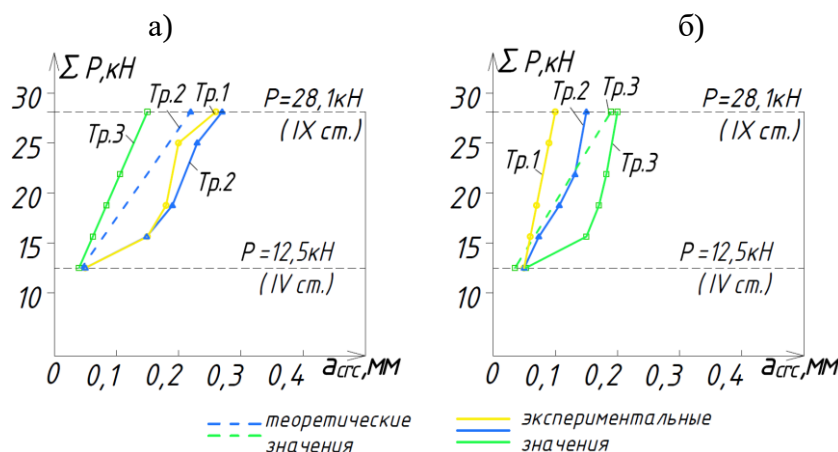


Рисунок 4 – Ширина раскрытия трещин в сложнапряженных ригелях рам первой РЖ-1 серии (а) и второй РЖ-2 серии (б)

Анализ полученных опытных и расчетных данных показывает так же, что в обоих опытных конструкциях рам при принятом армировании, испытанных на втором этапе на особое воздействие – в виде удаления одной из колонн рамы ширина раскрытия трещин и, соответственно предельные деформации арматуры превышают критерии, установленные СП385.1325800.2018. Значение предельного прогиба ( $1/84$  и  $1/35$ ) не превысило

нормируемую величину (1/30), установленную для особого воздействия. Из этого следует вывод о том, что выполнение деформационных критериев особого предельного состояния для опытных конструкций рам при рассматриваемых воздействиях может быть обеспечено увеличением интенсивности поперечного армирования ригелей замкнутыми хомутами.

Картины развития пространственной трещины (тр. 2) во времени в раме РЖ-1 после особого воздействия – удаления средней стойки, полученные с помощью цифровой фотокамеры с частотой измерений 600 кадров в секунду, приведены на рисунке 5. Анализ развития рассматриваемой трещины во времени при динамическом догрузении рамы (рисунок 6) показал, что в пространственном сечении после приложения динамического (ударного) воздействия происходило резкое увеличение ширины раскрытия трещины до уровня  $a_{crc}=5,9$  мм. После чего процесс раскрытия стабилизировался и происходило перераспределение динамического потока усилий от догружения особым воздействием на вышерасположенные конструктивные элементы рамы.

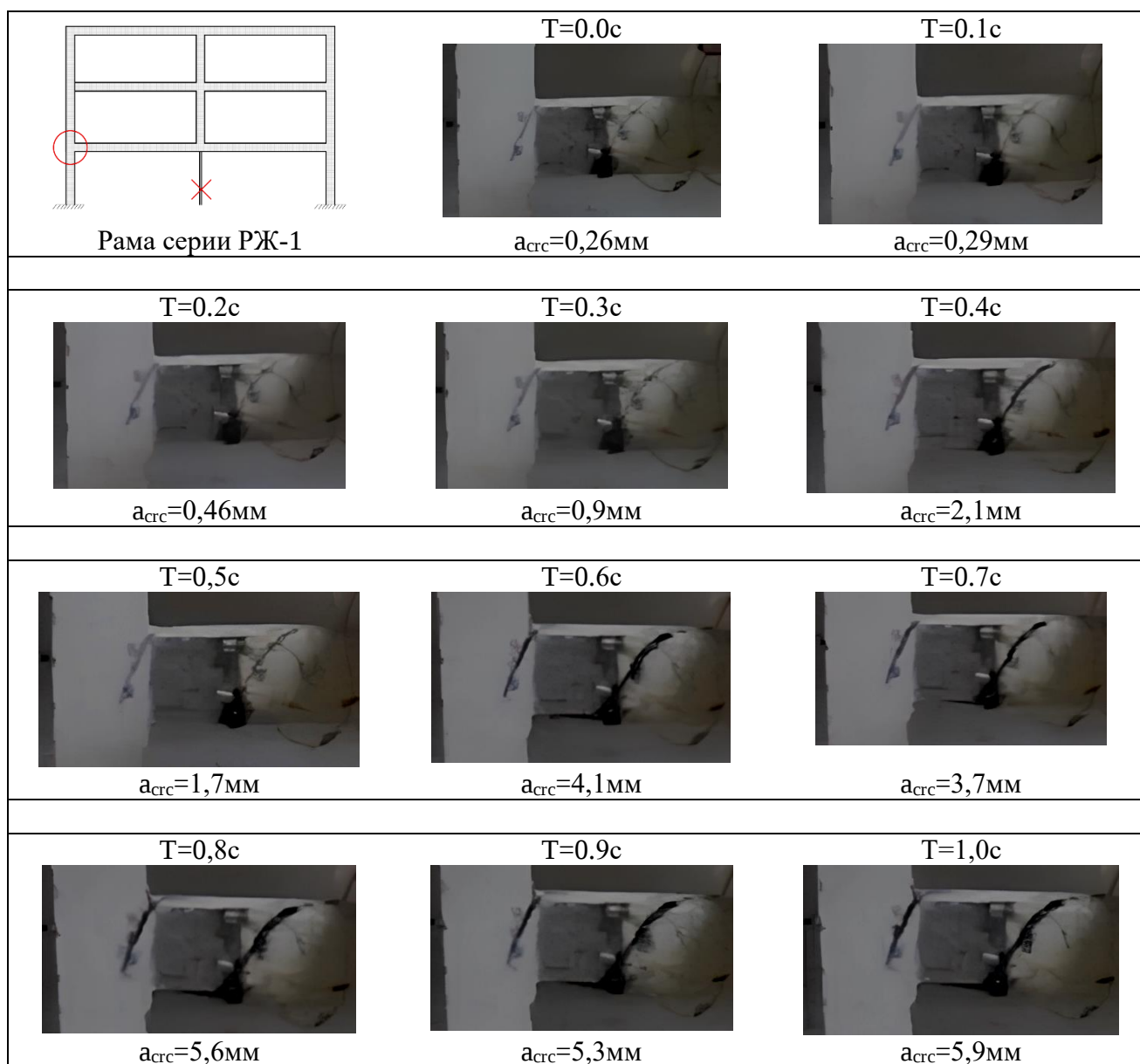


Рисунок 5 – Картины раскрытия пространственной трещины 2 во времени при динамическом догружении в ригеле 1 этажа рамы серии РЖ-1

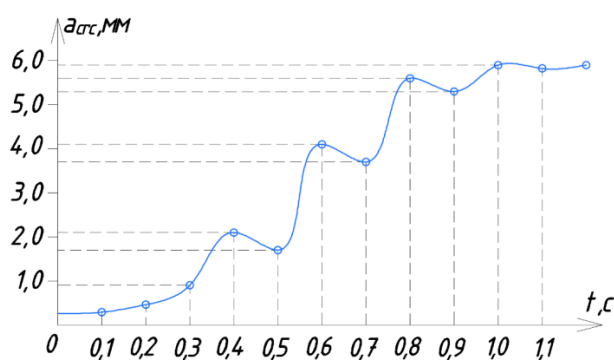


Рисунок 6 – Ширина раскрытия пространственной трещины во времени в раме РЖ-1 при удалении центральной стойки

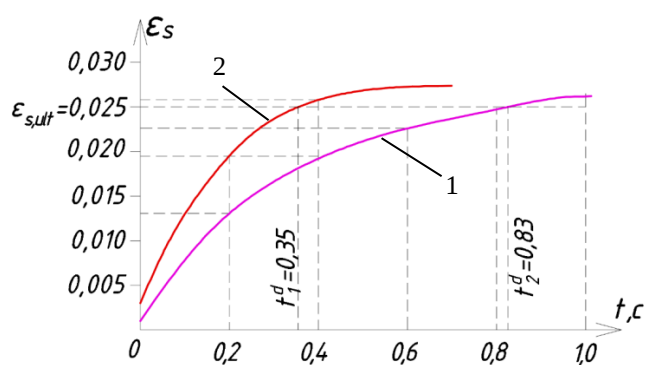


Рисунок 7 – Деформации продольной (1) и поперечной (2) арматуры в раме РЖ-1 при удалении центральной стойки

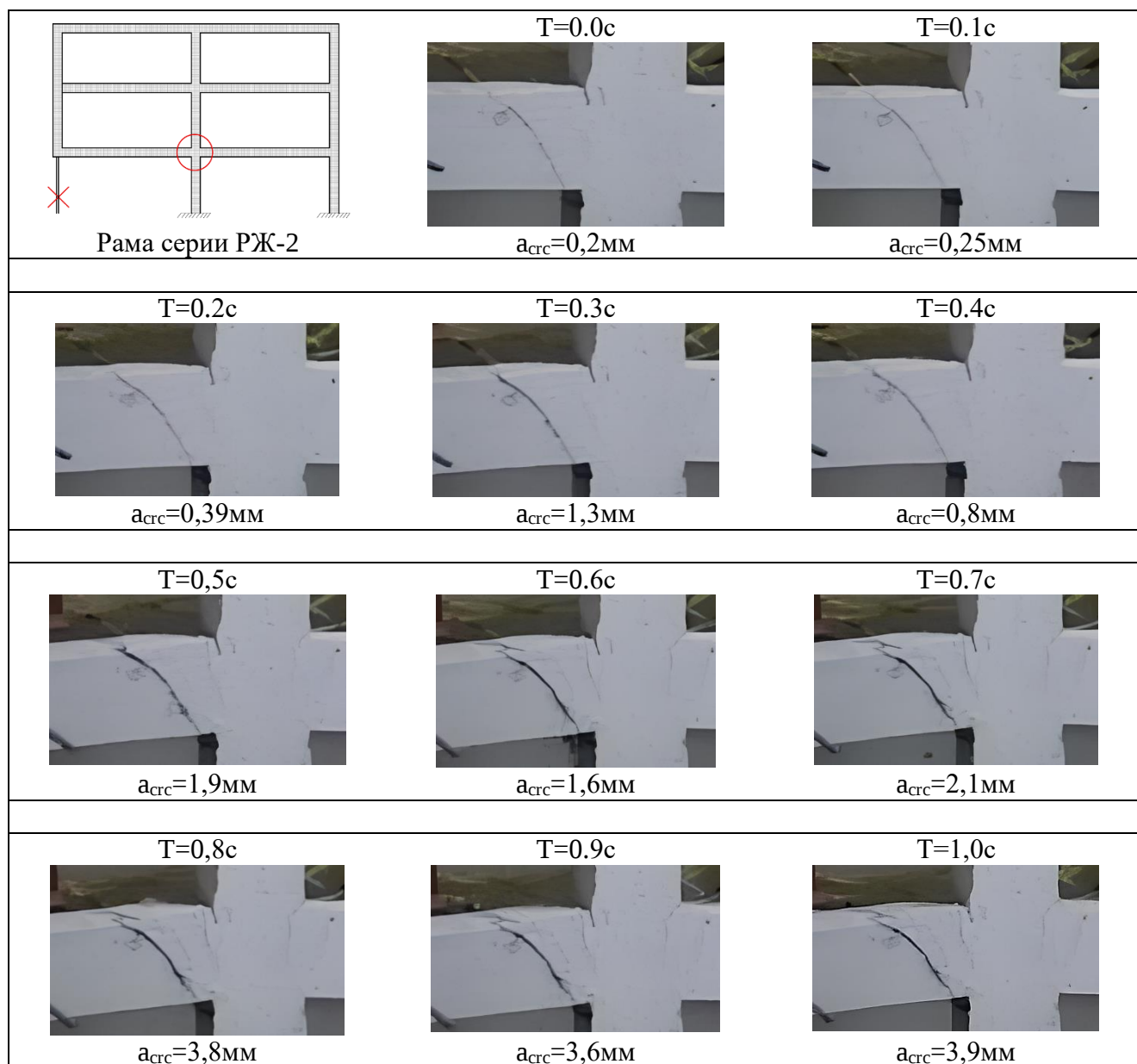


Рисунок 8 – Ширина раскрытия пространственной трещины во времени в раме РЖ-2 при удалении крайней левой стойки

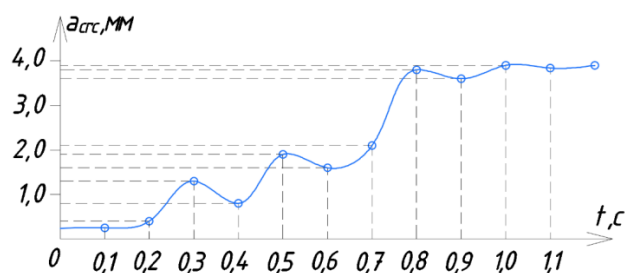


Рисунок 9 – Ширина раскрытия пространственной трещины во времени в раме РЖ-2 при удалении крайней левой стойки

Анализируя время динамического догружения ( $t^d$ ) в пространственных сечениях опытных конструкций (см. рисунок 5, 6, 8, 9) можно отметить следующее. В пространственном сечении рамы РЖ-1 над первым этажом от момента начала динамического догружения до момента наступления текучести в поперечной арматуре (рисунок 7) это время составило  $t^d_1=0,35с$ , а до момента наступления текучести в поперечной и продольной арматуре в рассматриваемом сечении составило  $t^d_2=0,83с$ . Аналогичные результаты получены и для ригелей второй опытной рамы (РЖ-2), для которой соответственно  $t^d_1=0,51$  и  $t^d_2=0,95$ .

### Выводы

1. Предложен алгоритм определения параметра живучести физически и конструктивно нелинейных железобетонных рамных конструктивных систем каркасов многоэтажных зданий с элементами, испытывающими сложное сопротивление – изгиб с кручением при статико-динамическом режиме их нагружения особым воздействием. Алгоритм базируется на энергетической основе и использовании неординарного смешанного метода строительной механики стержневых систем.

2. Экспериментальными исследованиями двух опытных конструкций рам на особое воздействие в виде внезапного удаления одной из колонн, получены параметры трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, деформации и схемы разрушения опытных конструкций опытных рам. Экспериментальными исследованиями установлено, что вид напряженного состояния, картина образования, раскрытие и развитие трещин во времени при высокоскоростном нагружении существенно влияют на перераспределение силовых потоков и, соответственно, на параметры деформирования элементов конструктивной системы.

### 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 monolithcreinforced 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. C. 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., Бу 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., Бу 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., Sagaseta J., Lu X. Research on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. T. 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 сложноподвешенных 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 сложноподвешенными 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 сложноподвешенными элементами в предельных 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 проектных 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 monolithicreinforced 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, Perelmutter 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 deystvii 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. 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. 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 konstruktivnyh 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., 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. Fedorova N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T. Metodika eksperimental'nyh issledovanij deformirovaniya monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zdaniy pri avarijnyh vozdeystviyah [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 zhelezobetonnyh 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 vozdejstvii [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 zhelezobetonnyh ram pri osobom vozdejstvii [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' zhelezobetonnyh karkasov mnogoetazhnyh 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 zhelezobetonnyh 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 ramnyh 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 zaproektnykh vozdejstviyakh. [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](mailto: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](mailto:lyavetka1@mail.ru)