

С.Ю. САВИН<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

## ЖИВУЧЕСТЬ И ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСА ЗДАНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСОБОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Аннотация:** Риски, связанные с особыми, в том числе аварийными, воздействиями на здания и сооружения, приводят к необходимости предусматривать при проектировании мероприятия по защите от прогрессирующего обрушения. При этом актуальной задачей является оценка достаточности и эффективности конструктивных мероприятий по защите как вновь проектируемых, так и реконструируемых зданий и сооружений для предотвращения их обрушения в аварийной ситуации. Решение этой задачи возможно с использованием критериев и мер живучести. Предложен вариант относительного индекса живучести, учитывающего степень повреждения элементов конструктивной системы здания в процессе длительной эксплуатации и уровень действующей нагрузки. Рассмотрена связь между относительной мерой живучести и техническим состоянием конструкций. Приведены результаты оценки живучести железобетонного многоэтажного каркаса здания с плоскими безбалочными плитами перекрытий, в которых в качестве конструктивного мероприятия по защите от прогрессирующего обрушения предусмотрены периметрические, продольные и поперечные внутренние связи, подобранные по методу связевых усилий. Продемонстрирована эффективность использования системы дополнительных связей для обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения. Показано, что при проектном уровне нагрузки наименьший относительный индекс живучести соответствует аварийной ситуации, вызванной потерей несущей способности угловой колонны здания, а наибольший – средней колонны. В результате снижения прочности бетона и арматуры на 30% (или эквивалентного снижения эффективных размеров сечений в результате действия агрессивной среды) отмечено снижение относительного индекса живучести до  $RRI = 0,65$  при действии постоянных и длительных нормативных нагрузках и принятых нормативных характеристиках материалов конструкций.

**Ключевые слова:** особое воздействие, прогрессирующее обрушение, живучесть, относительный индекс живучести, техническое состояние, железобетонный каркас, дополнительные связи

S.Y. SAVIN<sup>1</sup><sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

## ROBUSTNESS AND TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES AS A RESULT OF ACCIDENTAL ACTION

**Abstract.** Risks associated with accidental actions on buildings and structures lead to the demand for design measures aimed at protection against progressive collapse. In this case, the actual task is to assess the sufficiency and effectiveness of structural measures to protect both newly designed and reconstructed buildings and structures to prevent their collapse in an accidental situation. The solution of this problem is possible with the usage of criteria and measures of robustness. A variant of the relative robustness index, which takes into account the degree of damage to the elements of the structural system of the building during long-term operation and the level of the current load, has been proposed.

© Савин С.Ю., 2025

*The relation between the relative measure of robustness and technical condition of structures is examined. The results of robustness check of reinforced concrete multistorey building frame with plane beamless floor slabs, in which perimeter, longitudinal and transverse internal ties, selected by the method of tie forces, are provided as a structural measure to protect against progressive collapse. The effectiveness of using a system of additional ties to provide protection against progressive collapse has been demonstrated. It is shown that at the design load level the lowest relative robustness index corresponds to the accidental situation caused by the loss of bearing capacity of the corner column of the building, and the highest - to the middle column. As a result of concrete and reinforcement strength reduction by 30% (or equivalent reduction of effective cross-sectional dimensions as a result of aggressive medium action), the relative robustness index decreased to  $RRI = 0.65$  under the action of constant and long-term characteristic loads and accepted characteristic properties of construction materials.*

**Keywords:** *accidental actions, progressive collapse, robustness, relative robustness index, technical condition, reinforced concrete frame, tie force*

## 1. Введение

В течение срока эксплуатации здания и сооружения могут подвергаться аварийным воздействиям различного характера. В связи с этим при оценке их технического состояния целесообразно определять не только ресурс сопротивления при действии основных сочетаниях нагрузок, но также живучесть конструктивной системы при особых, в том числе аварийных, воздействиях [1–3]. Термин живучесть (structural robustness) относительно недавно был введен в научную литературу и инженерную практику и пока ещё по-разному толкуется различными авторами и нормативными документами.

В [4] под живучестью понимается нечувствительность конструктивной системы к первоначальным повреждениям. Таким образом, конструктивная система обладает живучестью, если первоначальное повреждение не приводит к непропорциональному обрушению. Староссек и Хаберланд [5] определяют живучесть конструктивной системы как соотношение между прямыми рисками и общими рисками (суммарные риски равны сумме прямых и косвенных рисков) в течение определенного периода времени и с учетом всех возможных воздействий и повреждений элементов конструктивной системы. В [6] под живучестью понимается способность конструктивной системы перераспределять нагрузку между остальными несущими элементами в случае разрушения или повреждения одно из них.

Для оценки свойства живучести в научной литературе предложены различные количественные меры и параметры, основанные на учете риска, вероятности отказа, а также детерминированные, определяемые в рамках неявного оценивания вероятностей отказов и их последствий с использованием «глобального» формата безопасности или формата безопасности, основанного на применении системы частных коэффициентов безопасности (надежности). Подробный обзор мер живучести приведен в работах [2,7]. Общим для всех представленных мер живучести является сопоставление исходной и поврежденной несущей системы здания.

Известны различные методы проектирования, направленные на обеспечения свойства живучести конструктивных систем зданий и сооружений при аварийных воздействиях, среди которых проектирование ключевых элементов; создание системы дополнительных горизонтальных и вертикальных связей, в том числе внутренних; передача нагрузок по альтернативному пути; систематического учет и анализа риска (в том числе для окружения проверяемого строительного объекта). Одним из наиболее распространенных методов проектирования, предусмотренных в нормах различных стран, и находящий наиболее широкое применение, является метод передачи нагрузок по альтернативному пути [8]. В рамках этого метода рассматривается отклик поврежденной системы, максимально учитываются резервы несущей способности элементов системы с учетом изменения схемы их

работы и изменения напряженно-деформированного состояния [5–7]. Таким образом, при проверке альтернативных путей передачи нагрузок как правило рассматривают состояния несущей системы [9] в диапазоне от LS (Life Safety – безопасность жизнедеятельности) до CP (Collapse Prevention – предотвращение обрушения) на кривой отклика конструкции (рис. 1).

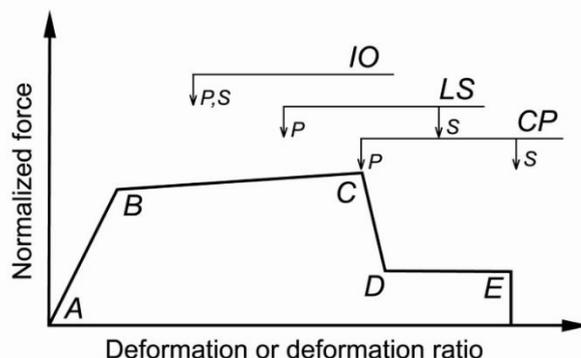


Рисунок 1 - Обобщенный вид связи между нагрузкой и деформацией конструктивного элемента и критерии приемлемых последствий по FEMA, 2000 [9]

С другой стороны, количественные меры живучести [2,10] могут быть использованы для оценки ресурса сопротивления конструктивных систем зданий не только при отказе несущего элемента, но и для режима нормальной эксплуатации в условиях снижения механических характеристик материалов в результате длительной эксплуатации и воздействий агрессивных сред, а также с учетом риска аварийных воздействий на поврежденных в результате длительной эксплуатации каркасы зданий. При этом необходимо выполнить дифференциацию допустимых уровней напряженно-деформированного состояния каркасов зданий с учетом требований эксплуатационной пригодности, ремонтпригодности и т.д. и установить количественные параметры такой оценки. Такая дифференция в научной литературе до настоящего времени не выполнялась.

Уместно также заметить, что представленные в нормах критерии для проверки несущей способности в рамках формата, основанного на использовании системы частных коэффициентов (коэффициентов надежности), ориентированы на оценку прочности и деформативности отдельных сечений и узлов и не дают прямого ответа на вопрос о том, как влияет образование шарниров пластичности в одном или нескольких сечениях элементов из композиционных материалов, таких как железобетон, на поведение конструктивной системы или отдельных её деформационных блоков с учетом возникновения специфических уровней напряженно-деформированных состояний поврежденных каркасов зданий [11–13]. В связи с этим в дополнение к критериям предельных относительных деформаций при проверке живучести целесообразно использование энергетических критериев устойчивости деформирования [14–16].

Целью данного исследования являлось установление связи между параметрами технического состояния зданий и соответствующими им количественными мерами живучести.

## 2. Модели и методы

### 2.1. Общие положения по оценке живучести поврежденных конструктивных систем зданий

Согласно требованиям норм проектирования<sup>1</sup> начальное локальное разрушение не должно приводить к прогрессирующему обрушению. При этом, учитывая, что в результате проектирования должна быть обеспечена несущая способность, деформативность и

<sup>1</sup> СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394640>

устойчивость формы деформации как здания и сооружения в целом, так и отдельных элементов и узлов сопряжений (с учетом специфических уровней напряженно-деформированного состояния), то проверку устойчивости к прогрессирующему обрушению всего сооружения может быть сведена к проверке живучести ограниченной области конструктивной системы здания – в пределах одного пролета в каждом направлении от удаляемого в рамках такой проверки элемента расчетной схемы. Такую область будем называть зоной возможного локального разрушения [17].

Рассмотрим относительную детерминированную меру живучести конструкций, предложенную Фэллоном и др. [18], предполагающую неявную оценку надежности:

$$RRI = \frac{\lambda_{damaged} - 1}{\lambda_{intact} - 1}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{damaged} = \frac{P_{damaged}}{P_{design}}, \quad \lambda_{intact} = \frac{P_{intact}}{P_{design}}.$$

Здесь  $P_{design}$  – проектная нагрузка,  $P_{intact}$  – несущая способность неповрежденной конструктивной системы по первичной расчетной схеме,  $P_{damaged}$  – несущая способность поврежденной несущей системы по вторичной расчетной схеме.

Мера живучести (1) позволяет выполнить оценку снижения несущей способности поврежденной конструктивной системы по сравнению с её исходным неповрежденным состоянием. Однако она не учитывает текущий уровень нагруженности конструктивной системы, например, превышение проектной нагрузки в результате динамического воздействия, в том числе сопровождаемого изменением расчетной схемы сооружения.

В (1) параметры  $\lambda_{damaged}$  и  $\lambda_{intact}$  являются множителями к проектной нагрузке, аналогичные параметру живучести  $\lambda$ , рассмотренному в работах [6,19,20]. Минимальное значение параметра живучести  $\lambda_m, (m=1,2,3)$ , при котором после начального локального разрушения достигается особое предельное состояние в наиболее нагруженном сечении элемента определяется из выражения:

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

Здесь  $F_{j,ult}^d$  - прочность  $j$ -ого сечения элемента или связи при динамическом нагружении в особой расчетной ситуации;  $F_{jq}$  - усилие в  $j$ -ом сечении элемента или связи поврежденной конструктивной системы от эксплуатационной нагрузки;  $f_{jp}$  - усилие в  $j$ -ом сечении элемента или связи поврежденной конструктивной системы от нагрузки  $P$  в виде единичной сосредоточенной силы, приложенной в узле расчетной схемы по месту начального локального разрушения (моделирует динамические эффекты от внезапной структурной перестройки конструктивной системы в рамках подхода pull-down). Потере прочности  $j$ -ого сечения элемента или связи соответствует выполнение условия:

$$F_{jq} \pm f_{jp} \cdot \lambda_m < F_{j,ult}^d, \quad (j=1,2,\dots,k). \quad (3)$$

При этом система утрачивает свойство живучести при минимальном значении параметра  $\lambda$ , при котором система или её часть превращается в геометрически изменяемую, что может быть установлено путем приравнявая нулю определителя, составленного из коэффициентов системы уравнений равновесия, записанной в матричной форме.

С учетом обозначений в выражении (1) критерий живучести по [6,19] может быть записан в виде:

$$1 - \frac{\lambda}{\lambda_{damaged}} \geq 0, \quad (4)$$

где

$$\lambda = \frac{P}{P_{damaged}}.$$

В формуле (4) в отличие от (1) присутствует параметр  $\lambda$ , связанный с уровнем действующей нагрузки  $P$ . При этом  $\lambda_{damaged}$  определяется образованием такого числа пластических шарниров, при котором система становится геометрически изменяемой. Критерий (2) хорошо подходит для оценки живучести вновь проектируемых несущих систем зданий, однако он не учитывает в явном виде снижение несущей способности конструкций вследствие физического износа в процессе длительной эксплуатации или воздействий агрессивных сред.

Для учета уровня действующей нагрузки и снижения несущей способности конструкций в процессе эксплуатации относительный индекс живучести может быть представлен в виде:

$$RRI(\lambda) = \left( \frac{\lambda_{damaged} - \lambda}{\lambda_{intact} - 1} \right). \quad (5)$$

Относительный индекс живучести  $RRI$  в (5) изменяется от 0 до  $RRI(0)$ . Здесь 0 – соответствует условию достижения предельного равновесия конструкций в зоне возможно локального разрушения конструктивной системы или её части в проверяемой зоне возможного локального разрушения, а 1 – уровню живучести исходной конструктивной системы без повреждений при действии проектной нагрузки. Если уровень нагрузки снижается по сравнению с изначальной проектной ( $\lambda < \lambda_{design}$ ), то относительный индекс живучести может принимать значения больше единицы для исходной конструктивной системы ( $\lambda_{damaged} = \lambda_{intact}$ ) или приближаться к единице для усиливаемых конструкций эксплуатируемого здания.

При наличии полных диаграмм деформирования для монотонного квазистатического нагружения исходной и поврежденной конструктивной системы относительный индекс живучести может быть определен с использованием энергетического подхода [17] согласно схеме, представленной на рисунке 2.

На первом этапе с учетом полной диаграммы деформирования поврежденной конструктивной системы (рисунок 2, а) определяется уровень динамического догружения и соответствующее ему деформированное состояние конструкций из условия равенства работы и полной энергии деформации ( $A_1 = A_2$ ) при достижении амплитудного значения относительного перемещения ( $\delta_i/\delta_{ult}$ ) на первой полуволне колебаний системы, выведенной из состояния статического равновесия.

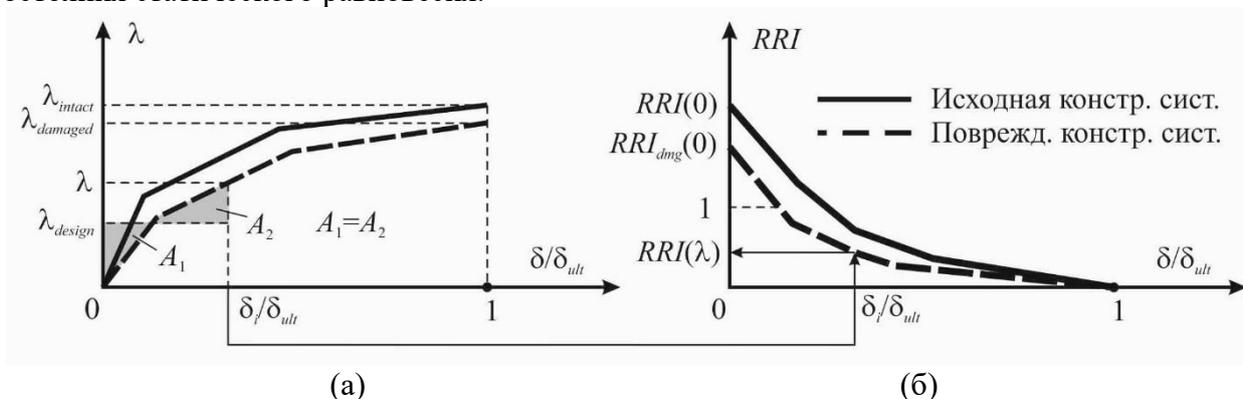


Рисунок 2 – К определению относительного индекса живучести конструктивной системы здания:  
 а – зависимость параметра нагрузки  $\lambda$  от уровня деформированного состояния; б – зависимость относительного индекса живучести  $RRI$  от уровня деформированного состояния

По найденному значению амплитудного перемещения на графике « $RRI - \delta_i/\delta_{ult}$ » (рисунок 2, б) определяется относительный индекс живучести, с учетом которого соответствующее техническое состояние здания может быть установлено по таблице 1.

Таблица 1 – Связь относительного параметра живучести RRI с характеристиками технического состояния и уровнями последствий особого воздействия

Качественные характеристики технического состояния несущих систем зданий по ГОСТ 31937-2024 <sup>1</sup>	Уровни последствий по [9]	Значение относительного индекса живучести RRI
Нормативное	O (Operational)	$0,75 < RRI \leq 1$
Работоспособное	IO (Immediate Occupany)	$0,5 < RRI \leq 0,75$
	LS (Life Safety)	$0,25 < RRI \leq 0,5$
Ограниченно работоспособное	CP (Collapse Prevention)	$0 < RRI \leq 0,25$
Аварийное	CO (Collapse)	$RRI \leq 0$

## 2.2. Конструктивные решения здания и рассматриваемые расчетные ситуации

Для иллюстрации предложенной меры живучести (3) рассмотрим железобетонный каркас многоэтажного здания (рисунок 3, а) с безбалочными перекрытиями, запроектированный в соответствии с требованиями СП 430.1325800<sup>2</sup> и СП 63.13330<sup>3</sup>.

Вертикальные несущие конструкции представлены монолитными железобетонными колоннами сечением  $400 \times 400$  мм, стенами подвала толщиной 200 мм. Перекрытия выполнены в виде безбалочных монолитных железобетонных плит толщиной 250 мм. Для всех конструкций используется бетон класса прочности по сжатию В30. В качестве продольной и поперечной рабочей арматуры используется арматура А500. Для защиты от прогрессирующего обрушения в плитах перекрытиях предусмотрена система периметрических, продольных и поперечных горизонтальных связей, в качестве которых используются арматурные стержни  $\varnothing 12A500$ , устанавливаемые с шагом  $0,2L$  в сжатой зоне или вблизи нейтральной оси. Здесь  $L$  – пролет в поперечном по отношению к отдельной связи направлении.

Численное моделирование выполнено в ПК Лира – САПР. Для моделирования колонн использовались универсальные стержневые конечные элементы КЭ 210, позволяющие учитывать физическую нелинейность. Плиты перекрытия и стены моделировались с помощью универсальных треугольных и четырехугольных конечных элементов оболочки КЭ 242, 244 с учетом физической нелинейности. В качестве нелинейных законов деформирования использовались кусочно-линейные зависимости между напряжениями и относительными деформациями: для бетона – трехлинейная, для арматуры – билинейная с упрочнением. Прочность и деформативность материалов принята в соответствии с нормативными значениями по СП 63.13330. В узлах сопряжения колонн с плитами перекрытий и покрытия в пределах размеров поперечного сечения колонны вводились абсолютно жесткие тела, реализующие гипотезу о недеформируемых поперечных сечениях. Для моделирования связей используются универсальные стержневые конечные элементы КЭ 210.

<sup>1</sup> ГОСТ 31937-2024 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305691614>

<sup>2</sup> СП 430.1325800.2018 Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820823>

<sup>3</sup> СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082>

В результате длительной эксплуатации в железобетонном каркасе наблюдается снижение механических характеристик арматуры и бетона, выражаемой в эквивалентном снижении их прочности и деформативности.

В качестве критерия исчерпания несущей способности в сочетании с предельными относительными деформациями бетона и арматурной стали используется энергетический критерий устойчивости деформирования, который применительно к графику деформирования в безразмерных величинах (рисунок 2, а) может быть записан в виде:

$$\frac{d\lambda}{d(\delta/\delta_{ult})} = \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – является касательной жесткостью или, следуя терминологии, принятой в [15,16] – отпорностью, в безразмерных координатах  $\lambda - (\delta/\delta_{ult})$ . В качестве предельного значения в данном исследовании принято  $\alpha = 0,15$ , что соответствует снижению касательной жесткости (отпорности) на 85%.

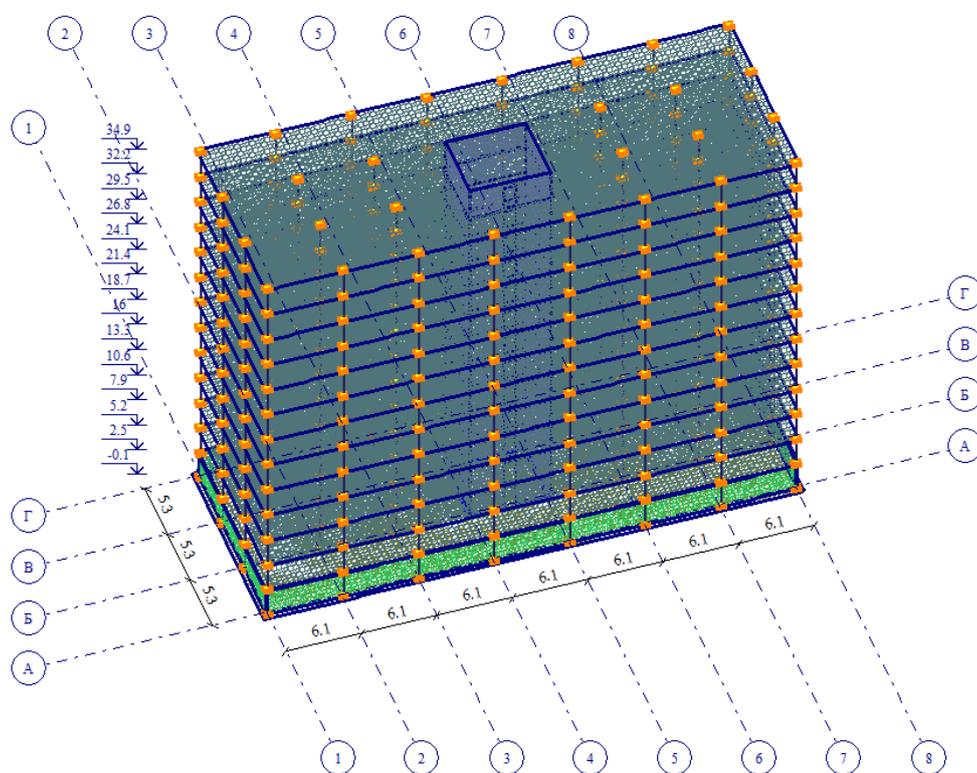


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель многоэтажного каркасного здания

В связи с многообразием разновидностей аварийных воздействий на конструкции зданий и сооружений, а также возможностью появления в течение срока эксплуатации новых, не поддающихся на этапе проектирования учету и прогнозированию аварийных воздействий, при оценке технического состояния и параметра живучести моделируется аварийная расчетная ситуация, связанная с внезапной потерей несущей способности одного из элементов каркаса здания. При этом дополнительно рассматривается снижение механических и деформативных характеристик бетона и арматуры в процессе эксплуатации до 30 %. Расчет исходной  $n$  (без повреждений) и поврежденной ( $n - 1$ ) конструктивной системы выполнен на особое сочетание нагрузок:

$$C_s = P_d + P_l + P_s. \quad (5)$$

Здесь  $P_d$  – нормативные постоянные нагрузки,  $P_l$  – нормативные длительные нагрузки,  $P_s$  – нагрузка, представляющая собой статический эквивалент динамического эффекта от особого

воздействия, прикладываемая к конструкциям перекрытий в проверяемой зоне возможного локального разрушения. Для физически нелинейного расчета нагрузка  $P_s$  задается с некоторым запасом – для получения полной диаграммы деформирования конструктивного узла над удаляемой конструкцией. Фактическое значение  $P_s$ , соответствующее рассматриваемой аварийной расчетной ситуации, определяется с использованием энергетических соотношений по схеме рисунка 2, а.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 4, 5.

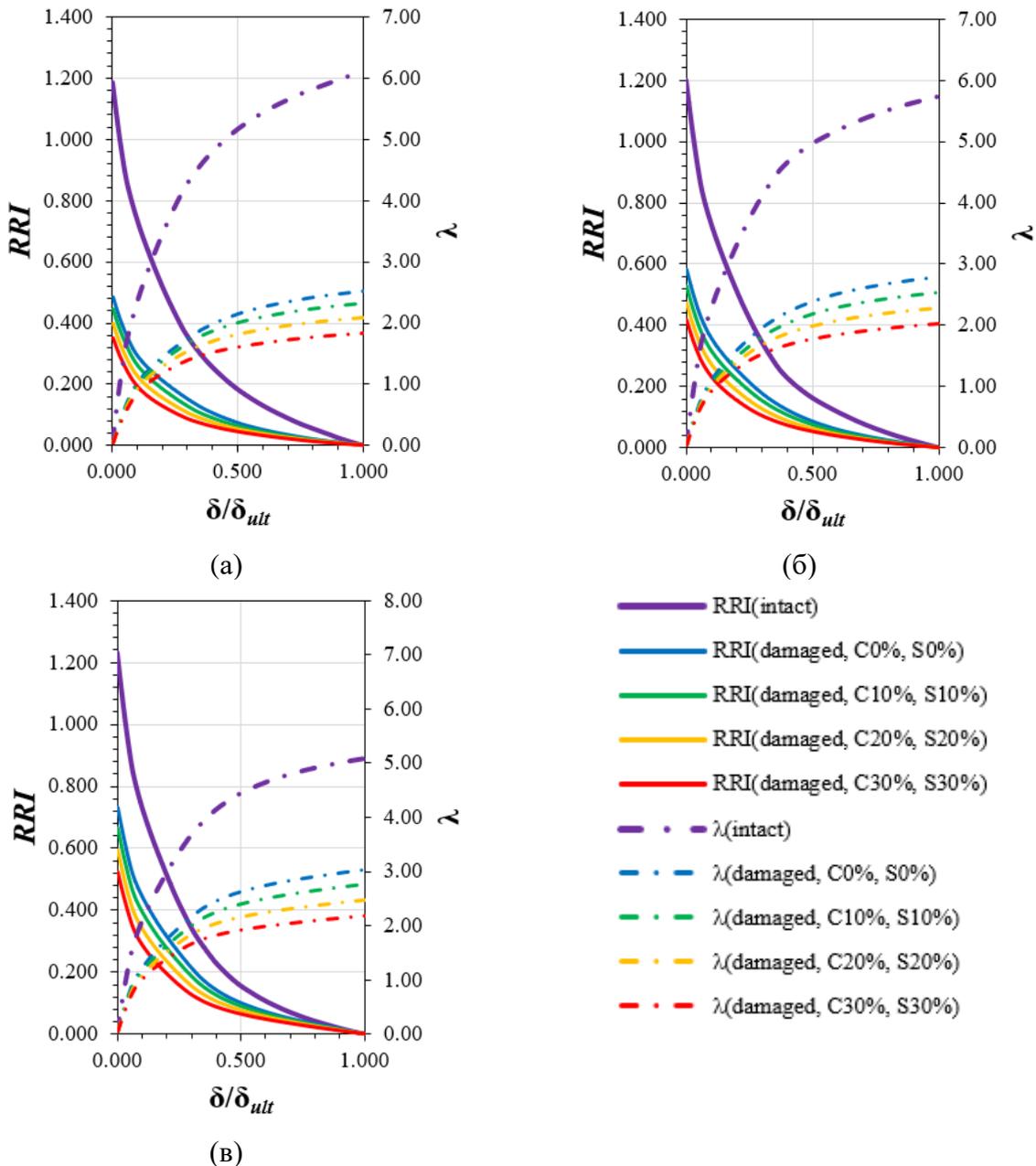


Рисунок 4 – Графики зависимости изменения параметрической нагрузки  $\lambda$  и относительного индекса живучести  $RRI(\lambda)$  от уровня деформированного состояния ( $\delta/\delta_{ult}$ ) в аварийной расчетной ситуации: при отказе угловой колонны (а); при отказе колонны крайнего ряда (б); при отказе колонны среднего ряда (в)

Анализ графиков на рисунке 4, а-в свидетельствует о значительном запасе несущей способности конструктивной системы как в исходном состоянии (по первичной расчетной схеме), так и после начального локального разрушения по всем трем сценариям: удаление средней, крайней или угловой колонны. Дополнительная система продольных и поперечных связей в дисках перекрытий способствовала реализации мембранного механизма сопротивления плит перекрытий и повышению несущей способности по критериям особого предельного состояния. При этом наибольшее снижение относительного индекса живучести отмечено для сценария удаления угловой колонны ( $RRI = 0.30$ ), а наименьшее – для сценария удаления средней колонны ( $0.50$ ). При удалении колонны крайнего ряда и отсутствии снижения прочностных и деформативных характеристик материалов  $RRI = 0.38$ .

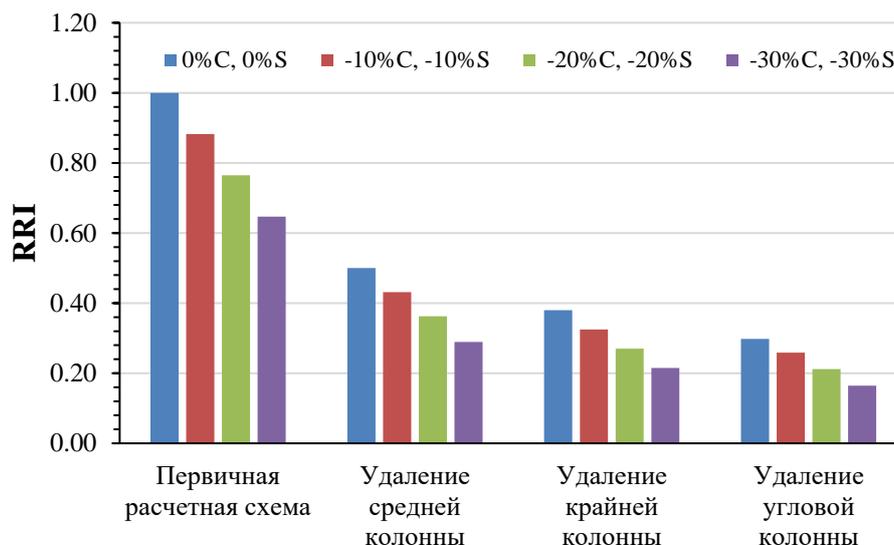
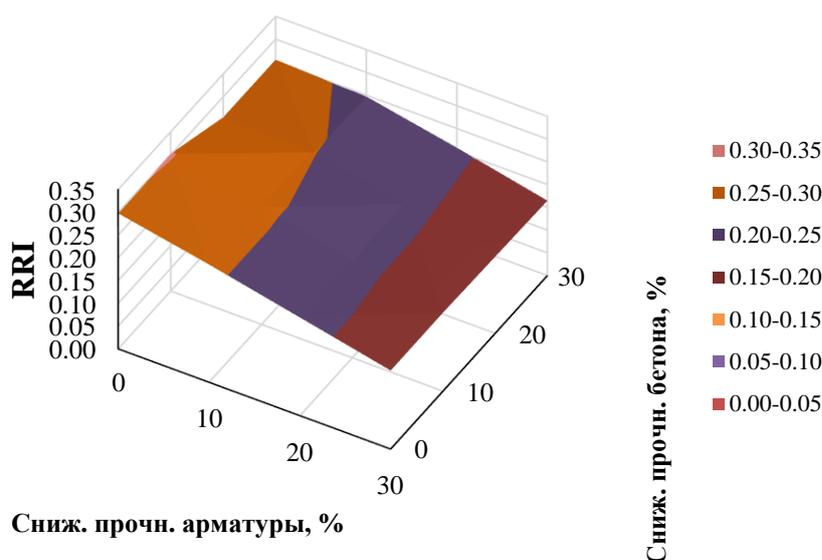


Рисунок 5 – Зависимость относительного индекса живучести RRI от вида начального локального разрушения и снижения механических характеристик бетона и арматуры

Из рисунка 5 видно, что для рассматриваемой конструктивной системы по первичной расчетной схеме при снижении нормативной прочности бетона и арматурной стали до 30 % значения относительного индекса живучести RRI для проектной нагрузки снижается до  $RRI = 0,65$ . Наибольшее снижение до  $RRI = 0,16$  происходит при сценарии удаления угловой колонны и наличия коррозионных повреждений до 30%. Следует отметить, что в рассмотренном примере расчет выполнялся на особое сочетание нагрузок, включающее только нормативные постоянные и длительные нагрузки, характеристики материалов принимались нормативными. При расчете по первой группе предельных состояний за счет применения системы коэффициентов надежности (частных коэффициентов), а также более жестких критериев проверки запасы несущей способности для конструктивной системы по первичной расчетной схеме существенно снизятся и при высоком уровне коррозионных повреждений (от 20% до 30%) следует ожидать значения относительного индекса живучести меньше нуля  $RRI < 0$ .

На рисунке 6 представлен график зависимости относительного индекса живучести от снижения прочности бетона и стальной арматуры (или эквивалентного уменьшения эффективных размеров сечений вследствие воздействий агрессивных сред). Из графика видно, что снижение прочности (или эквивалентных размеров сечения) арматуры оказывает более существенное влияние на снижение живучести конструктивной системы при особом воздействии. Это обусловлено тем, что именно арматура определяет сопротивление конструкций перекрытий по мембранному механизму после образования пластических шарниров.



*Рисунок 6 – График зависимости относительного индекса живучести при действии проектной нагрузки от снижения прочности бетона и арматуры для системы (п-1) при сценарии начального локального разрушения в виде отказа угловой колонны*

#### 4. Заключение

1. Предложен подход к оценке живучести и технического состояния железобетонных конструкций каркаса здания в результате особого воздействия, основанный на использовании относительного индекса живучести, учитывающего степень повреждения элементов конструктивной системы здания в процессе длительной эксплуатации и уровень действующей нагрузки.

2. Показано, что при проектном уровне нагрузки наименьший относительный индекс живучести соответствует сценарию начального локального разрушения, связанного с удалением угловой колонны здания ( $RRI = 0.30$ ), а наибольший – средней колонны ( $RRI = 0.5$ ), что согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований сопротивления конструкций железобетонных каркасов зданий при аварийном воздействии, выполненных различными авторами.

3. Численным моделированием установлено, что в результате снижения прочности бетона и арматуры до 30 % или соответствующего эквивалентного снижения эффективных размеров сечений в результате воздействия агрессивной среды происходит снижение относительного индекса живучести, который достигает значения 0,65 при расчете по первичной расчетной схеме на действие постоянных и длительных нормативных нагрузок и принятых нормативных значений прочностных и деформативных характеристик материалов конструкций.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект по теме «Оценка технического состояния зданий на основе параметров живучести и риска», номер темы FSWG 2024-0003 (госзадание НИУ МГСУ). Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 15.10.2024 №075-03-2024-063/9.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Vol. 1, № 1. P. 5–18.
2. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. № 3. С. 62–74.
3. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А., Савин С.Ю. Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозирования риска аварии // Строительство и реконструкция. 2024. № 6. С. 82–91.
4. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
5. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // Structure and Infrastructure Engineering. 2011. Vol. 7, № 7–8. P. 625–631.
6. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion // Eng Struct. 2024. Vol. 314. P. 118309.
7. Adam J.M., Parisi F., Sagasetta J., Lu, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng Struct. Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
8. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. A simplified model for alternate load path assessment in RC structures // Eng Struct. 2018. Vol. 171. Pp. 696–711.
9. Federal Emergency Management Agency FEMA 356 / November 2000 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.
10. 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. Vol. 113, № 3. P. 31–71.
11. Almusallam T., Al-Salloum Y., Elsanadedy H., Tuan N., Mendis P., Abbas H. Development limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios // Structure and Infrastructure Engineering. Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 12. P. 1616–1634.
12. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Resistance of Reinforced Concrete Frames to Progressive Collapse at Catenary Action of Beams // Reinforced concrete structures. 2024. Vol. 6, № 2. P. 43–53.
13. Lu X., Lin K., Li C., Li Y. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures // Eng Struct. 2018. Vol. 168. P. 721–735.
14. Sznyszewski S. Dynamic energy-based method for progressive collapse analysis // Proceedings of the 2009 Structures Congress - Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role. 2009. P. 1259–1268.
15. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. Москва: Госстройиздат, 1958. 216 p.
16. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопrotивление железобетонных конструкций. Киев: Основа, 2009. 432 p.
17. Савин С.Ю., Колчунов В.И. Устойчивость железобетонных каркасов зданий к начальному локальному разрушению // Известия вузов. Строительство. 2024. № 10. P. 50–64.
18. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2016. Vol. 30, № 6.
19. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 p.
20. Fedorova N., Vu N.T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental actions // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 109, № 1.

**REFERENCES**

1. Tamrazian A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1):5-18. (In Russ.).
2. Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. *Reinforced concrete structures*. 2023;3(3):62-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.3.62-74>
3. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting. *Building and Reconstruction*. 2024. № 6. P. 82–91.
4. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
5. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2011. Vol. 7, № 7–8. P. 625–631.

6. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion. *Eng Struct.* 2024. Vol. 314. P. 118309.
7. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng Struct.* Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
8. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. A simplified model for alternate load path assessment in RC structures. *Eng Struct.* 2018. Vol. 171. Pp. 696–711
9. Federal Emergency Management Agency FEMA 356 / November 2000 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.
10. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction.* 2024;(3):31-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71>
11. Almusallam T., Al-Salloum Y., Elsanadedy H., Tuan N., Mendis P., Abbas H. Development limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios. *Structure and Infrastructure Engineering.* Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 12. P. 1616–1634.
12. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Resistance of Reinforced Concrete Frames to Progressive Collapse at Catenary Action of Beams. *Reinforced concrete structures.* 2024. Vol. 6, № 2. P. 43–53.
13. Lu X., Lin K., Li C., Li Y. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures. *Eng Struct.* 2018. Vol. 168. P. 721–735.
14. Szyniszewski S. Dynamic energy-based method for progressive collapse analysis. Proceedings of the 2009 Structures Congress - Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role. 2009. P. 1259–1268.
15. Gemmerling A.V. Load-bearing capacity of steel bar structures. Moscow: Gosstroyizdat, 1958. 216 p.
16. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete structures. Kiev: Osnova, 2009. 432 p.
17. Savin S.Yu., Kolchunov V.I. Robustness check of reinforced concrete frames at initial localized failure. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2024; (10): 50–64. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-50-64.
18. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2016. Vol. 30, № 6.
19. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Robustness of building and structures to undesigned actions. Moscow: Publishing ASV, 2014. 208 p.
20. Fedorova N., Vu N.T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental actions. *Magazine of Civil Engineering.* 2022. Vol. 109, № 1.

**Информация об авторах:**

**Савин Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.  
E-mail: [savinsyu@mgsu.ru](mailto:savinsyu@mgsu.ru)

**Information about authors:**

**Savin Sergey Yu.**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
Candidate of Tech. Sc., associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures  
E-mail: [savinsyu@mgsu.ru](mailto:savinsyu@mgsu.ru)

Статья поступила в редакцию 17.07.2025  
Одобрена после рецензирования 09.08.2025  
Принята к публикации 12.08.2025

The article was submitted 17.07.2025  
Approved after reviewing 09.08.2025  
Accepted for publication 12.08.2025