



9. *Rukovodstvo po metodike otsenki resursa rabotosposobnosti i bezopasnosti betonnikh i zhelezobetonnikh konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii* [Guidelines on the methodology for assessing the service life and safety of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic engineering installations]. Saint Petersburg: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrotekhniki imeni B. Ye. Vedeneeva; 1997, 55 p. (In Russian).
10. Sadoyan G. A., Tamrazyan A. G. Prognozirovanie sroka sluzhby izgibaemikh zhelezobetonnikh konstruksii na osnove otsenki nadezhnosti ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Predicting the service life of bendable reinforced concrete structures based on assessing the reliability of their technical condition]. *Inzhenernii vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2024, no. 6 (114), pp. 429–442. (In Russian). EDN CMZIBK.
11. Zolina T. V. Poryadok provedeniya obsledovaniya zdaniya s tselyu posleduyushchei otsenki yego ostatochnogo resursa [Inspection procedure of buildings for the purpose of subsequent assessment of their residual life]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 11, pp. 98–108. (In Russian). EDN SZCFRCR.
12. Tamrazyan A. G. Metodologiya analiza i otsenki nadezhnosti sostoyaniya i prognostirovanie sroka sluzhby zhelezobetonnikh konstruksii [Methodology for the analysis and assessment of the reliability of the state and prediction the service life of reinforced concrete structures]. *Zhelezobetonnie konstruksii* [Reinforced Concrete Structures]. 2023, vol. 1, no. 1, pp. 5–18. (In Russian). EDN MGOLLW.
13. Walton J. C., Plansky L. E., Smith R. W. *Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal*. NUREG/CR-5542, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC; 1990.
14. Vasilev N. M. *Vliyanie mineralnikh masel na fiziko-mekhanicheskie svoystva betona i yego zashchita* [Influence of mineral oils on the physical and mechanical properties of concrete and its protection]. Moscow; 1966. 232 p. (In Russian).
15. Svintsov A. P., Fedyuk R. S., Abd N. A. A. Vliyanie rastitelnykh masel na prochnost betona i tsementno-peschanogo rastvora v zavisimosti ot prodolzhitel'nosti promaslivaniya [The effect of vegetable oils on the strength of concrete and cement-sand mortar, depending on the duration of oiling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2021, no. 10 (754), pp. 88–108. DOI 10.32683/0536-1052-2021-754-10-88-108. (In Russian). EDN CUKBAY.
16. Nikolaev V. B., Klimov E. A. Opredelenie kriteriev bezopasnosti stroitelnykh konstruksii AES [Determination of safety criteria for building structures of nuclear power plants]. *ATOMSRO.RU*. 2016. 18 p. Available at: <https://atomsro.ru/ob-assotsiatsii/konferentsiia-atomstroistandart-2016/kruglyi-stol-obespechenie-bezopasnosti-obektov-ispolzovaniia-atomnoi-energii-kliuchevoi-faktor-konkurentosposobnosti-proektov/> (accessed: 25.02.2026). (In Russian).
17. *Metodika raschetnogo prognostirovaniya sroka sluzhbi zhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov* [Methodology for computational forecasting of the service life of reinforced concrete spans of road bridges]. Moscow: Informavtodor; 2002. 140 p. (In Russian).
18. *Metodika otsenki ostatochnogo resursa nesushchikh konstruksii zdanii i sooruzhenii* [Methodology for assessing the residual resource of load-bearing structures of buildings and structures]. Moscow; 2018. 50 p. Available at: <https://api.faucc.ru/api/assets/08c7b576-e760-4f43-9879-5883c057f3d6> (accessed: 25.02.2026). (In Russian).
19. Fedorov V. S., Trekin N. N., Kodish E. N., Terekhov I. A. Kriterii dlya otsenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh kolonn, rigelei, balok i ferm [Criteria for assessing the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction]. 2023, no. 3 (107), pp. 58–69. DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-58-69. (In Russian). EDN ZTABZK.
20. Terekhov I. A., Trekin N. N., Kodish E. N., Shmakov S. D. Prodolzhitel'nost periodov bezopasnoi ekspluatatsii zdanii i sooruzhenii s zhelezobetonnyimi konstruksiyami [Duration of periods of safe operation of buildings and structures with reinforced concrete structures]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2024, no. 4, pp. 20–27. DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.20-27. (In Russian). EDN UCDRWL.
21. Trekin N. N., Kodish E. N., Terekhov I. A., et al. Metodika opredeleniya ekspluatatsionnoi bezopasnosti zdanii i ikh konstruksii [Methodology for determining the operational safety of buildings and their structures]. *Academiya. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2022. no. 4, pp. 152–159. DOI 10.22337/2077-9038-2022-4-152-159. (In Russian). EDN XLNAPW.
22. *Rekomendatsii po otsenke nadezhnosti stroitelnykh konstruksiiu zdaniyu i sooruzheniyu po vneshnim priznakam* [Recommendations for assessing the reliability of building structures of buildings and structures based on external signs]. Moscow: FGUP TsPP; 2001. 100 p. (In Russian).

© И. А. Терехов

Ссылка для цитирования:

Терехов И. А. Инженерный метод определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 5–12.

УДК 624.075

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-12-20

СИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ХРУПКОМ И ПЛАСТИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ

П. А. Кореньков, С. Е. Хохлунов

Кореньков Павел Анатолиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (495) 287-49-14 доб. 1765; e-mail: kpa_gbk@mail.ru;

Хохлунов Сергей Евгеньевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (910) 854-87-35; e-mail: khokhlunov02mf@mail.ru

Исследовано напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов фрагмента рамного железобетонного каркаса при потере несущей способности крайней колонны с учетом физически нелинейных характеристик материалов. Установлен характер поведения системы в зависимости от типа разрушения (пластическое или хрупкое) на разных уровнях эксплуатационной нагрузки. Динамическое догружение определялось методом прямого динамического расчета с интегрированием уравнений движения и учетом демпфирования. Выявлено, что при пластическом разрушении конструкция эффективнее поглощает и рассеивает энергию, что ведет к быстрому затуханию колебаний. На основе полученных данных обнаружено, что при хрупком характере разрушения колебательный процесс отсутствует при предельной нагрузке, что говорит о развитии прогрессирующего обрушения. При этом для рассмотренных фрагментов установлено, что наиболее стремительный рост внутренних усилий характерен для перестроенных конструкций.

Ключевые слова: железобетон, прогрессирующее обрушение, узловые зоны, колебательный процесс, хрупкое и пластическое разрушение.

FORCE RESISTANCE AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES UNDER BRITTLE AND PLASTIC FAILURE

P. A. Korenkov, S. Ye. Khokhlunov

Korenkov Pavel Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 287-49-14; e-mail: kpa_gbk@mail.ru;

Khokhlunov Sergey Yevgenyevich, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (910) 854-87-35; e-mail: khokhlunov02mf@mail.ru

The stress-strain state of reinforced concrete elements of a frame reinforced concrete frame fragment was studied in the case of loss of load-bearing capacity of the extreme column, taking into account the physically nonlinear characteristics of the materials. The behavior of the system was determined depending on the type of failure (plastic or brittle) at different levels of operational load. Dynamic overloading was determined using the method of direct dynamic calculation with integration of the equations of motion and taking into account damping. It was found that during plastic failure, the structure absorbs and dissipates energy more effectively, leading to rapid damping of vibrations. Based on the data obtained, it was established that in the case of brittle failure, there is no oscillatory process at the ultimate load, which indicates the development of progressive collapse. In addition, it was found that over-reinforced structures exhibit the most rapid increase in internal forces.

Keywords: reinforced concrete, progressive collapse, nodal zones, oscillatory process, brittle and plastic failure.

Введение

Статистика показывает, что увеличивающееся с каждым днем число аварийных случаев вызвано воздействиями, не предусмотренными при проектировании – взрывами газового оборудования, повреждением опорных элементов при авариях с автомобильным транспортом и даже террористическими актами. Все это часто становится причиной разрушения несущих элементов, а в некоторых случаях и всего здания, поэтому в последние годы проблеме защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения уделяется все больше внимания [1–7]. Одной из главных задач в исследовании снижения аварийных ситуаций является определение напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций после динамического воздействия, вызванного потерей несущей способности отдельных элементов системы [8–10].

Анализ данных, полученных в ходе испытаний и компьютерного моделирования [11–18], свидетельствует о важном факторе – учете уровня действующего нагружения в момент аварийной расчетной ситуации, влияющей на характер поведения внутренних усилий. В частности, показаны два типа разрушения (пластическое и хрупкое), различающиеся по количеству продольной арматуры в сечении [19–24]. При динамическом воздействии на систему путем выключения из работы крайней опоры происходит раздробление сжатой зоны бетона и развитие пластических деформаций с последующим разрушением сечения.

Цель настоящего исследования – создание метода, позволяющего более точно оценивать поведение железобетонных каркасов при перестройке структуры материала, вследствие разрушения отдельных элементов системы с учетом вида (хрупкое или пластическое).

Модель монолитного железобетонного каркаса

Объектом исследования служит фрагмент рамного железобетонного каркаса (рис. 1), состоящий из одного уровня и двух пролетов. Выбранная модель позволяет анализировать характер поведения несущих конструкций при прогрессирующем обрушении.

Проанализированы две модели: С1 – симметрично армированный рамный фрагмент, характер разрушения пластический ($\xi < \xi_R$); С2 – несимметрично армированный, характер разрушения хрупкий ($\xi > \xi_R$).

Фрагмент рамы С1 выполнен из бетона класса В25, рамы С2 – из В40. Схема армирования сечений представлена в таблице. Размер поперечного сечения колонн и ригелей 50 × 100 мм. Рассмотрены две схемы армирования. В первом случае продольное армирование ригеля в конструкции с пластическим характером разрушения выполнено симметричным армированием стержней $\varnothing 6$ арматуры класса А400. Поперечная арматура в ригеле принята из проволоки диаметром 1,5 мм с шагом 100 мм в пролете и 50 мм у опор. Во втором же случае продольное армирование ригеля в конструкции с хрупким характером разрушения выполнено переменным армированием стержней 2 $\varnothing 8$ арматуры класса А500 и 2 $\varnothing 4$ арматуры класса Вр500. Поперечное армирование ригеля представлено в виде стержней диаметром 2 мм арматуры класса Вр500 с шагом 100 мм в пролете и 50 мм в приопорных зонах. Сечение колонны в первом варианте имеет симметричное армирование плоским каркасом, состоящим из двух продольных стержней $\varnothing 6$ А400 и поперечной арматуры, представленной в виде проволоки диаметром 1,5 мм. Шаг поперечной арматуры для колонн принят 100 мм. Сечение колонны во втором варианте

имеет симметричное армирование плоским каркасом, состоящим из двух продольных стержней Ø8 A500. Поперечная арматура запроектирована из стержней диаметром 2 мм. Шаг поперечных стержней для колонн принят 100 мм. Прочностные и деформационные характеристики материалов задавались нелинейно в обоих вариантах.

Величины сосредоточенных нагрузок, приложенных на отметке 1/3 пролета, определялись итеративным методом на основе предельного состояния несущей способности поперечного сечения с учетом нормативного коэффициента безопасности, согласно требованиям ГОСТ 8829-2018, и коэффициентов надежности по действующим нагрузкам в соответствии с СП 20.13330.2018.

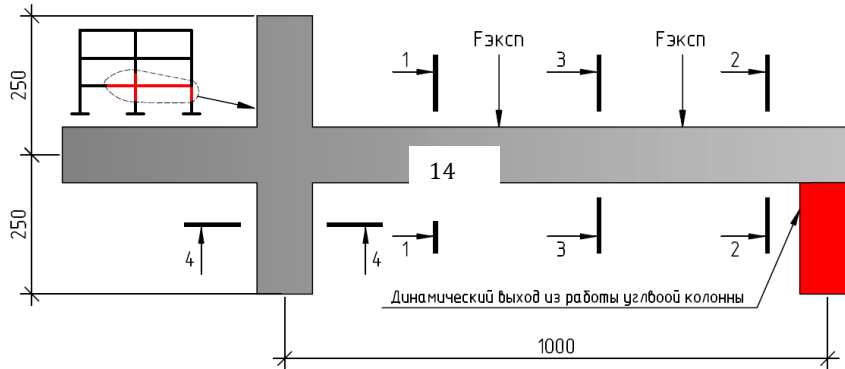


Рис. 1. Рассматриваемый фрагмент несущей системы (иллюстрация авторов)
Fig. 1. The considered fragment of the supporting system and the reinforcement parameters of the elements (illustration by the authors)

Таблица

Параметры армирования элементов системы

№ п/п	№ фрагмента	Схема поперечного сечения			
		1-1	2-2	3-3	4-4
1	C1				
2	C2				

Первоначально был выполнен модальный анализ для двух систем, учитывая выключение из работы системы крайней колонны, и определены собственные частоты колебаний конструкций (рис. 2). Изгибная жесткость была принята из сечений образцов.

Динамический анализ выполнен с учетом демпфирования на основе модели Рэлея. Величины α и β определяются через характеристики собственных колебаний конструкции, а именно через круговые частоты первой и второй форм колебания.

Система уравнений, необходимых для определения коэффициентов Рэлея, представлена ниже:

$$\begin{cases} 2\zeta_1\omega_1 = \alpha + \beta\omega_1^2 \\ 2\zeta_2\omega_2 = \alpha + \beta\omega_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

Предположили, что коэффициент демпфирования $\zeta_1 = \zeta_2 = 0,1$, получаем:

$$\alpha = 2\zeta\omega_1 \frac{\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\zeta}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (3)$$

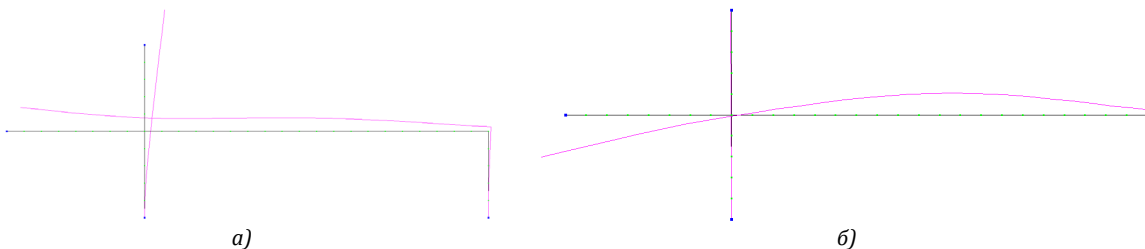


Рис. 2. Собственные формы колебания конструкции: а) первая форма б) вторая форма (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Proper forms of vibration of the structure: a) the first form b) the second form (illustration by the authors)

Для фрагмента, в сечении которого соблюдается условие $\xi \leq \xi_R$, характеризующее пластическое разрушение, коэффициенты Рэлея рассчитаны следующим образом:

$$\alpha = 2 \cdot 0,1 \cdot 19,351 \frac{37,993}{(19,351 + 37,993)} = 2,564,$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,1}{(19,351 + 37,993)} = 0,003488.$$

Для фрагмента, в сечении которого не соблюдается условие $\xi \leq \xi_R$, характеризующее хрупкое разрушение, коэффициенты Рэлея определены следующим образом:

$$\alpha = 2 \cdot 0,1 \cdot 14,800 \frac{29,274}{(14,800 + 29,274)} = 1,966,$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,1}{(14,800 + 29,274)} = 0,004538.$$

Расчетная нагрузка критических воздействий на фрагмент несущей системы осуществляется посредством метода динамического моделирования.

В случае прогрессирующего обрушения, вызванного выключением из модели крайней правой колонны, параметр времени инициированного отказа задается величиной, равной $0,1T$ (T – основной период собственных колебаний конструкции).

Анализ полученных результатов исследования

Анализ производился в диапазоне нагружения от $0,3$ до $0,9 M_{эксп}$ на фрагментах рам при условии потери несущей способности крайней колонны. Установлена динамика изменения внутренних усилий во времени для критически нагруженных изгибаемых элементов исследуемого фрагмента конструктивной системы. Особое внимание уделено элементам, испытывающим наиболее динамическое воздействие: 1 – участок ригеля в месте сопряжения с неразрушенной колонной, 2 – узловое сопряжение над удаляемым элементом.

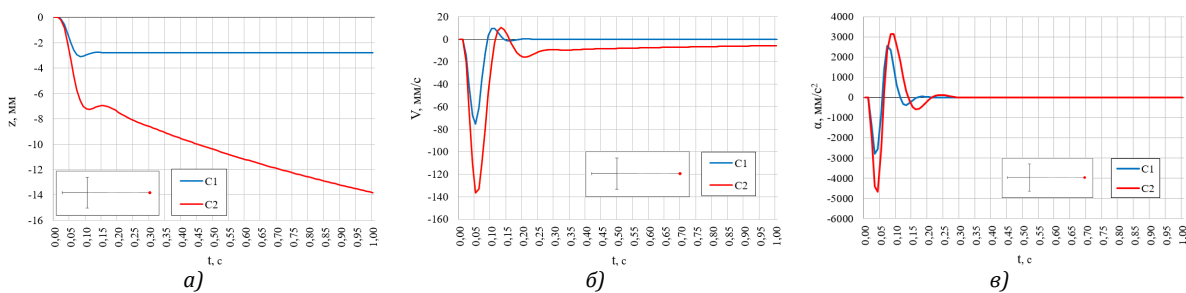


Рис. 3. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б), ускорения (в) при уровне нагрузки $0,3 M_{эксп}$ (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Time variations of displacement (a), velocity (b), and acceleration (c) at $0.3 M_{exp}$ load level (illustration by the authors)

При исследовании динамической нагрузки поведения конструкции при потере несущей способности крайней опоры в условиях относительно низкого уровня нагрузки $0,3 M_{эксп}$ (рис. 3) установлено, что развитие деформаций происходит преимущественно в упругой стадии с характерным затуханием колебаний. Максимальные перемещения узла над удаленной колонной составляют $1/333$ пролета для непереармированного варианта и $1/143$ – для переармированного варианта, однако здесь процесс деформирования не стабилизируется, как в первом варианте. Перемещения

нарастают монотонно и плавно. На начальной стадии $0,05-0,08$ с в узле над удаленной колонной возникают максимальные скорости: 80 м/с для симметричного сечения и 140 м/с – для переармированного. Ускорения в узле над удаленной колонной находятся в диапазоне от 2500 до 4500 м/с². Для симметрично армированного варианта ускорение возрастает в начальный период $0-0,1$ с максимумом 2500 м/с², в то время как переармированный вариант показывает более интенсивное нарастание с максимумом 4500 м/с² к $0,05-0,1$ с и затем затухает к $0,3$ с.

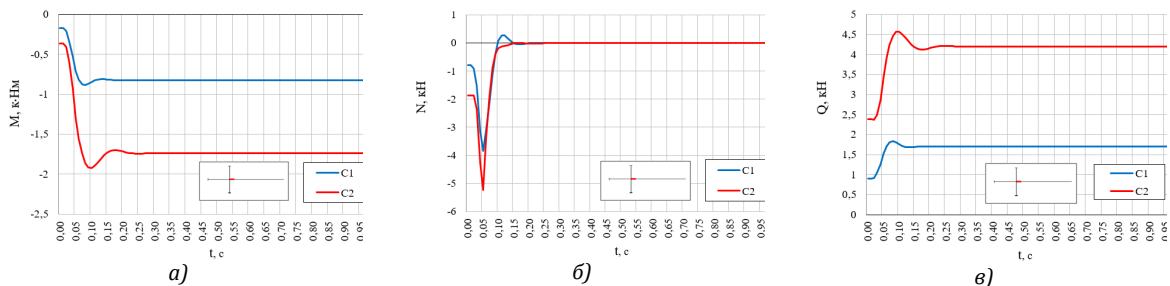


Рис. 4. Изменение во времени изгибающего момента (а), продольной силы (б), поперечной силы (в) при уровне нагрузки $0,3 M_{эксп}$ в элементе ригеля у неразрушенной колонны (иллюстрация автора)

Fig. 4. Time variations of bending moment (a), axial force (b), and shear force (c) at $0.3 M_{exp}$ load level in a girder element near the undamaged column (illustration by the author)

В элементе ригеля у неразрушенной колонны при нагрузке $0,3 M_{эксп}$ (рис. 4) изгибающий момент возрастает в $4,25$ раза для симметрично армированного образца и в $5,6$ раза – для переармированного.

Для несимметрично армированного образца график постепенно затухает и переходит на уровень четырехкратного увеличения исходного значения. Переармированный образец устанавливается на уровне

приращения в 5,1 раза, достигнув установившегося состояния к 0,25 с. Затухание колебательного процесса для обоих образцов наступает к 0,3 с с полной стабилизацией на оставшемся интервале времени. Различие в амплитудных значениях объясняется повышенной жесткостью переармированного сечения, и следует отметить, что более быстрая стабилизация изгибающего момента более характерна для элементов с пластическим характером разрушения. На начальной стадии динамического воздействия 0,05–0,08 с происходит резкое нарастание продольных сил до высоких значений, составляющих 3,5 кН для непереармированного образца и 5,0 кН – для переармированного. Пиковые значения достигаются практически одновременно для обоих случаев, что говорит о сходстве начальных динамических механизмов сопротивления конструкции. После максимума наблюдается различный характер затухания колебаний. Для конструкции с пластическим характером разрушения восстановление

продольного усилия протекает более плавно и продолжается во времени до 0,3–0,35 с, что объясняется пластическим характером разрушения.

На начальном этапе динамического воздействия 0,05–0,10 с поперечная сила возрастает в 1,8 раза для симметрично образца С1 и в 1,9 раза – для С2, демонстрируя резкое нарастание с последующим установлением. Симметрично армированный образец размещается на уровне приращения в 1,65 раза от исходного значения уже к 0,15 с, переармированный – стабилизируется на приращении в 1,75 раза к моменту времени 0,2 с. Полная стабилизация напряженного состояния достигается к 0,25 с для обоих образцов с сохранением установившихся значений на оставшемся временном интервале. При этом более интенсивное развитие поперечных сил в переармированном варианте связано с его повышенной жесткостью, препятствующей конструкции эффективно рассеивать динамические нагрузки.

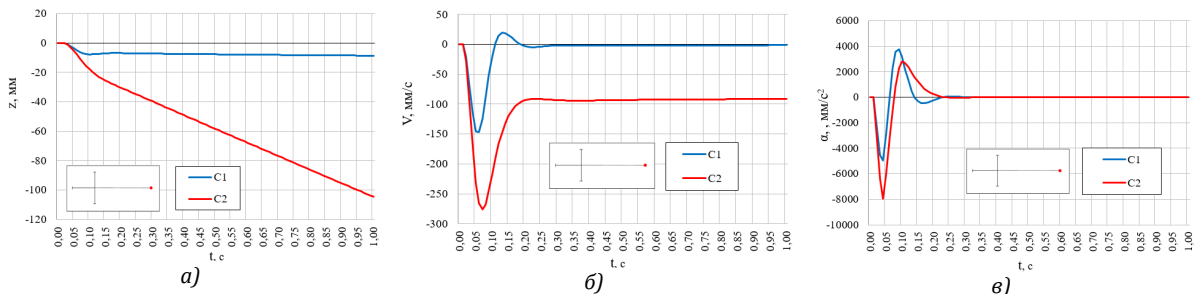


Рис. 5. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б), ускорения (в) при уровне нагрузки 0,6 $M_{эксп}$ (иллюстрация автора)

Fig. 5. Time variations of displacement (a), velocity (b), and acceleration (c) at 0.6 M_{exp} load level (illustration by the author)

При среднем уровне относительной нагрузки, равным 0,6 $M_{эксп}$ (рис. 5), поведение конструктивной системы становится иным. Симметрично армированный образец демонстрирует более ускоренное развитие перемещений в начальный период 0,05–0,15 с с постепенным замедлением роста и к 0,4 с достигает установившегося значения перемещения в 10 мм. В то время, как несимметрично армированный вариант характеризуется постоянным линейным возрастанием перемещений. К концу анализируемого временного интервала перемещения достигают значений, превышающих в восемь раз те, которые наблюдаются при нагрузке 0,3 $M_{эксп}$. Изменение скоростей и ускорения также показательные на начальной стадии. Значение начальной скорости в образце С2 составляет 279 мм/с, тогда как в образце С1 – 150 мм/с, что указывает на превышение относительно обоих образцов примерно в 90 %.

Для обоих фрагментов рам ускорения имеют схожий характер колебаний с постепенным снижением амплитуды. При сравнении более долгое развитие колебаний и стабилизация к нулевому уровню характерны переармированному образцу. Полное установление нулевого уровня наблюдается у обоих образцов к 0,35 с.

В элементе ригеля у неразрушенной колонны при нагрузке 0,6 $M_{эксп}$ (рис. 6) наблюдается иное

поведение изменения внутренних усилий, отличающееся от поведения конструкции при нагрузке 0,3 $M_{эксп}$. Догружение составляет 1,64 $M_{эксп}$ для образца С1 и 2,17 $M_{эксп}$ – для С2. В образце С1 изгибающий момент стремительно возрастает в начальный период 0–0,12 с, достигая максимального значения 1,65 кН. После этого происходит быстрое затухание колебаний, однако в сечении, где не соблюдается условие $\xi \leq \xi_R$, изгибающий момент возрастает более интенсивно и достигает своего максимального значения 3,2 кН·м уже к 0,08 с. Поведение продольных сил обоих образцов сильно отличается. Для симметрично армированной конструкции продольная сила в начале анализируемого интервала 0–0,08 с стремительно снижается, после чего система восстанавливается уже к 0,2 с, в результате стремясь к нулевому уровню. В сечении С2 элемент ригеля переходит из сжатого в растянутое состояние с изменением значений продольной силы с 4,5 до 2,3 кН.

Анализируя перемещения узла над удаленной колонной при действии критической нагрузки 0,9 $M_{эксп}$ (рис. 7), обнаружено, что поведение конструкции показывает принципиально иную картину по сравнению с другими уровнями нагружения. Характерной особенностью является отсутствие колебательного процесса, что свидетель-

ствует о разрушении несущих элементов и развитии прогрессирующего обрушения с хрупким характером разрушения. Важно отметить, что скорости достигают максимальных значений в 220

и 280 м/с. Это превышает величину на первом уровне загрузки в трех- и двукратном увеличении для сечений C1 и C2 соответственно.

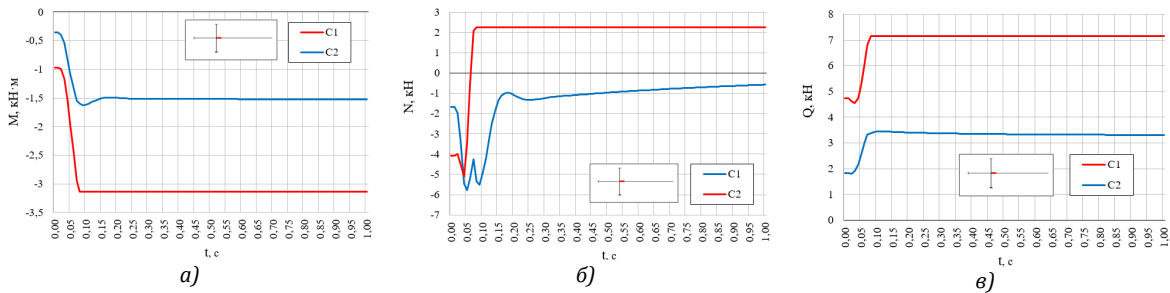


Рис. 6. Изменение во времени изгибающего момента (а), продольной силы (б), поперечной силы (в) при уровне нагрузки 0,6 $M_{эксп}$ в элементе ригеля у неразрушенной колонны (иллюстрация автора)

Fig. 6. Time variations of bending moment (a), axial force (b), and shear force (c) at 0.6 M_{exp} load level in a girder element near the undamaged column (illustration by the author)

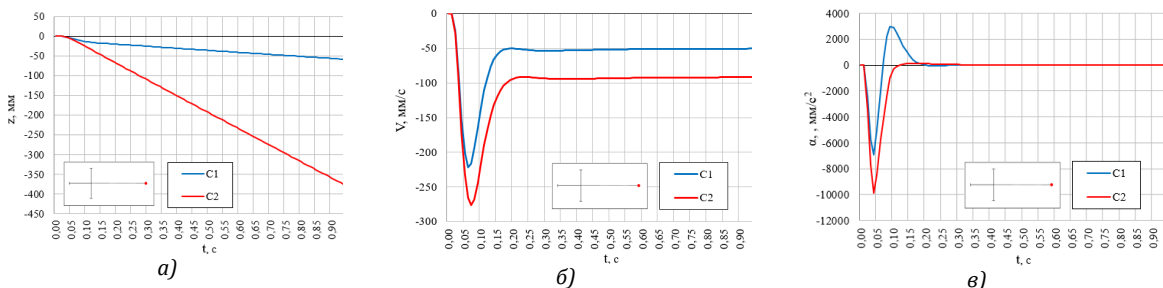


Рис. 7. Изменение во времени перемещения (а), скорости (б), ускорения (в) при уровне нагрузки 0,9 $M_{эксп}$ (иллюстрация автора)

Fig. 7. Time variations of displacement (a), velocity (b), and acceleration (c) at 0.9 M_{exp} load level (illustration by the author)

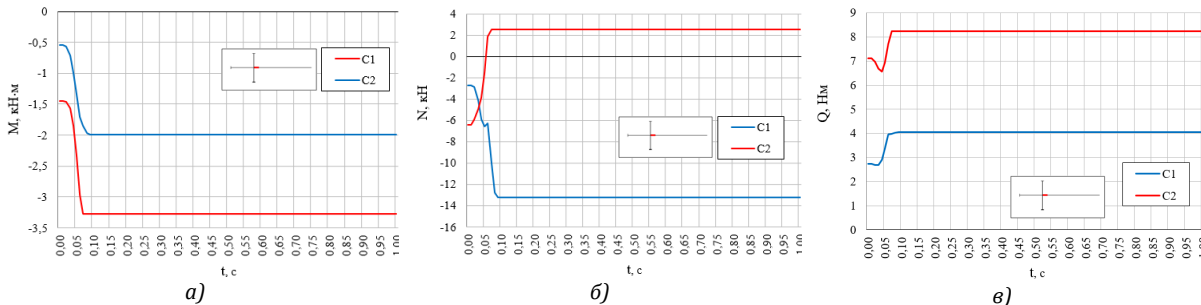


Рис. 8. Изменение во времени изгибающего момента (а), продольной силы (б), поперечной силы (в) при уровне нагрузки 0,9 $M_{эксп}$ в элементе ригеля у неразрушенной колонны (иллюстрация автора)

Fig. 8. Time variations of bending moment (a), axial force (b), and shear force (c) at 0.9 M_{exp} load level in a girder element near the undamaged column (illustration by the author)

В элементе ригеля у неразрушенной колонны при нагрузке 0,9 $M_{эксп}$ (рис. 8) изгибающий момент увеличивается в четыре раза для сечения с симметричным армированием и в 2,3 раза для перearмированного сечения от начальных показателей. При этом характер изменения продольных усилий существенно меняется. Для образца C1 продольная сила возрастает к 0,08 с, фрагмент ригеля испытывает сжатие, достигает значения в 13,5 кН и сразу стабилизируется на этом уровне до конца временного интервала. Для образца C2 на ранней стадии в элементе ригеля происходит резкое изменение напряженного состояния: продольная сила переходит из сжатия со значением $-5,5$ кН в растяжение со значением 2,5 кН с последующей стабилизацией на этом уровне.

Анализируя характер поперечных усилий, можем выделить, что в симметрично армированной конструкции значения возрастают в 2,7 раза от исходных, в то время как в конструкции с хрупким характером разрушения сила увеличивается в 2,5 раза и при этом оба варианта достигают установившегося уровня практически одновременно уже к 0,07 с.

Заключение

Исследовано напряженно-деформированное состояние железобетонных рамных каркасов при потере несущей способности крайней колонны с учетом физически нелинейных характеристик материалов. Установлен характер поведения конструктивной системы в зависимости от характера разрушения конструкций и разных уровней относительной эксплуатационной нагрузки.

Выявлено, что конструкции с пластическим характером разрушения проявляют значительно большую способность к поглощению и диссипации энергии при динамическом воздействии, что ведет к быстрому затуханию колебаний и стабилизации напряженного состояния.

Полученные результаты дают возможность отметить, что конструкции с хрупким характером разрушения характеризуются отсутствием колебательного процесса при предельном уровне относительной нагрузки, что говорит о развитии прогрессирующего обрушения.

Список литературы

1. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 5. – С. 4–8. – EDN IBDYBH.
2. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects [Живучесть конструктивных систем при особых воздействиях] / V. I. Travush, N. V. Fedorova // Civil Engineering. – 2018. – Vol. 81 (5). – P. 73–80. – DOI 10.18720/MCE.81.8. – EDN VKGVTX.
3. Федоров В. С. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагруженности на возможный динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках / В. С. Федоров, Е. А. Меднов // Строительство и реконструкция. 2010. № 6. С. 48–52.
4. Кабанцев О. В. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции / О. В. Кабанцев, А. Г. Тамразян // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5 (49). – С. 15–26. – DOI: 10.5862/MCE.49.2. – EDN SKHSAV.
5. Elsanadedy H. M. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario [Особенности динамических воздействий железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и прецизионном оформлении] / H. M. Elsanadedy, T. H. Almusallam, Y. A. Al-Salloum, H. Abbas // Construction and Building Materials. – 2017. – № 142. – P. 552–571.
6. Saffari H. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures [Оценка коэффициента динамических воздействий прогрессирующего обрушения] / H. Saffari, J. Javad Mashhadi // Engineering Failure Analysis. – 2018. – № 84. – P. 300–310. – <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.011>.
7. Колчунов В. И. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях и отказе конструктивных элементов при гражданском строительстве / В. И. Колчунов, В. И. Колчунов, Н. В. Федорова // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 54–60. – EDN UWQAEF.
8. Кодыш Э. Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния / Э. Н. Кодыш // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – Т. 10. – С. 95–101. – EDN YNRBNJ.
9. Fialko S. Yu. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion / S. Yu. Fialko, O. V. Kabantsev, A. V. Perelmuter // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 2 (102). – DOI 10.34910/MCE.102.14. – EDN ZVLLVV.
10. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns / A. Tamrazyan // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 475–476. – P. 1563–1566. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1563.
11. Колчунов В. И. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований / В. И. Колчунов, Т. А. Ильющенко, Н. В. Федорова и др. // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3 (113). – С. 31–71.
12. Колчунов В. И. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях / В. И. Колчунов, О. Б. Бушова, П. А. Кореньков // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 18–28. – EDN НТВКJG.
13. Колчунов В. И. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях / В. И. Колчунов, П. А. Кореньков, Д. Г. Фан // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2021. – Т. 16, № 11. – С. 1462–1472. – EDN ZBNUYU.
14. Федорова Н. В. Анализ нелинейного статико-динамического деформирования железобетонных рам в предельных состояниях / Н. В. Федорова, Н. Т. Ву, М. Д. Медянкин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (64). – С. 11–24. – EDN CFAUJD.
15. Определение динамических усилий в сложнапряженных элементах железобетонных рам при особом воздействии / Н. В. Федорова, В. С. Московцева, М. А. Амелина, А. И. Демьянов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 2 (770). – С. 5–15. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-770-2-5-15. – EDN CPRLCG.
16. Nguyen Van Hung. Progressive Collapse Behaviour of Earthquake-Damaged Interior Precast Concrete Joints with Headed Bars and Plastic Hinge Relocation / Van Hung Nguyen, Kang Hai Tan // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 306. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
17. Hamid Mirzahosseini. Progressive Collapse Assessment of Reinforced Concrete (RC) Buildings with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPRC) / Hamid Mirzahosseini, S. Mohammad Mirhosseini, Ehsanollah Zeighami // Structures. – 2023. – Vol. 49. – P. 139–151. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
18. Haoran Wang. Progressive Collapse Resistance of Self-Centering Infilled Precast Concrete Frame under Side Column Removal Scenario / Haoran Wang, Shuang Li, Changhai Zhai, Sidi Shan // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 301. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668?via%3Dihub> (дата обращения 14.05.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
19. Колчунов В. И. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова, С. Ю. Савин // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 9. – С. 42–51. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.09.42-51. – EDN OTJLOQ.
20. Колчунов В. И. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях / В. И. Колчунов, В. В. Тур // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 5–15. – DOI 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15

21. Федорова Н. В. Экспериментальное определение параметров статико-динамического деформирования бетона при режимном нагружении / Н. В. Федорова, М. Д. Медянкин, О. Б. Бушова // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 3. – С. 72–81. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-89-3-72-81>.
22. Alekseytsev A. Numerical Analysis of the Buried Fiber Concrete Slabs Dynamics under Blast Loads / A. Alekseytsev, S. Sazonova // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – № 1 (117). – P. 11703. – DOI 10.34910/MCE.117.3. – EDN FAWTHP.
23. Кайдас П. А. Оценка прочности монолитных и сборно-монолитных железобетонных балок с использованием диаграммных методов расчета / П. А. Кайдас, С. П. Меликсетян, О. О. Коренькова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 1 (51). – С. 36–40. – DOI 10.52684/2312-3702-2025-51-1-36-40.
24. Меликсетян С. П. Прочность и деформативность изгибаемых монолитных железобетонных элементов при динамических аварийных воздействиях / С. П. Меликсетян, П. А. Кайдас, О. О. Коренькова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 2 (52). – С. 11–16. – DOI 10.52684/2312-3702-2025-52-2-11-16. – EDN SSFCNE.

References

1. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Ekspozitsiya zhivuchesti zhelezobetona [The exhibition of the survivability of reinforced concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [Izvestiya vuzov. Stroitelstvo]. 2007, no. 5 (81), pp. 4–8. EDN IBDYBH.
2. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Civil Engineering*. 2018, vol. 81 (5), pp. 73–80. DOI 10.18720.MCE.81.8. EDN VKGVTX.
3. Fedorov V. S., Mednov E. A. Vliyaniye iskhodnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i urovnya nagruzhennosti na vozmozhnyy dinamicheskiy effekt pri avarinom razrushenii opori v nerazreznikh stalnikh balkakh [Influence of the initial stress-strain state and loading level on the possible dynamic effect during emergency support failure in continuous steel beams]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2010, no. 6, pp. 48–52.
4. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Uchet izmeneniy raschetnoi skhemi pri analize raboti konstruktssii [Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behaviour]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of civil engineering]. 2014, no. 5 (49), pp. 15–26. DOI 10.5862.MCE.49.2. EDN SKHSAV.
5. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario. *Construction and Building Materials*. 2017, no. 142, pp. 552–571.
6. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*. 2018, no. 84, pp. 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.011>.
7. Kolchunov V. I., Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Deformatsionnye modeli zhelezobetona pri osobikh vozdeistviyakh [Deformation models of reinforced concrete under special impacts]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2018, no. 8, pp. 54–60. EDN UWQAEF.
8. Kodish E. N. Proektirovaniye zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchetom vozniknoveniya osobogo predelnogo sostoyaniya [Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2018, vol. 10, pp. 95–101. EDN YNRBNJ.
9. Fialko S. Yu., 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. 2, pp. 10214–10214. DOI: 10.34910.MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
10. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 475–476, pp. 1563–1566. DOI: 10.4028/www.sciencedirect.com/AMM.475-476.1563. EDN SKKQPP.
11. Kolchunov V. I. Ilyushchenko. T.A. Fedorova N.V. Zhivuchest konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzheniy: analiticheskiy obzor issledovaniy [Structural robustness: an analytical review]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2024, no. 3 (113), pp. 31–71. DOI 10.33979.2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH.
12. Kolchunov V. I., Bushova O. B., Korenkov P. A. Deformirovaniye i razrusheniye zhelezobetonnykh ram s rigelyami, armirovannymi naklonnymi sterzhnyami pri osobikh vozdeistviyakh [Methods of experimental and numerical studies of reinforced concrete frames of multi-storey buildings under special influences]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2022, no. 1 (99), pp. 18–28. DOI 10.33979.2073-7416-2022-99-1-18-28. EDN HTBKJG.
13. Kolchunov V. I., Korenkov P. A., Fan D. G. Osoboe predelnoe sostoyaniye v zhelezobetonnykh karkasakh s uzlamy, usilennymi kosvennim armirovaniem pri avariinikh vozdeistviyakh [A special limit state of reinforced concrete frames with laterally reinforced nodes in the case of emergency impacts]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2021, vol. 16, no. 11, pp. 1462–1472.
14. Fedorova N. V., Vu. N. T., Medyankin M. D. Analiz nelineynogo statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnykh ram v zapredelnikh sostoyaniyakh [Analysis of nonlinear static-dynamic deformation of reinforced concrete frames in out-of-limit states]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* [Scientific Journal of Construction and Architecture]. 2021, no. 4 (64), pp. 11–24. DOI 10.22227.1997-0935.2021.11.1462-1472. EDN ZBNMY.
15. Fedorova N. V., Moskovtseva V. S., Amelina M. A., Demianov A. I. Opredeleniye dinamicheskikh usilii v slozhnonapryazhennykh elementakh zhelezobetonnykh ram pri osobom vozdeistvii [Determination of dynamic forces in complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact]. *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2023, no. 2 (770), pp. 5–15. DOI 10.32683.0536-1052-2023-770-2-5-15. EDN CPRLCG.
16. Nguyen Van Hung, Tan Van Hung. Progressive Collapse Behaviour of Earthquake-Damaged Interior Precast Concrete Joints with Headed Bars and Plastic Hinge Relocation. *Engineering Structures*. 2024, vol. 306. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029624003791?via3Dihub> (accessed: 14.05.2025).
17. Hamid Mirzahosseini, S. Mohammad Mirhosseini, Ehsanollah Zeighami. Progressive Collapse Assessment of Reinforced Concrete (RC) Buildings with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC). *Structures*. 2023, vol. 49, pp. 139–151. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012423001157?via3Dihub> (accessed: 14.05.2025).
18. Haoran Wang, Shuang Li, Changhai Zhai, Sidi Shan. Progressive Collapse Resistance of SelfCentering Infilled Precast Concrete Frame under Side Column Removal Scenario *Engineering Structures*. 2024, vol. 301. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623016668?via3Dihub> (accessed: 14.05.2025).



19. Kolchunov V. I., Fedorova N. V., Savin S. Yu. Dinamicheskie effekti v staticheski neopredelimiakh fizicheski i konstruktivno nelineinikh sistemakh [Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear structural systems]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil engineering]. 2022, no. 9, pp. 42–51. DOI 10.33622.0869-7019.2022.09.42-51. EDN OTJLOQ.
20. Kolchunov V. I., Tur V. V. Napravleniya proektirovaniya konstruktivnykh sistem v osobikh raschetnykh situatsiyakh [Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2023, no. 7, pp. 5–15. DOI 10.33622.0869-7019.2023.07.05-15.
21. Fedorova N. V., Medyankin M. D., Bushova O. B. Eksperimentalnoe opredelenie parametrov statiko-dinami-cheskogo deformatsionnogo betona pri rezhimnom nagruzhении [Static-dynamic strength of concrete, ultimate deformations, experimental studies, method, static-dynamic loading]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2020, no. 3, pp. 72–81.
22. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical Analysis of the Buried Fiber Concrete Slabs Dynamics under Blast Loads Magazine of Civil Engineering. 2023, no. 1 (117), pp. 11703. DOI 10.34910/MCE.117.3. EDN FAWTHP.
23. Kaidas P. A., Meliksetyan S. R., Korenkova O. O. Otsenka prochnosti monolitnykh i sborno-monolitnykh zhelezobetonnykh balok s ispolzovaniem diagrammnykh metodov rascheta [Strength assessment of monolithic and prefabricated monolithic reinforced concrete beams using diagrammatic calculation methods] *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea]. 2025, no. 1 (51), pp. 36–40. DOI 10.52684.2312-3702-2025-51-1-36-40.
24. Meliksetyan S. R., Kaidas P. A., Korenkova O. O. Prochnost i deformativnost izgibaemikh monolitnykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskikh avariynnykh vozdeystviyakh [Strength and deformability of bending monolithic reinforced concrete elements under dynamic emergency effects]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea]. 2025, no. 2(52), pp. 11–16. DOI 10.52684.2312-3702-2025-52-2-11-16. EDN SSFCNE.

© П. А. Кореньков, С. Е. Хохлунов

Ссылка для цитирования:

Кореньков П. А., Хохлунов С. Е. Силовое сопротивление и динамические характеристики рамных железобетонных конструкций при хрупком и пластическом разрушении // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 13–20.

УДК 624.042.8

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-20-26

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ В ТОРГОВЫХ ЦЕНТРАХ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

К. О. Чичиров, В. А. Гарькина, Т. Ю. Мамелина

Чичиров Константин Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация; e-mail: olegovich.79@mail.ru;

Гарькина Валерия Александровна, магистрант, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация; e-mail: valeriya-va@inbox.ru;

Мамелина Татьяна Юрьевна, кандидат биологических наук, заведующий кафедрой «Защита в чрезвычайных ситуациях», Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Пенза, Российская Федерация; e-mail: tmamelina@yandex.ru

Предлагается методология оценки технического состояния вентиляционных систем в торговых центрах с использованием прогностических моделей. Сформулирован комплексный подход к диагностике оборудования, опирающийся на анализ эксплуатационных характеристик и математическое моделирование процессов деградации элементов систем. Разработана модель прогнозирования остаточного ресурса вентиляционных установок, учитывающая совокупное влияние факторов износа, режимов эксплуатации и параметров окружающей среды. Приведен практический пример расчета показателей технического состояния вентиляционной системы крупного торгового центра. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации регламентов технического обслуживания и повышения энергоэффективности систем обеспечения микроклимата коммерческих объектов.

Ключевые слова: вентиляция торговых центров, техническое состояние, прогнозирование отказов, остаточный ресурс, диагностика оборудования, математическое моделирование, эксплуатационная надежность, энергоэффективность, техническое обслуживание, системы жизнеобеспечения.

**ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF VENTILATION SYSTEMS
IN SHOPPING CENTERS BASED ON THE FORECASTING METHOD**

K. O. Chichirov, V. A. Garkina, T. Yu. Mamelina

Chichirov Konstantin Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russian Federation; e-mail: olegovich.79@mail.ru;

Garkina Valeriya Aleksandrovna, undergraduate student, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russian Federation; e-mail: valeriya-va@inbox.ru;