

---

# **СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**

---

## **BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS**

Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 5–15.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (2): 5–15.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.07

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В СЛОЖНОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ ОСОБОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Наталья Витальевна Федорова<sup>1</sup>, Виолетта Сергеевна Московцева<sup>2,3</sup>,**

**Маргарита Андреевна Амелина<sup>2</sup>, Алексей Иванович Демьянов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии  
архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

**Аннотация.** На энергетической основе без привлечения аппарата динамики сооружений получено аналитическое решение задачи по определению динамических дрогажий в сложнопроявленных железобетонных элементах многоэтажных рам в запредельном состоянии, вызванном особыми аварийными воздействиями. Напряженное состояние, картины трещин и схемы разрушения в ригелях рассматриваемых конструкций рам определяются сложным напряженным состоянием элементов рам, вызванным совместным действием крутящих и изгибающих моментов. Оценка несущей способности таких конструкций выполнена диаграммным методом на основе использования энергетических соотношений в элементах конструкции до и после особого воздействия, позволяющих определять максимальные динамические деформации, кривизны и усилия на первой полуволне колебаний с использованием результатов нелинейных статических расчетов по первичной и вторичной расчетным схемам.

**Ключевые слова:** железобетон, запредельное состояние, сложное сопротивление, особое воздействие, динамические дрогажия, живучесть

**Для цитирования:** Федорова Н.В., Московцева В.С., Амелина М.А., Демьянов А.И. Определение динамических усилий в сложнопроявленных элементах железобетонных рам при особом воздействии // Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 5–15. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15.

Original article

## DETERMINATION OF DYNAMIC FORCES IN COMPLEXLY STRESSED ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES UNDER SPECIAL IMPACT

**Nataliya V. Fedorova<sup>1</sup>, Violetta S. Moskovtseva<sup>2, 3</sup>, Margarita A. Amelina<sup>2</sup>,  
Aleksey I. Demyanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

<sup>2</sup>South-West State University, Kursk, Russia

<sup>3</sup>Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy  
of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** On an energy basis, without involving the apparatus of dynamics of structures, an analytical solution of the problem was obtained to determine the dynamic additional loads in complexly stressed reinforced concrete elements of multi-storey frames in a transcendental state caused by special emergency effects. The stress state, crack patterns and fracture patterns in the crossbars of the considered frame structures are determined by the complex stress state of the frame elements caused by the combined action of torsional and bending moments. The assessment of the bearing capacity of such structures was carried out by the diagram method based on the use of energy ratios in the structural elements before and after a special impact, which makes it possible to determine the maximum dynamic deformations, curvatures and forces in the first half-wave of vibrations using the results of nonlinear static calculations according to the primary and secondary design schemes.

**Keywords:** reinforced concrete, transcendent state, complex resistance, special impact, dynamic loading, survivability

**For citation:** Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Amelina M.A., Demyanov A.I. Determination of dynamic forces in complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; (2): 5–15. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15.

**Введение.** В последние два десятилетия проблема живучести зданий и сооружений и их защиты от прогрессирующего обрушения находит все более широкое обсуждение в научных публикациях российских и зарубежных авторов. Тем не менее многие решаемые задачи, связанные с этой проблемой, носят еще постановочный характер [1–4]. В частности, задачи, связанные с изучением особенностей деформирования и разрушения конструктивных систем железобетонных каркасов многоэтажных зданий, как показано в работе [5], решены только при простейших видах напряженного состояния в элементах таких систем [6–8].

Вопросы экспериментального определения параметров живучести конструктивных систем зданий и сооружений в запредельных состояниях при таких видах напряженного состояния рассматривались в исследованиях [9–12], а разработка способов защиты конструкций от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях обсуждалась в публикациях [13–16]. В развитие этих исследований, в работах [17, 18] были приведены результаты экспериментальных исследований живучести железобетонных рам, ригели которых испытывают сложное напряженное состояние.

В рассматриваемой работе на энергетической основе приведено аналитическое решение задачи по определению приращений динамических усилий

в сложнопроявленных железобетонных элементах многоэтажных рам в за- предельных состояниях, вызванных особыми воздействиями, и предложена теоретическая модель определения статико-динамических параметров нелинейного деформирования конструкций железобетонных рам, нагруженных статической нагрузкой и додлжением, вызванным внезапной структурной перестройкой конструктивной системы.

**Методика исследований.** Рассмотрим конструкцию железобетонной рамы, нагруженную заданной эксплуатационной нагрузкой  $P_i$ , приложенной с эксцентрикитетом к продольной оси ригелей рамы (рис. 1). Ригели рамы испытывают сложное сопротивление – изгиб с кручением, и в сечениях ригелей действуют изгибающие  $M$  и крутящие  $T$  моменты. Для восприятия этих внутренних усилий конструкции ригелей армированы стержневой продольной арматурой и поперечной арматурой в виде замкнутых хомутов.

При особом воздействии, вызванном внезапной структурной перестройкой конструктивной системы, удалении из конструкции рамы одного из несущих элементов, например, колонны первого этажа, в оставшихся нагруженных элементах конструкции рамы возникнут динамические додлжения и соответственно приращения внутренних усилий. Диаграммы деформирования «изгибающий момент – кривизна» и «крутящий момент – угол поворота» для таких элементов представим в виде билинейных зависимостей (рис. 2).

Используя диаграммный метод в варианте, предложенном в [19], определим энергетические соотношения для параметров диаграммы при рассматриваемом режиме двухэтапного нагружения конструкции рамы. Будем полагать, что при эксплуатационной нагрузке в исходной  $n$  раз статически неопределенной рамной системе, на первом этапе ее нагружения статической нагрузкой в наиболее напряженном сечении ригеля образуются трещины, т.е.  $(T + M) > (T_{crc} + M_{crc})$ . При статическом приложении особого воздействия на втором этапе нагружения, т.е. при удалении конструктивного элемента рамы и соответственно изменении степени ее статической неопределенности на единицу, в этом же сечении произойдет приращение

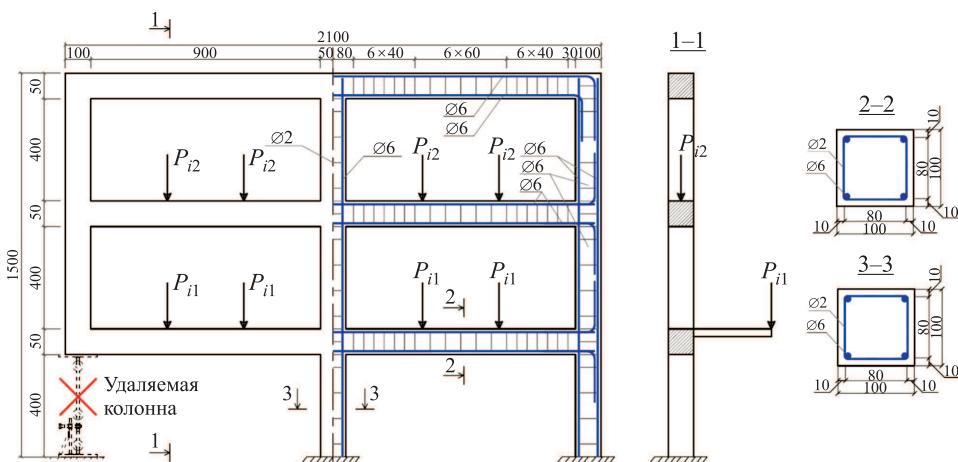


Рис. 1. Конструкция железобетонной рамы и схема приложения нагрузок

Fig. 1. Reinforced concrete frame design and load application scheme

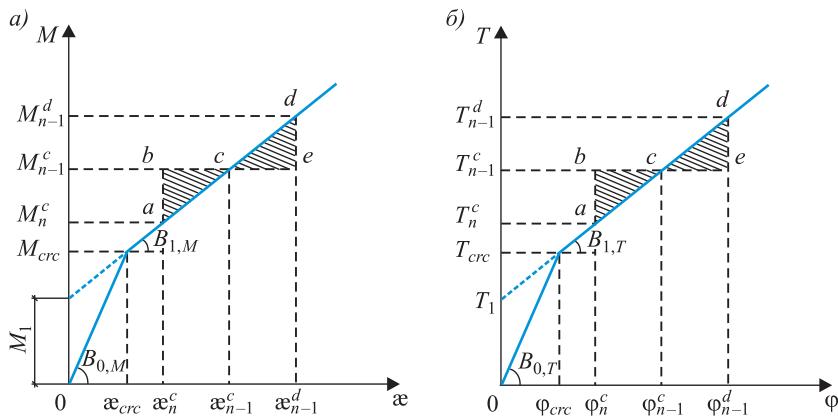


Рис. 2. Диаграммы «момент – кривизна» (а), «крутящий момент – угол поворота» (б) для сложнонапряженного элемента

Fig. 2. Diagrams "moment – curvature" (a), "torque – angle of rotation" (b) for a complexly stressed element

изгибающего и крутящего моментов до значений  $M_{n-1}$  и  $T_{n-1}$ . Если приложение особого воздействия в виде удаления колонны на втором этапе нагружения рамы происходит внезапно, в виде удара, то приращение изгибающего и крутящего моментов произошло бы до значений  $M_{n-1}^d$  и  $T_{n-1}^d$ . Максимальных значений эти моменты будут достигать на первой половине колебаний конструкции рамы от ударного воздействия.

Как отмечалось в работе [20], при расчете сложнонапряженных железобетонных конструкций целесообразно от диаграмм «напряжения – деформации» ( $(\sigma_i - \varepsilon_i)$ ) по соответствующим направлениям перейти к обобщенным усилиям, действующим в сечении элемента, и соответственно диаграммам «усилие – перемещение», в рассматриваемом случае – к диаграммам  $\langle M - \alpha \rangle$  и  $\langle T - \phi \rangle$ .

Для количественной оценки исследуемого динамического эффекта в соответствии с [19] общий вид диаграмм статико-динамического деформирования  $\langle M - \alpha \rangle$  и  $\langle T - \phi \rangle$  примем двухлинейными (см. рис. 2). Примем также гипотезу о простом нагружении железобетонного элемента и будем полагать, что диаграммы  $\langle M - \alpha \rangle$  и  $\langle T - \phi \rangle$  аффинно подобны.

Следуя подходу, предложенному Г.А. Гениевым [21], воспользуемся принципом сохранения полной удельной энергии деформации. Величину удельной работы внутренних усилий – изгибающего и крутящего моментов определим из выражений:

$$\Phi(\alpha) = \int_0^\alpha M(\alpha)d\alpha, \quad (1)$$

$$\Phi(\phi) = \int_0^\phi T(\phi)d\phi. \quad (2)$$

Условие постоянства полной удельной энергии приводит к равенству на графиках  $\langle M - \alpha \rangle$  и  $\langle T - \phi \rangle$  площади прямоугольников  $\alpha_n^c, b, e, \alpha_{n-1}^d; \phi_n^c$ ,

$b, e, \varphi_{n-1}^d$  площадям трапеций  $\mathfrak{A}_n^c, a, d, \mathfrak{A}_{n-1}^d; \varphi_n^c, a, d, \varphi_{n-1}^d$  (см. рис. 2, а, б соответственно):

$$\Phi(\mathfrak{A}_{n-1}^d) - \Phi(\mathfrak{A}_n^c) = M_{n-1}^c (\mathfrak{A}_{n-1}^d - \mathfrak{A}_n^c), \quad (3)$$

$$\Phi(\varphi_{n-1}^d) - \Phi(\varphi_n^c) = T_{n-1}^c (\varphi_{n-1}^d - \varphi_n^c). \quad (4)$$

Подставляя выражение (1) в формулу (3) и раскрывая подынтегральные выражения, получим:

$$\begin{aligned} \Phi(\mathfrak{A}_{n-1}^d) &= B_{0,M} \int_0^{\mathfrak{A}_{crc}} \mathfrak{A} d\mathfrak{A} + B_{1,M} \int_{\mathfrak{A}_{crc}}^{\mathfrak{A}_{n-1}^d} \mathfrak{A} d\mathfrak{A} = \\ &= B_{0,M} \frac{(\mathfrak{A}_{crc})^2}{2} + B_{1,M} \frac{(\mathfrak{A}_{n-1}^d)^2}{2} - B_{1,M} \frac{(\mathfrak{A}_{crc})^2}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\varphi) &= B_{0,M} \int_0^{\mathfrak{A}_{crc}} \varphi d\varphi + B_{1,M} \int_{\mathfrak{A}_{crc}}^{\mathfrak{A}_n^c} \varphi d\varphi = \\ &= B_{0,M} \frac{(\varphi_{crc})^2}{2} + B_{1,M} \frac{(\varphi_n^c)^2}{2} - B_{1,M} \frac{(\varphi_{crc})^2}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

здесь  $B_{0,M}, B_{0,T}, B_{1,M}, B_{1,T}$  – жесткость сечения рассматриваемого элемента при изгибе и при кручении до и после образования в нем трещин соответственно.

В итоге, после соответствующих преобразований для определения приращения динамической кривизны получим следующее уравнение

$$B_{1,M} \left[ \frac{(\mathfrak{A}_{n-1}^d)^2}{2} - \frac{(\mathfrak{A}_n^c)^2}{2} \right] = M_{n-1}^c (\mathfrak{A}_{n-1}^d - \mathfrak{A}_n^c). \quad (7)$$

Аналогично, используя формулу удельной работы (2) и условие постоянства полной удельной энергии при действии крутящего момента  $T$  (см. рис. 2, б), получено уравнение для определения угла поворота при динамическом дагружении конструкции, вызванном внезапной структурной перестройкой:

$$B_{1,T} \left[ \frac{(\varphi_{n-1}^d)^2}{2} - \frac{(\varphi_n^c)^2}{2} \right] = T_{n-1}^c (\varphi_{n-1}^d - \varphi_n^c); \quad (8)$$

$$B_{1,T} \frac{(\varphi_{n-1}^d)^2}{2} - \eta M_{n-1}^c \varphi_{n-1}^d - B_{1,T} \frac{(\varphi_n^c)^2}{2} + \eta M_{n-1}^c \varphi_n^c = 0. \quad (9)$$

В итоге имеем систему двух уравнений второго порядка для определения неизвестных  $\mathfrak{A}_{n-1}^d$  и  $\varphi_{n-1}^d$ :

$$\begin{cases} B_{1,M} \frac{(\mathfrak{A}_{n-1}^d)^2}{2} - M_{n-1}^c \mathfrak{A}_{n-1}^d - B_{1,M} \frac{(\mathfrak{A}_n^c)^2}{2} + M_{n-1}^c \mathfrak{A}_n^c = 0 \\ B_{1,T} \frac{(\varphi_{n-1}^d)^2}{2} - \eta M_{n-1}^c \varphi_{n-1}^d - B_{1,T} \frac{(\varphi_n^c)^2}{2} + \eta M_{n-1}^c \varphi_n^c = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Решая систему уравнений (10) относительно кривизны и угла поворота, получим:

$$(\alpha_{n-1}^d)_{1,2} = \frac{M_{n-1}^c \pm \sqrt{(M_{n-1}^c)^2 + B_{1,M}^2 (\alpha_n^c)^2 - 2B_{1,M} \alpha_n^c M_{n-1}^c}}{B_{1,M}}; \quad (11)$$

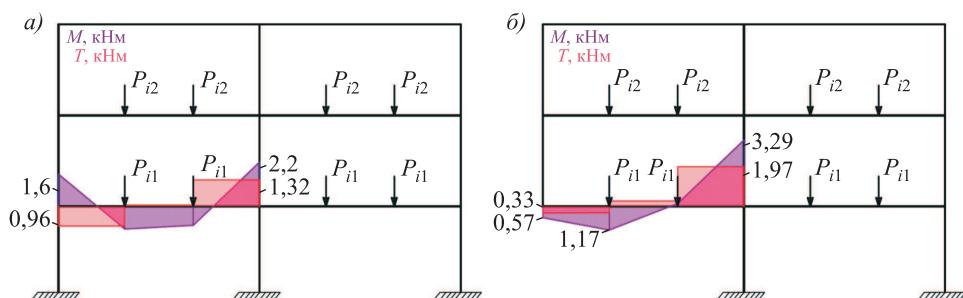
$$(\varphi_{n-1}^d)_{1,2} = \frac{\eta M_{n-1}^c \pm \sqrt{(\eta M_{n-1}^c)^2 + B_{1,T}^2 (\varphi_n^c)^2 - 2B_{1,T} \varphi_n^c \eta M_{n-1}^c}}{B_{1,T}}. \quad (12)$$

**Численные исследования и анализ результатов.** Для оценки достоверности и эффективности предложенной расчетной модели был выполнен расчет железобетонной 3-этажной рамы (рис. 3) на прогрессирующее обрушение при выключении крайней колонны первого этажа и проведен сопоставительный анализ результатов расчета с результатами ее испытаний. Рассмотрена опытная конструкция железобетонной рамы, испытанная на действие статической нагрузки, вызывающей в ригелях рамы кручение с изгибом. Результаты испытаний конструкции рамы, схема которой показана на рис. 1, приведены в работах [17, 18]. Сечение ригелей рамы принято  $100 \times 100$  мм. Бетон класса В15, армирование ригелей выполнено четырьмя продольными стержнями диаметром 6 мм из арматуры класса А240, поперечная арматура выполнена в виде замкнутых хомутов из проволоки диаметром 2 мм.

**Область прочности.** Соотношение между изгибающим и крутящим моментами изменяется после образования трещин от  $M + T$ , это показано в опытах Вл.И. Колчунова и А.И. Демьянова [22], так как изменяется схема распределения кривизн  $\alpha$ , углов поворота  $\varphi$  и распределения сдвигов после образования пластических зон в сжатом бетоне и неравномерном распределении деформаций в продольной и поперечной арматуре.

Анализируя полученные результаты расчета (рис. 4), можно отметить следующее. Коэффициент динамических догружений  $\theta$ , определяемый как отношение значения динамического крутящего или изгибающего момента в наиболее нагруженных железобетонных элементах рамы в системе  $n - 1$  к статическому значению крутящего или изгибающего момента, вычислен при разных значениях уровня статической нагрузки на первом этапе нагружения рамы.

При динамическом догружении особым воздействием в виде внезапного удаления левой стойки первого этажа рамы с уровня статической нагрузки,



*Рис. 3. Результаты нелинейного динамического расчета для ригеля, примыкающего к зоне локального разрушения в системе  $n$  (a) и в системе  $n - 1$  (б)*

*Fig. 3. The results of a nonlinear dynamic calculation for a crossbar adjacent to the zone of local destruction in the system  $n$  (a) and in the system  $n - 1$  (b)*

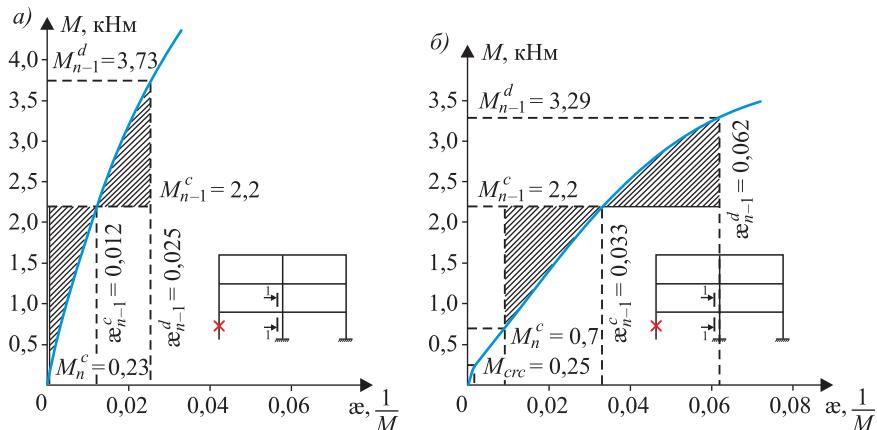


Рис. 4. К определению коэффициента динамических догружений в сечении I–I рамы, работающей при статической нагрузке без трещин (а) и с трещинами (б)

Fig. 4. To the determination of the coefficient of dynamic additional loads in the section I–I of the frame, operating under static load without cracks (a) and with cracks (b)

при которой в ригелях рамы в зоне возможного локального обрушения отсутствуют трещины, коэффициент динамических догружений составил  $\theta = 1,69$ . Соответственно значение этого коэффициента при динамическом догружении с уровня статической нагрузки, при которой в раме уже образуются трещины, составило  $\theta = 1,49$ . Из этого следует вывод о том, что диссипативные свойства железобетонных конструктивных систем с трещинами значительно выше, чем в системах без трещин.

Интерес представляют результаты анализа коэффициента динамического догружения в зависимости от соотношения между крутящим и изгибающим моментами  $\xi$  в конструкции ригеля. Из графика (рис. 5, а) следует, что

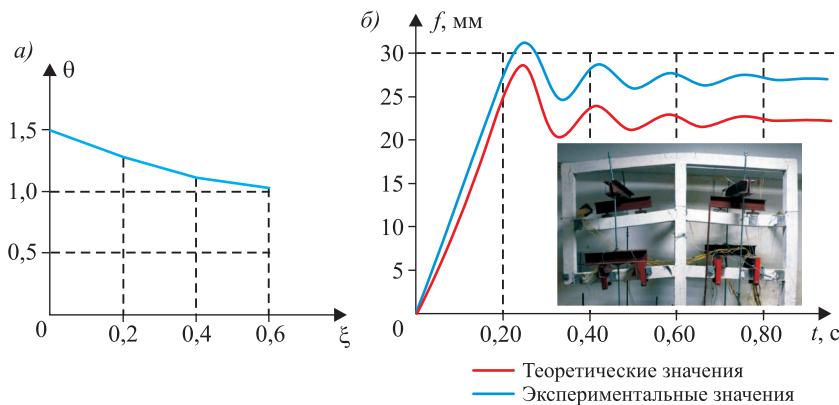


Рис. 5. Зависимость коэффициента динамического догружения  $\theta$  от соотношения между крутящим и изгибающим моментами  $\xi$  (а), зависимость «прогиб – время» при выключении из работы крайней колонны (б), общий вид разрушения опытной конструкции рамы (в)

Fig. 5. Dependence of the coefficient of dynamic additional loading  $\theta$  on the ratio between torque and bending moments  $\xi$  (a), the dependence of "deflection – time" when the outer column is turned off from work (b), the general view of the destruction of the experimental frame structure (c)

отношение крутящего к изгибающему моменту в расчетном сечении конструкции ригеля заметно влияет на коэффициент динамического догружения  $\theta$ .

Оценка разрушения опытной конструкции рамы была выполнена прямым динамическим расчетом с использованием ПК ЛИРА-САПР. Результаты расчета динамических перемещений ригеля рамы, примыкающего к удаляемой стойке, в сопоставлении с опытной картиной динамических перемещений сечения ригеля приведены на рис. 5, б. Характер затухания перемещений свидетельствует о том, что после особого воздействия ригели рамы над удаляемой стойкой разрушились в припорных зонах (рис. 5, в).

**Выводы.** 1. Предложена методика определения приращений динамических усилий в сложнонапряженных железобетонных элементах конструктивно нелинейных систем каркасов многоэтажных зданий при особом (аварийном) воздействии, вызывающем внезапную структурную перестройку и перераспределение силовых потоков в таких системах. Решение получено в аналитической форме на энергетической основе без привлечения аппарата динамики сооружений.

2. Численным анализом значений коэффициента динамических догружений в рассматриваемой конструкции железобетонной рамы установлено, что при внезапной структурной перестройке конструктивной системы рамы коэффициент динамических догружений и соответственно диссипативные свойства железобетонной рамы зависят не только от вида напряженного состояния и наличия трещин при статическом нагружении, но и от соотношения между крутящим и изгибающим моментами  $\xi$  в конструкции ригеля.

3. Предложенная методика может быть использована при расчете параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнонапряженными элементами при особых воздействиях для их защиты от прогрессирующего обрушения.

#### **Список источников**

1. Травуш В.И., Федорова Н.В. Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1. С. 21–28.
2. 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.
3. Pham A.T., Tana K.H., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete subassemblages under progressive collapse // Engineering Structures. 2017. Vol. 149. P. 2–20.
4. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8–13.
5. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределенных физически и конструктивно нелинейных системах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42–51.
6. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A. Crack resistance criterion of plane stress RC elements with prestressed reinforcement // Journal of Physics: Conf. Series, 2020. Vol. 1425. P. 012095.

7. 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. P. 012033.
8. Колчунов В.И., Кореньков П.А., Гуок Ф.Д. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 11. С. 1462–1472.
9. 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. P. 145–162.
10. Kolchunov 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. P. 032037.
11. 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. P. 1–12.
12. 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. P. 390–407.
13. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect reinforcement of reinforced concrete elements as a means of protecting a constructive system from a progressive collapse // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 753, no. 3. P. 032032.
14. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.
15. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1. С. 74–84.
16. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. Т. 90, № 4. С. 73–84.
17. Колчунов В.И., Московцева В.С. Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнопрогональными элементами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. № 18(3). С. 195–203.
18. Федорова Н.В., Московцева В.С., Савин С.Ю. Деформирование и разрушение железобетонных рам со сложнопрогональными элементами в запредельных состояниях // Сборник научных трудов РААСН. 2022. Т. 2. С. 458–468.
19. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
20. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.
21. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Клюева Н.В. и др. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: Моногр. М.: Изд-во АСВ, 2004. 216 с.
22. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Матвеев М.И. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций круглого сечения при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2020. № 3. С. 3–13.

## References

1. Travush V.I., Fedorova N.V. Calculation of the parameter of survivability of frame-bar structural systems. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific journal of building construction and architecture.* 2017; (1): 21–28. (In Russ.).
2. 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; (173): 122–149.
3. Pham A.T., Tana K.H., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete subassemblages under progressive collapse. *Engineering Structures.* 2017; (149): 2–20.
4. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Protection of multistory buildings from progressive collapse. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil engineering.* 2016; (6): 8–13. (In Russ.).
5. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu. Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear structural systems. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil engineering.* 2022; (9): 42–51. (In Russ.).
6. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A. Crack resistance criterion of plane stress RC elements with prestressed reinforcement. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020. (1425): 012095.
7. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions. *Journal of Physics: Conference Series.* 2019; (1425): 012033.
8. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Phan Dinh Quoc. A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts. *Vestnik MGСU.* 2021; 16 (11): 1462–1472. (In Russ.).
9. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research.* 2017; 69(3): 145–162.
10. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; (753): 032037.
11. 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; (2019): 1–12.
12. 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; (119): 390–407.
13. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect reinforcement of reinforced concrete elements as a means of protecting a constructive system from a progressive collapse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 753 (3): 032032.
14. Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil engineering.* 2018; (10): 95–101. (In Russ.).
15. Iliushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame structure systems under special impact. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Buildings and Reconstruction.* 2021; (1): 74–84. (In Russ.).

16. Vu N.T. Study of survivability of reinforced concrete constructive nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic formulation. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Buildings and Reconstruction.* 2020; (4): 73–84. (In Russ.).
17. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Survivability of reinforced concrete frames of multistorey buildings with complex stress elements. *Stroitel'naya mekhanika inzhe-nernykh konstruktsiy i sooruzheniy = Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2022; 18(3): 195–203. (In Russ.).
18. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Savin S.Yu. Deformation and destruction of reinforced concrete frames with 3d-stressed beams under accidental impact. *Sbornik nauchnykh trudov RAASN = Collection of scientific papers RAASN.* 2022; (2): 458–468. (In Russ.).
19. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. The resistance of reinforced concrete. Kiev, 2009. 432 p. (In Russ.).
20. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Survivability of buildings and structures under non-design impacts. Moscow, 2014. 208 p. (In Russ.).
21. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. et al. Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond-design impacts. Moscow, 2004. 216 p. (In Russ.).
22. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Matveev M.I. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures with round cross sections in torsion with bending. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction.* 2020; (3): 3–13. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**Н.В. Федорова** – доктор технических наук, профессор

**В.С. Московцева** – аспирант, lyavetka1@mail.ru

**М.А. Амелина** – студент

**А.И. Демьянов** – доктор технических наук

#### **Information about the authors**

**N.V. Fedorova** – DSc, Professor

**V.S. Moskovtseva** – Post-graduate Student, lyavetka1@mail.ru

**M.A. Amelina** – Student

**A.I. Demyanov** – DSc

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023

Одобрена после рецензирования 08.02.2023

Принята к публикации 15.02.2023

The article was submitted 10.01.2023

Approved after reviewing 08.02.2023

Accepted for publication 15.02.2023