

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071

Вероятностный критерий оценки живучести железобетонных рам при локализации разрушения

Ашот Георгиевич Тамразян, Анатолий Викторович Алексейцев,
Елена Сергеевна Мишина

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема обеспечения механической безопасности зданий и сооружений при аварийных воздействиях силового и средового характера сопряжена с необходимостью оценки их живучести. Свойство живучести объектов проявляется после наступления аварийной ситуации и тесно связано с процессом оценки устойчивости конструктивной системы к прогрессирующему разрушению. В настоящее время существуют предложения по оценке живучести в концептуальном виде и в виде общих аналитических выражений, требующих адаптации к конкретной конструктивной системе. Предлагаются методика и пример одного из вероятностных показателей расчета живучести.

Материалы и методы. Вероятностный показатель вычисляется на основе классической теории надежности с модификацией формулы для индекса надежности, в которую входят значения случайных величин изгибающих моментов, воспринимаемых сечением, и моментов, вызванных внешней нагрузкой. Показатель вычисляется для схемы разрушения, не предполагающей образование вантового механизма, т.е. прогрессирующее разрушение локализуется путем образования нескольких пластических шарниров с учетом работы бетона в предельном состоянии. Для моделирования случайных величин используется метод статистических испытаний с учетом экспериментальных данных о разбросах нагрузок и механических характеристик материалов.

Результаты. Рассмотрен пример двух сценариев аварийных воздействий на монолитную раму многоэтажного здания, превентивно спроектированную с учетом возможности восприятия аварийных воздействий. Смоделированы разбросы предельных изгибающих моментов, вычислены характеристики надежности элементов, вероятности безотказной работы системы с учетом локализации прогрессирующего разрушения, вероятностный показатель живучести для каждой аварийной ситуации.

Выводы. Предложена методика количественной оценки живучести на основе вероятностного показателя, учитывающего возможность безотказной работы части конструктивных элементов системы и отказа отдельных элементов в зоне локализации аварийного воздействия. Показана работоспособность предлагаемой методики на конкретных примерах, что позволит оценивать живучесть как проектируемых, так и восстанавливаемых конструктивных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механическая безопасность, живучесть, локальные повреждения, аварийная ситуация, прогрессирующее разрушение, деформации, надежность, вероятность отказа

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Алексейцев А.В., Мишина Е.С. Вероятностный критерий оценки живучести железобетонных рам при локализации разрушения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1061–1071. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Викторович Алексейцев, aalexw@mail.ru.

Probabilistic criterion for assessing the robustness of reinforced concrete frames during fracture localization

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev, Elena S. Mishina

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of ensuring mechanical safety of buildings and structures under emergency impacts of force and environmental character is associated with the need to assess their robustness. The property of robustness of objects is manifested after the onset of an emergency situation and is closely related to the process of assessing the stability of a structural system to progressive collapse. Currently, there are proposals for robustness assessment in conceptual form and in the form of general analytical expressions that require adaptation to a specific structural system. This paper proposes a methodology and an example of the probabilistic indices of robustness calculation.

Materials and methods. The probabilistic index is calculated on the basis of the classical reliability theory with modification of the formula for the reliability index, which includes the values of random values of bending moments perceived by the section and moments caused by external load. The index is calculated for a failure pattern that does not involve the formation of a cable-stayed mechanism, i.e. the progressive failure is localized by the formation of several plastic hinges, taking into

account the operation of the concrete in the limit state. A statistical test method is used to model random variables, considering experimental data on load variation and mechanical characteristics of materials.

Results. An example of two scenarios of accidental impacts on the monolithic frame of a multistory building, preventively designed with consideration of the possibility to taking accidental impacts, is considered. The scattering of ultimate bending moments is simulated, the reliability characteristics of elements, the probabilities of failure-free operation of the system with account of localization of progressive failure are calculated, the probabilistic survivability index for each emergency situation is calculated.

Conclusions. The methodology of quantitative assessment of survivability on the basis of probabilistic index, which includes the possibility of failure-free operation of a part of structural elements of the system and failure of individual elements in the zone of localization of emergency impact, is proposed. The operability of the proposed methodology on specific examples is shown, which will allow to estimate the robustness of both designed and reconstructed structural systems.

KEYWORDS: mechanical safety, robustness, localized damage, emergency situation, progressive collapse, deformations, reliability, failure probability

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V., Mishina E.S. Probabilistic criterion for assessing the robustness of reinforced concrete frames during fracture localization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1061-1071. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071(rus.).

Corresponding author: Anatoly V. Alekseytsev, aalexw@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные социально-экономические условия предполагают проектирование новых зданий и сооружений с повышенными требованиями к механической безопасности. Кроме этого, имеется объективная необходимость оценки степени этой безопасности для существующих объектов. Одним из свойств конструктивных систем, в значительной мере определяющих уровень стойкости зданий и сооружений к прогрессирующему разрушению, является живучесть при запроектных воздействиях [1–4]. При этом ряд исследователей для оценки живучести использует один интегральный или несколько частных детерминированных показателей.

Есть концепции, в которых оценка живучести представляется вероятностными показателями, а свойство живучести трактуется как комплексная характеристика [1, 5, 6]. Тем не менее как понятие «живучесть» в современной научной литературе имеет около десятка различных определений, так как критерии ее оценки до сих пор считаются недостаточно изученными. В зарубежной литературе это свойство получило термин *robustness* и также активно изучается, в частности, на примерах различных типов конструкций в рамках численных [7–10] и экспериментальных [11–13] исследований. Активно исследуются разные аспекты, связанные с обеспечением живучести, при этом актуальным становится мера ее количественной оценки [14] как на детерминированной, так и на вероятностной основе. Так, в публикации [15] рассматривается методика оценки живучести в условиях неопределенности сценариев прогрессирующего разрушения. В статье [16] изучается влияние коррозии как среднего воздействия на свойство живучести конструктивной системы. Ряд работ посвящен изучению вопросов расчета конструкций при прогрессирующем разрушении, что также влияет на достоверность оценки их живучести при наступлении аварийной ситуации, это и критерии предельного состояния [17], и наличие начальных локальных повреждений

в конструктивной системе [18], и в целом подходы к формированию алгоритмов расчета с учетом специфики переходного динамического процесса и различного типа нелинейностей [19]. В отдельных трудах живучесть конструктивной системы входит в более широкие концептуальные подходы, связанные с рассмотрением не только конкретной аварийной ситуации, но и с обеспечением механической безопасности конструкции на всех этапах жизненного цикла [20]. Такая специфика подходов требует классификации различных типов зданий и сооружений по возможности защиты от прогрессирующего разрушения, что, например, для промышленных зданий выполнено в работе [21].

В настоящем исследовании на основе концептуальных предложений [1, 3] вводится вероятностный показатель оценки живучести конструктивной системы, основанный на критериях образования пластического шарнира для схем обрушения, в которых не образуется вантовый механизм. Такие схемы характерны для частичного исключения из работы ригелей или стоек рамных каркасов зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи

Требуется разработать количественный показатель оценки живучести рамной конструктивной схемы из монолитного железобетона. Качественная трактовка живучести состоит в обеспечении локализации прогрессирующего разрушения. Такой локализации можно добиться при обеспечении следующих условий.

1. Для безвантовых схем разрушения (рис. 1, *a*) — образование пластического шарнира в опасном сечении (табл. 1).

2. Для вантовых схем разрушения (рис. 1, *b*) — условие неразрывности арматуры вантового механизма и достаточность ее анкеровки, применяемое к ригелям. Для колонн может использоваться условие из табл. 1.

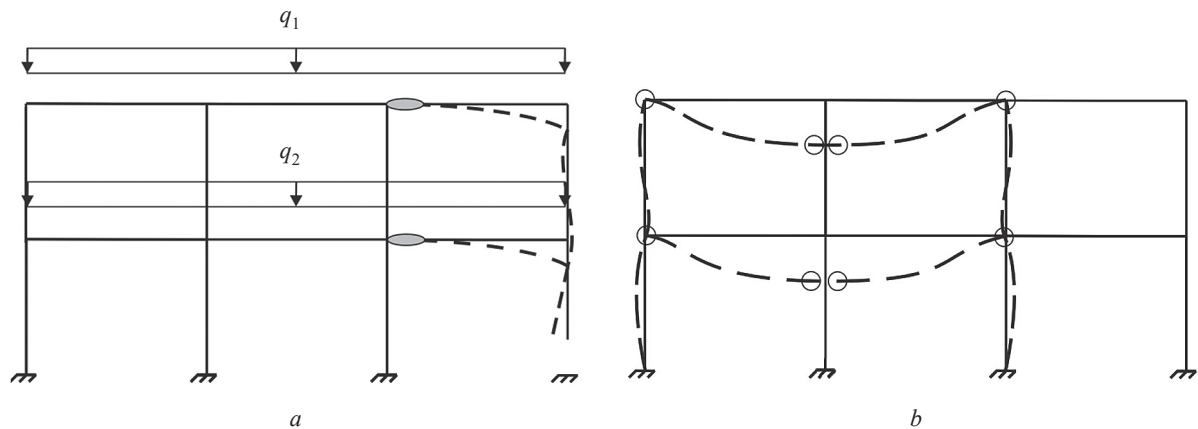


Рис. 1. Возможные схемы разрушения: безвантовая (а); вантовая (b) (серым цветом затушевана область образования пластического шарнира)

Fig. 1. Possible failure patterns: cable-less (a); cable-stayed (b) (the area of plastic hinge formation is shaded in grey)

Табл. 1. Условия расчета по прочности прямоугольных сечений железобетонных элементов

Table 1. Conditions for calculating the strength of rectangular sections of reinforced concrete elements

Ригели Beams	Колонны Columns
$M < M_{ult}$	$Ne < M_{ult}; N < N_{ult}$
где M — изгибающий момент в результате аварийного воздействия; M_{ult} — предельный момент, воспринимаемый сечением при контроле деформаций ε , не превышающих деформаций разрыва ε_u ; $\varepsilon < 0,9\varepsilon_u$ where M — bending moment as a result of accidental impact; M_{ult} — ultimate moment perceived by the section at control deformations ε , not exceeding rupture deformations ε_u ; $\varepsilon < 0,9\varepsilon_u$	где e — эксцентриситет продольной силы, вычисляемый с учетом начальных геометрических несовершенств и действующего в сечении изгибающего момента; $M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$ в соответствии с п. 8.1.14 СП 63.13330.2018; N, N_{ult} — действующее в сечении и предельное значение силы, воспринимаемое сечением соответственно where e — eccentricity of the longitudinal force, calculated taking into account the initial geometrical imperfections and the bending moment acting in the section; $M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$ in accordance with clause 8.1.14 of CP 63.13330.2018; N, N_{ult} — acting in the section and the limit value of the force perceived by the section, accordingly

Вероятностные характеристики, используемые для количественной оценки живучести

В качестве расчета параметров, используемых для оценки показателя живучести, будем использовать известные выражения для индекса надежности и вероятности отказа [19, 20].

Для ригеля при безвантовой схеме разрушения применяем зависимость, определяющую индекс надежности β_R :

$$\beta_R = \frac{|M_{ult}| - |M_{max}|}{\sqrt{S(M_{ult})^2 + S(M_{max})^2}}, \tag{1}$$

где M_{ult}, M_{max} — предельные изгибающие моменты в одном сечении, соответственно воспринимаемые железобетоном, и максимальные от аварийного воздействия; $S(M_{ult}), S(M_{max})$ — соответствующие среднеквадратические стандарты случайных величин моментов.

Для колонн, догружаемых в результате аварийного воздействия:

$$\beta_C = \frac{(|N_{ult}| - |N_{max}|) \cdot e}{\sqrt{S(eN_{ult})^2 + S(eN_{max})^2}}, \tag{2}$$

где N_{ult}, N_{max} — предельное усилие в колонне, воспринимаемое сечением, и усилие, создаваемое внешним воздействием соответственно; e — эксцентриситет продольной силы из статического расчета; $S(eN_{ult}), S(eN_{max})$ — среднеквадратические стандарты соответствующих случайных величин.

Следует отметить, что выражение (2) можно использовать для случая сжатия колонн. Если в результате догружения возникает растяжение, то величина N_{ult} должна определяться по методике расчета растянутых элементов. Величины стандартов при отсутствии экспериментальных данных могут быть найдены с помощью метода статистических испытаний, при котором соответствующие случай-

ные величины генерируются по нормальному распределению.

Для ригелей, работающих в условиях вантовой схемы разрушения, условия неразрушимости и обеспечения анкеровки вантового механизма, выраженные через индексы надежности, можно представить в виде:

$$\beta_{RV1} = \frac{|\varepsilon_u| - |\varepsilon_{\max}|}{\sqrt{S(\varepsilon_u)^2 + S(\varepsilon_{\max})^2}}, \quad (3)$$

$$\beta_{RV2} = \frac{l_{an} - l_{an}^{ef}}{\sqrt{S(l_{an})^2 + S(l_{an}^{ef})^2}}, \quad (4)$$

где ε_u , $\varepsilon_{\max}$ — деформации растяжения в арматуре, соответствующие ее временному сопротивлению и фактически наблюдаемые при аварийном воздействии; l_{an} , l_{an}^{ef} — расчетная и фактическая длина анкеровки арматуры вантового механизма; $S(\varepsilon_u)$, $S(\varepsilon_{\max})$, $S(l_{an})$, $S(l_{an}^{ef})$ — среднеквадратические стандарты случайных величин относительных деформаций.

Вероятностный показатель живучести

Предложения по систематизации детерминированных и вероятностных показателей живучести, а также их типы приведены в работе [4]. В развитие этих исследований для оценки живучести рамных железобетонных систем введем показатель живучести W_R :

$$W_R = P_{no}(1 - P_{dam}), \quad (5)$$

где P_{no} — вероятность безотказной работы рамной системы при нормальной эксплуатации. При традиционном проектировании эта величина составляет $P_{no} = 0,98 - 1$, при оптимальном проектировании без учета аварий $P_{no} = 0,95 - 1$; P_{dam} — вероятность отказа конструктивной системы при аварийном воздействии. В случае «идеальной» (абсолютной) живучести $W_R = 1$, при этом $P_{no} = 1$, $P_{dam} = 0$.

При наличии в системе m конструктивных элементов $m = m_R + m_c$ (m_R — число ригелей; m_c — число колонн) в расчетных случаях, соответствующих зависимостям (1) и (2), безвантовая схема — показатель живучести W_R может быть вычислен так:

$$W_R = \prod_{i=1}^{m_R} (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})) \prod_{j=1}^{m_c} (P_{no,j} (1 - P_{dam,j})), \quad (6)$$

где $P_{no,i}$, $P_{no,j}$ — вероятности безотказной работы элемента (ригеля или колонны) рамы при нормальной эксплуатации; $P_{dam,i}$ — вероятность отказа колонны i при наступлении аварийной ситуации; $P_{dam,j}$ — вероятность отказа ригеля j при наступлении аварийной ситуации. Величины вероятностей отказа могут быть определены по общей формуле:

$$P_{dam,i} = 1 - (0,5 + \Phi(\beta_i)), \quad (7)$$

где $\Phi(\beta_i)$ — значение интеграла Лапласа, соответствующее индексу надежности β_i конструктивного

элемента. Поскольку наибольшая вероятность отказа $P_{dam}^{\max} = 0,5$, то живучесть системы считается необеспеченной, если в общем случае выполняется условие:

$$\left(\prod_{i=1}^{m_R} () \right) \vee \left(\prod_{j=1}^{m_c} () \right) = [0,45 \pm 0,5]. \quad (8)$$

В частном случае при безотказной работе всех колонн и отказе ригелей (или наоборот) система считается живучей при $W_R > 0,55$.

Следует отметить, что при различных аварийных ситуациях необходимо учитывать последовательную или параллельную схему последовательных отказов элементов. Так, например, вероятность отказа для системы из трех последовательно отказывающих ригелей определится как сумма вероятностей их отказа $P_{dam} = P_{dam1} + P_{dam1} \cdot P_{dam2} + P_{dam1} \cdot P_{dam2} \cdot P_{dam3}$, где каждое слагаемое оценивает вероятность отказа ригеля с учетом возможности последовательных отказов ригелей, связанных с прогрессирующим разрушением первого ригеля.

В случае реализации вантового механизма вероятность отказа i -го ригеля будет определяться с учетом выражений (3), (4) в виде:

$$P_{dam,i} = [1 - (0,5 + \Phi(\beta_{RV1,i}))][1 - (0,5 + \Phi(\beta_{RV2,i}))]. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем пример оценки живучести рамы при безвантовой схеме разрушения. Рассмотрим конструкцию железобетонной рамы, схема которой показана на рис. 2. Крестиками обозначены возможные сценарии аварийной ситуации с последующей локализацией разрушения по безвантовой схеме. Рама проектировалась на действующие эксплуатационные нагрузки (собственный вес, ветер, снег и полезная нагрузка 150 кН/м^2 при шаге рам 6 м).

При проектировании предусматривался запас прочности, который будет использован при возникновении аварийной ситуации. Принят бетон класса прочности на сжатие В30, расстояния от центра тяжести арматуры до верхнего бетонного волокна для всех конструктивных элементов — 25 мм . Рабочая продольная арматура принята класса прочности А400, поперечная — А240. Характеристики армирования колонн и ригелей представлены на рис. 3.

Среднеквадратические стандарты случайных величин нагрузок и характеристик бетона и арматуры определим методом статистических испытаний. Считаем, что разброс значений предельной нагрузки и механических характеристик бетона и арматуры имеет один и тот же порядок. Поэтому при определении $S(M_{ult})^2$, $S(M)^2$ сгенерируем опорную выборку ω чисел от нуля до единицы, основываясь на экспериментальных значениях коэффициента вариации бетона и стальной арматуры, а также разброса нагрузок, приведенного в работе [20] (табл. 2). Визуализация

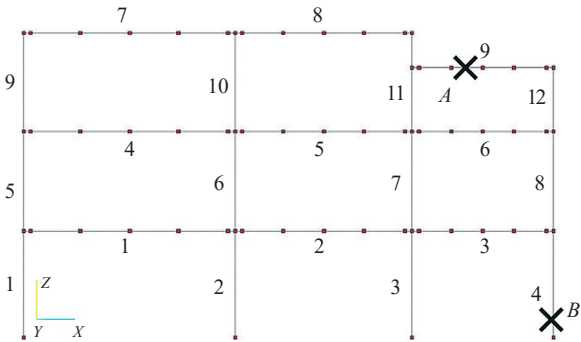


Рис. 2. Расчетная схема рамы: 1–12 — номера колонн; 1–9 — номера ригелей (слева направо по этажам)

Fig. 2. Calculation scheme of the frame: 1–12 — column numbers; 1–9 — beam numbers (from left to right by floors)

этих данных представлена на рис. 2. В дальнейшем, используя значения выборки ω , будем получать варианты M_{ult} и M на основе выражений $M_{ult,i} = \omega_i \bar{M}_{ult}$, $M_i = \omega_i M$, где $\bar{M}_{ult}, \bar{M}$ — математические ожидания этих величин, принимаемые, в частности, равными значениям расчетного предельного момента для сечения и момента, вызванного внешней нагрузкой. Синтетические данные для разброса расчетного сопротивления арматурной стали и полученные значения выборочной совокупности для M_{ult} показаны на рис. 4.

Для вычисления вероятностного показателя живучести системы по формуле (5) выполняем ряд следующих этапов:

- вычисление вероятности безотказной работы системы при ее нормальной эксплуатации, которая

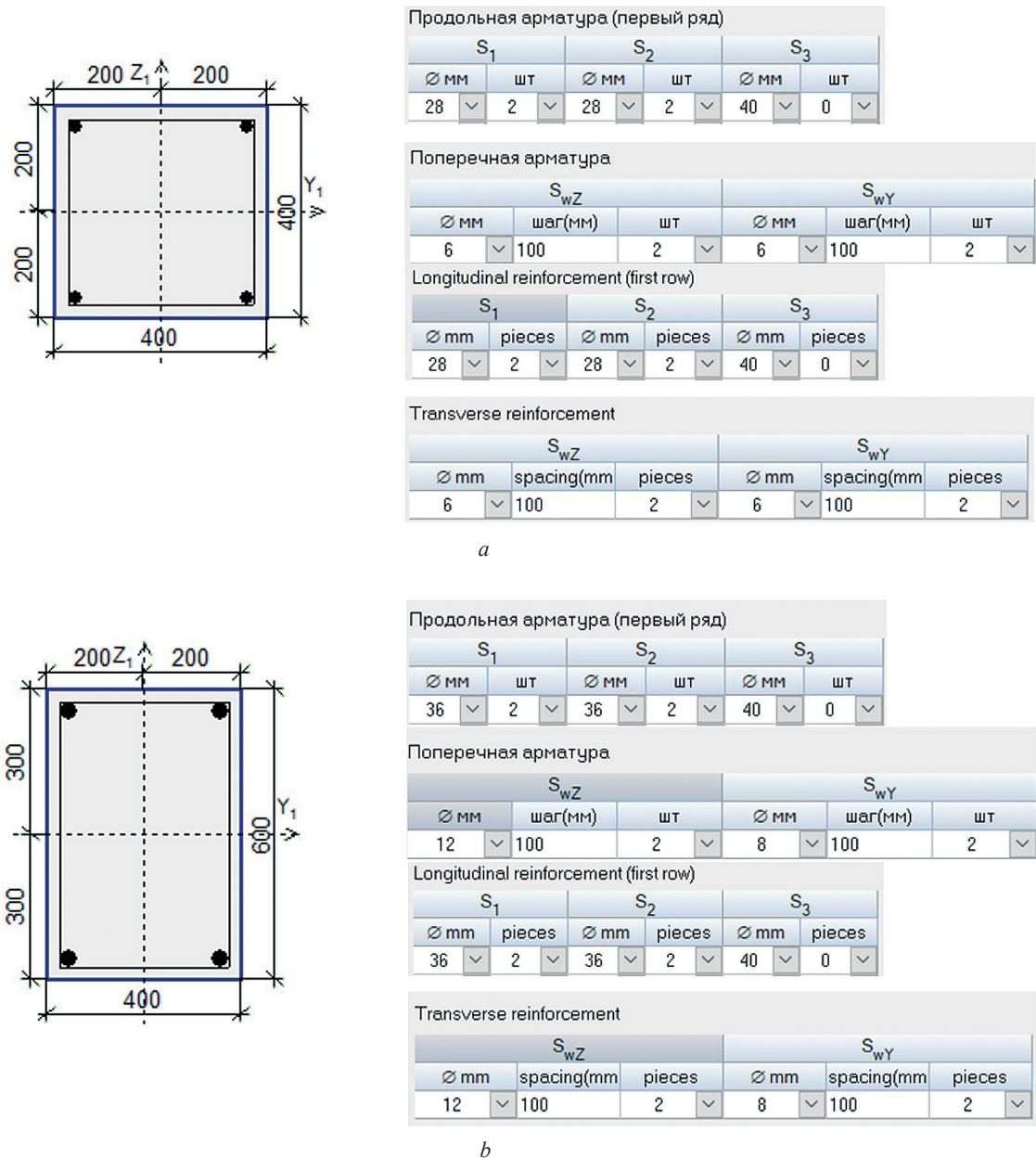


Рис. 3. Проектные параметры сечений колонн (a) и ригелей (b)
Fig. 3. Design parameters of column sections (a) and beams sections (b)

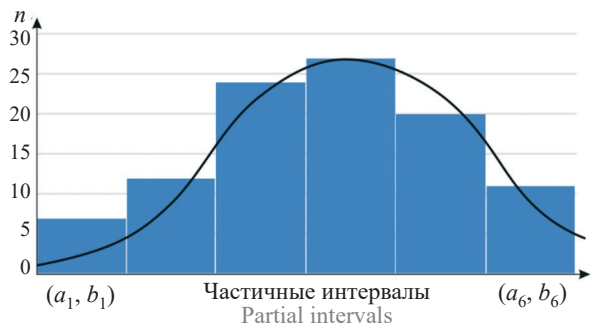


Рис. 4. Визуализация данных сгенерированной выборочной совокупности ω в виде гистограммы $(a_1, b_1) - (a_6, b_6)$ — интервалы с не менее чем шести вариантами наблюдаемой случайной величины

Fig. 4. Visualization of the generated specimen data set of in the form of ω a histogram $(a_1, b_1) - (a_6, b_6)$ — intervals with at least 6 variants of the observed random variable

составляет произведение соответствующих вероятностей для элементов и при традиционном проектировании близко к единице; вычисления показали, что в рассматриваемой системе ригели имеют

$$\prod_{i=1}^9 P_{no,i} \approx 1, \text{ как и колонны } \prod_{j=1}^{12} P_{no,j} \approx 1;$$

Табл. 2. Выборочная совокупность из 100 значений для определения среднеквадратических стандартов для предельных усилий
Table 2. Specimen set of 100 values for determining root mean square standards for ultimate forces

ω_{1-10}	ω_{11-20}	ω_{21-30}	ω_{31-40}	ω_{41-50}	ω_{51-60}	ω_{61-70}	ω_{71-80}	ω_{81-90}	ω_{91-100}
0,980	0,112	0,733	0,266	0,212	0,140	0,740	0,847	0,233	0,368
0,070	0,370	0,017	0,540	0,028	0,757	0,336	0,611	0,812	0,355
0,115	0,209	0,591	0,708	0,896	0,438	0,885	0,981	0,961	0,189
0,069	0,896	0,250	0,715	0,926	0,567	0,458	0,187	0,917	0,904
0,938	0,463	0,396	0,623	0,753	0,674	0,010	0,701	0,093	0,989
0,329	0,969	0,398	0,627	0,914	0,486	0,471	0,836	0,759	0,500
0,079	0,127	0,843	0,105	0,245	0,025	0,742	0,050	0,565	0,629
0,810	0,441	0,831	0,752	0,327	0,022	0,293	0,574	0,419	0,003
0,196	0,935	0,960	0,149	0,981	0,667	0,525	0,066	0,297	0,016
0,958	0,166	0,248	0,937	0,705	0,453	0,368	0,052	0,431	0,761

Табл. 3. К вычислению величины P_{dam} (сценарий А)
Table 3. To the calculation of the value P_{dam} (scenario А)

Номер ригеля Number of the beams	M/M_{ulr} опора Support	M/M_{ulr} пролет Span	β_R	$\Phi(\beta_b)$	$P_{dam,i}$
1	144,9/227,3	113,5/227,3	2,33	0,4898	$1,02 \cdot 10^{-2}$
2	112,68/227,3	57,01/227,3	3,24	0,49931	$6,9 \cdot 10^{-4}$
3	52,58/227,3	35,91/227,3	4,94	0,49999	$1 \cdot 10^{-5}$
4	131,83/227,3	113,4/227,3	2,7	0,4965	$3,5 \cdot 10^{-3}$
5	151,58/227,3	33,85/227,3	2,14	0,4838	$1,62 \cdot 10^{-2}$
6	138,93/227,3	214,19/227,3	0,37	0,1443	0,3557
7	159,57/227,3	126,63/227,3	1,91	0,4719	$2,81 \cdot 10^{-2}$
8	120,67/227,3	76,04/227,3	3,01	0,49865	$1,35 \cdot 10^{-3}$
9	108,79/227,3	>1	0	0	0,5

- вычисление вероятности безотказной работы ригелей и колонн при реализации исключения одной из колонн (для элементов рамы в этом случае реализуется параллельная схема отказов);
- вычисление вероятности безотказной работы ригелей при реализации исключения одного из ригелей и сохранности колонн (для ригелей рамы в этом случае реализуется последовательная схема отказов).

Рассмотрим аварийную ситуацию А. В этом случае вероятность отказа колонн близка к нулю вследствие предусмотренного запаса прочности, а для ригелей проведен следующий расчет. Для ригеля 9 (см. рис. 2) выполнено удаление элемента в пролете, что имитирует его выход из работы. В результате аварийная нагрузка на покрытие 150 кН/м частично воспринимается нижележащим ригелем с коэффициентом динамики 2,0. При этом условия анкеровки предполагают образование вантового механизма и локализацию прогрессирующего разрушения в этом ригеле. Тогда, следуя формуле (7), вычислим для ригелей рамной системы вероятности безотказной работы (табл. 3). Считаем, что для ригелей, которые не подвергаются действию аварийной

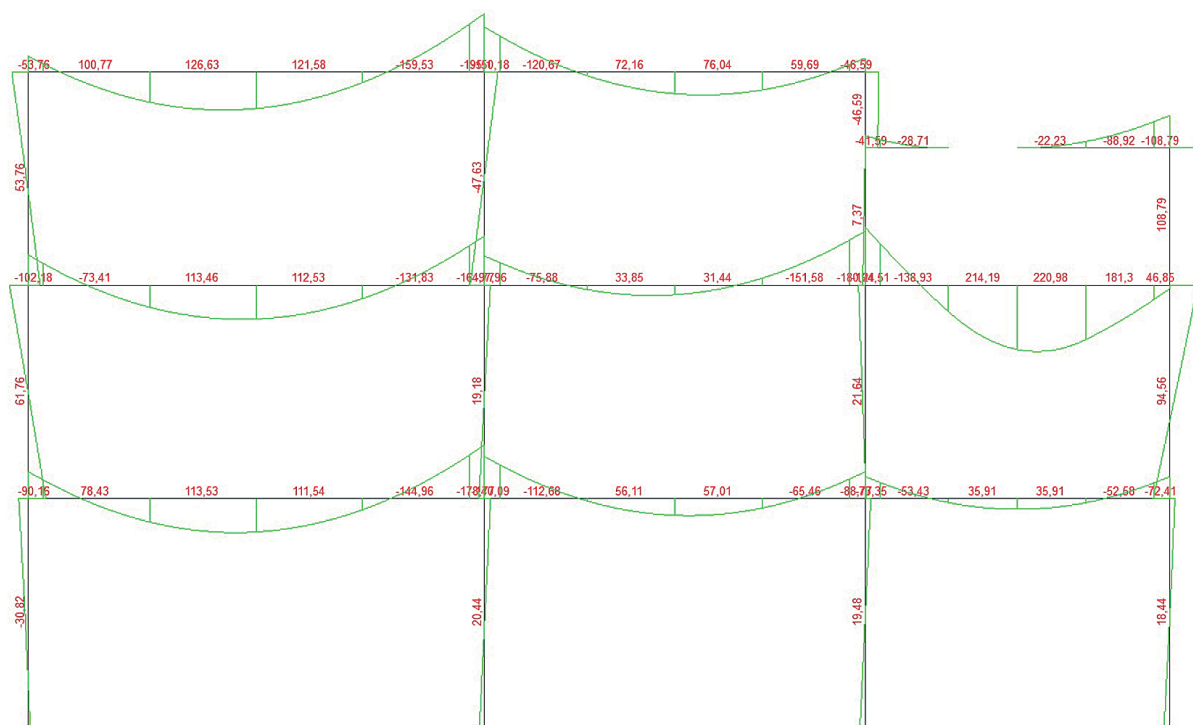


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов в раме при аварийной ситуации *A*

Fig. 5. Bending moment diagram in the frame in emergency situation *A*

ситуации, вероятность безотказной работы равна 0,999999. Предельные значения усилий для ригелей и колонн в соответствии с рис. 3: $N_{ult,c} = 3300$ кН, $M_{ult,b}^{span} = M_{ult,b}^{sup} = 227,3$ кНм. В данной аварийной ситуации значения продольных сил в колонне уве-

личились не более чем на 5 %, поэтому в расчетах их не рассматриваем, считая вероятность их безотказной работы также близкой к единице.

Данные в табл. 3 по фактическим средним значениям M получены из рис. 5.

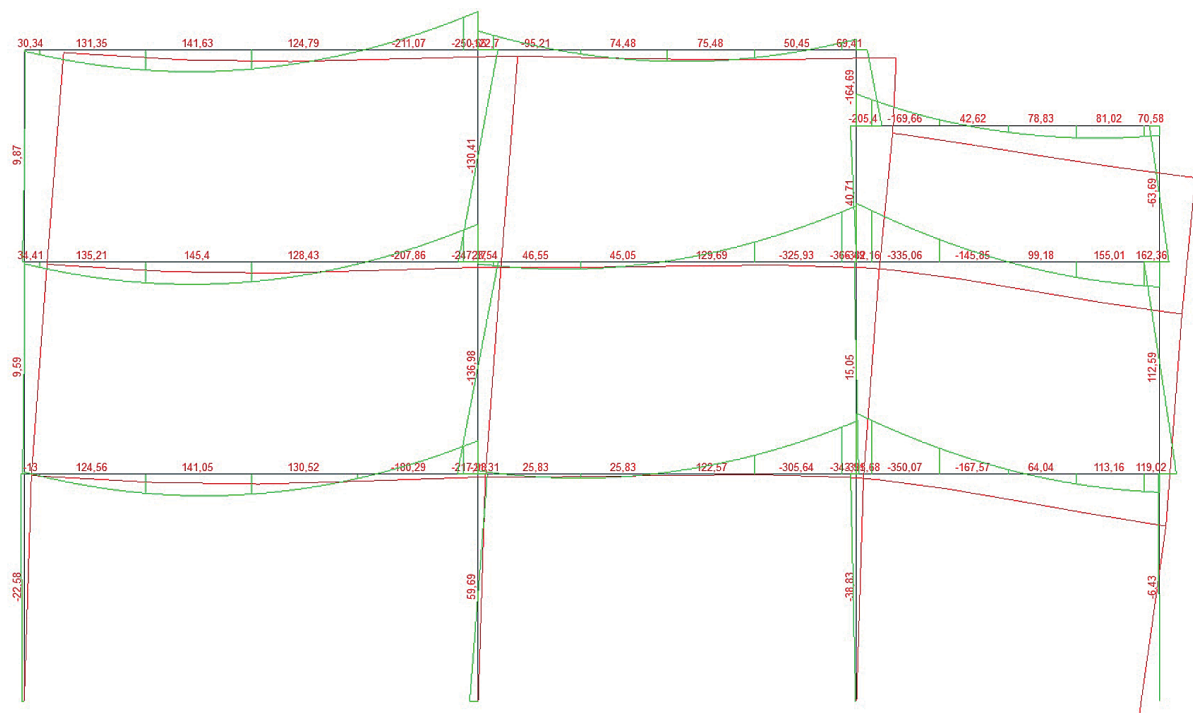


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов в раме при аварийной ситуации *B*

Fig. 6. Bending moment diagram in the frame in emergency situation *B*

Табл. 4. К вычислению величины P_{dam} (сценарий В)
Table 4. To the calculation of the value P_{dam} (scenario B)

Номер ригеля Number of the beams	M/M_{ult} , опора Support	M/M_{ult} , пролет Span	β_R	$\Phi(\beta_b)$	$P_{dam,i}$
1	217/227,3	141/227,3	0,28	0,1103	0,3897
2	305/227,3	122/227,3	0	0	0,5
3	350/227,3	64/227,3	0	0	0,5
4	207/227,3	145/227,3	0,56	0,2123	0,2877
5	325/227,3	129/227,3	0	0	0,5
6	335/227,3	99/227,3	0	0	0,5
7	211/227,3	141/227,3	0,45	0,1736	0,3264
8	95/227,3	75/227,3	3,7	0,4998	$2 \cdot 10^{-4}$
9	169/227,3	78/227,3	1,64	0,4495	$5,05 \cdot 10^{-2}$

Формула (6) с учетом безотказной работы колонн для этого сценария принимает вид:

$$W_R = \prod_{i=1}^{m_R-1} (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})),$$

используя данные табл. 3 получим: $W_R \approx 1 \cdot (1 - (0,3557 + 0,3557 \cdot 10^{-5})) \approx 0,6443$, условие (8) удовлетворено, система обладает живучестью.

Рассмотрим аварийную ситуацию В (рис. 2). Аварийную ситуацию моделируем в виде статической просадки основания под крайней колонной, т.е. динамический эффект не учитываем. Анализ деформирования рамы при такой аварийной ситуации показывает, что элементы могут отказывать по параллельной схеме, следовательно, для ригелей находим величину вероятности отказа произведением вероятностей отказа элементов. Пользуясь рис. 6, заполняем табл. 4. В данной аварийной ситуации колонна также получает динамическое догружение, поэтому живучесть проверяем по условию (8).

Находим для ригелей:

$$\prod_{i=1}^9 (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})) = (1 \cdot (1 - 0,3897) \cdot (1 - 0,5)^4 \cdot 1 \times \\ \times (1 - 0,2877) \cdot 1 \cdot (1 - 0,3264) \cdot 1 \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-4}) \cdot 1 \times \\ \times (1 - 5,05 \cdot 10^{-2}) \approx 0,017.$$

Условие (8) не выполняется, в проверке вероятности отказа колонн нет необходимости, аварийная ситуация В демонстрирует явную нецелесообразность обеспечения живучести по безвантовой схеме путем увеличения сечения или армирования.

Перспективы выполненной работы состоят в развитии теоретических положений на дру-

гие типы каркасов зданий, в том числе высотных и уникальных, при этом целесообразно рассматривать не только этап проектирования конструкций с целью предотвращения возможных аварий, но и период нормальной эксплуатации конструктивной системы, в котором могут накапливаться повреждения как от силовых воздействий (перегрузки, перепланировки и т. п.), так и от средовых воздействий, например от коррозионных повреждений. В качестве аварийных ситуаций можно рассматривать помимо исключения колонн действие стандартного пожара и различные сценарии коррозионных повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика количественной оценки живучести на основе вероятностного показателя, учитывающего возможность безотказной работы части конструктивных элементов системы и отказа отдельных элементов в зоне локализации аварийного воздействия.

На примере безвантовой схемы локализации аварийного воздействия на монолитную раму показана работоспособность предлагаемой методики, что позволит оценивать живучесть как проектируемых, так и восстанавливаемых конструктивных систем.

С помощью предлагаемой методики вероятностной оценки доказана нецелесообразность обеспечения живучести путем увеличения сечения конструктивных элементов, что согласуется с исследованиями аналогичной аварийной ситуации другими авторами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX.
2. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений : аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWN.
3. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 22–28. DOI: 10.33622/0869-3019.2023.07.22-28. EDN DTAOGR.
4. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4 (80). Pp. 73–80. DOI: 10.18720/MCE.80.7EDNXYLDTF.
5. Lan X., Li Z., Fu F., Qian K. Robustness of steel braced frame to resist disproportionate collapse caused by corner column removal // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 69. P. 106226. DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.106226
6. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Амелина М.А. Вероятностная модель отказа железобетонной рамы при потере устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 10. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.04-11. EDN KYFSCZ.
7. Qu T., Zeng B., Zhou Z., Huang L., Chang D. Dynamic and uncertainty-based assessment of the progressive collapse probability of prestressed concrete frame structures with infill walls // Structures. 2024. Vol. 61. P. 106105. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106105
8. Ding L., Chen J., Caspeele R. Determination of dynamic collapse limit states using the energy-based method for multi-story RC frames subjected to column removal scenarios // Engineering Structures. 2024. Vol. 311. P. 118170. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118170
9. 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. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
10. Wang S., Cheng X., Li Y., Yang X., Zhang H., Guo R. et al. Assessing progressive collapse regions of reinforced concrete frame structures using Graph Convolutional Networks // Engineering Structures. 2025. Vol. 322. P. 119076. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.119076
11. Husain M., Yu J., Osman B.H., Ji J. Progressive collapse resistance of post-tensioned concrete beam-column assemblies under a middle column removal scenario // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 34. P. 101945. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101945
12. Касимов Р.Г., Скворцова Е.О. Прогрессирующее разрушение и защита от него каменных зданий // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сб. ст. 2019. С. 809–816. EDN JWROEE.
13. Бессонов С.Н., Солодов Н.В. Живучесть пространственных решетчатых конструкций из труб типа «кислородск» при расчете на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 76–80. EDN PPBABI.
14. Qian K., Weng Yu.H., Fu F., Deng X.F. Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. P. 101636. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101636. EDN KMLTXW.
15. Praxedes C., Yuan X.-X. Robustness-oriented optimal design for reinforced concrete frames considering the large uncertainty of progressive collapse threats // Structural Safety. 2022. Vol. 94. P. 102139. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102139
16. Тамразян А.Г., Тягур Д.В. О влиянии коррозионного повреждения на конструктивные характеристики изгибаемых железобетонных элементов при определении живучести // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2023. С. 156–162. EDN UTPYXZ.
17. Кабанцев О.В., Митрович Б. К выбору характеристик предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 234–241. EDN TTXZYZ.
18. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Сопротивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1454–1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468. EDN KBUTDH.
19. Серник И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 49–51. EDN PFGIFZ.

20. Терехов И.А., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д. Обеспечение механической безопасности железобетонных несущих конструкций на всех этапах жизненного цикла // Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : сб. тез. докл. 2023. С. 48–50. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-48-50. EDN GGBZDR.

21. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Классификация сооружений промышленных предприятий по возможности защиты от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 1 (47). С. 15–20. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-15-20. EDN WPLTSL.

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 25 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 55975413900; tamrazian@mail.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Елена Сергеевна Мишина — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mishany96969@mail.ru.

Вклад авторов:

Тамразян А.Г. — концепция оценки живучести на основе вероятностного показателя.

Алексейцев А.В. — разработка методики оценки живучести на основе вероятностного показателя.

Мишина Е.С. — выполнение расчетов для различных аварийных ситуаций, получение и анализ результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to robustness assessment of building structures, buildings and facilities. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX. (rus.).
2. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A.I. Structural robustness : an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; 3(113):31-71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH. (rus.).
3. Tamrazyan A.G. Survivability as the degree of operability of structures in case of damage. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 7:22-28. DOI: 10.33622/0869-3019.2023.07.22-28. EDN DTAOGR. (rus.).
4. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 4(80):73-80. DOI: 10.18720/MCE.80.7. EDN XYLDTF.
5. Lan X., Li Z., Fu F., Qian K. Robustness of steel braced frame to resist disproportionate collapse caused by corner column removal. *Journal of Building Engineering*. 2023; 69:106226. DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.106226
6. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Amelina M.A. Probabilistic model of reinforced concrete frame failure in case of loss of stability. *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 10:4-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.04-11. EDN KYF-SCZ. (rus.).
7. Qu T., Zeng B., Zhou Z., Huang L., Chang D. Dynamic and uncertainty-based assessment of the progressive collapse probability of prestressed concrete frame structures with infill walls. *Structures*. 2024; 61:106105. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106105
8. Ding L., Chen J., Caspeele R. Determination of dynamic collapse limit states using the energy-based method for multi-story RC frames subjected to column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2024; 311:118170. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118170
9. 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
10. Wang S., Cheng X., Li Y., Yang X., Zhang H., Guo R. et al. Assessing progressive collapse regions

of reinforced concrete frame structures using Graph Convolutional Networks. *Engineering Structures*. 2025; 322:119076. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.119076

11. Husain M., Yu J., Osman B.H., Ji J. Progressive collapse resistance of post-tensioned concrete beam-column assemblies under a middle column removal scenario. *Journal of Building Engineering*. 2021; 34:101945. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101945

12. Kasimov R.G., Skvortsova E.O. Progressive destruction and protection of stone buildings. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction : collection of articles*. 2019; 809-816. EDN JWROEE. (rus.).

13. Bessonov S.N., Solodov N.V. Survivability of spatial lattice structures made of “Kislovodsk” type pipes when calculating for progressive (avalanche) collapse. *Science-intensive technologies and innovations (XXV scientific readings) : collection of reports of the International scientific and practical conference*. 2023; 76-80. EDN PPBABI. (rus.).

14. Qian K., Weng Yu.H., Fu F., Deng X.F. Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101636. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101636. EDN KMLTXW.

15. Praxedes C., Yuan X.-X. Robustness-oriented optimal design for reinforced concrete frames considering the large uncertainty of progressive collapse threats. *Structural Safety*. 2022; 94:102139. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102139

16. Tamrazyan A.G., Tyagur D.V. On the influence of corrosion damage on the structural characteristics of bending reinforced concrete elements when determining survivability. *Safety of the construction*

stock of Russia. Problems and solutions : proceedings of the International Academic Readings. 2023; 156-162. EDN UTPYXZ. (rus.).

17. Kabancev O.V., Mitrovic B. For the selection of characteristics of limit states of monolithic reinforced concrete systems for the mode of progressive drop. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2018; 6(378):234-241. EDN TTXZYZ. (rus.).

18. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Resistance to progressive collapse of monolithic frames of buildings at localized damage of nodes from push-through. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(9):1454-1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468. EDN KBUTDH. (rus.).

19. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:49-51. EDN PFGIFZ. (rus.).

20. Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D. Ensuring the mechanical safety of reinforced concrete bearing structures at all stages of the life cycle. *International Construction Congress. Science. Innovations. Objectives. Construction : collection of abstracts of reports*. 2023; 48-50. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-48-50. EDN GGBZDR. (rus.).

21. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Classification of structures of industrial enterprises according to the possibility of protection from progressive collapse. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2024; 1(47):15-20. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-15-20. EDN WPLTSL. (rus.).

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on May 21, 2025.

Approved for publication on May 25, 2025.

B I O N O T E S : **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 55975413900; tamrazian@mail.ru;

Anatoly V. Alekseytsev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Elena S. Mishina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mishany96969@mail.ru.

Contribution of the authors:

Ashot G. Tamrazyan — a probabilistic-based robustness assessment concept.

Anatoly V. Alekseytsev — development of a methodology for robustness assessment based on a probabilistic indicator.

Elena S. Mishina — performing calculations for various emergency situations, obtaining and analyzing results.

The authors declare that they have no conflicts of interest.