



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений

А.Г. Тамразян^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

*tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: живучесть, конструкция, сооружение, оценка, прогрессирующее разрушение, повреждение, уязвимость, вероятность, воздействие, угрозы, риск

История статьи

Поступила в редакцию: 05.04.2023

Доработана: 18.04.2023

Принята к публикации: 21.04.2023

Для цитирования

Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.

Аннотация. Проанализированы некоторые примеры аварий конструкций, зданий, в которых была обнаружена недостаточная живучесть. Представлены несколько авторских определений живучести. Особое внимание уделяется тому факту, что живучесть определяют и как внутреннее конструктивное свойство, а с другой стороны, рассматривают ее как свойство конструкции и ее окружения. Представлены и обсуждены некоторые взаимосвязанные концепции. Также представлены наиболее важные предлагаемые оценки живучести. После анализа характера живучести предлагается новое конструктивно-ориентированное определение. На основании отмеченных недостатков существующих оценок, в частности связанных с износом конструкций, предлагается концептуальная основа для оценки живучести.

Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities

Ashot G. Tamrazyan^{1*}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

*tamrazian@mail.ru

Keywords: Robustness, structure, construction, assessment, progressive collapse, damage, vulnerability, probability, exposure, threats, risk.

Abstract. Some examples of failures of structures, buildings, where the lack of robustness was recognized, are analyzed. Several author's definitions for robustness are presented and discussed. Special emphasis is given to the fact that define robustness as an intrinsic structural property and the other hand it as a property of the structure and its environment. Some related concepts are presented and discussed.

Ашот Георгиевич Тамразян, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Article history

Received: 05.04.2023

Revised: 18.04.2023

Accepted: 21.04.2023

For citation

Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. *Reinforced concrete structures*. 2023;3(3):62–74.

The most important proposed measures for robustness are also presented including some illustration examples. Finally, a comparison between them is made and the respective shortcomings are identified. After analysis of the robustness nature, a new structural oriented definition is proposed. Based on the highlighted shortcomings of the existing measures, in particular those related with the application to deteriorated structures, a conceptual framework for robustness assessment is proposed.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия интерес к концепции конструктивной живучести вызывает растущий интерес в связи с возникновением катастрофических последствий в результате экстремальных явлений природного и техногенного характера [1,2]. Отсутствие живучести конструкций, зданий и сооружений несколько раз называлось основной причиной неуправляемых последствий [3-6]. Однако эта концепция пока точно не определена, и в литературе можно найти несколько различных точек зрения на оценку живучести [7-12].

Известные обрушения зданий и сооружений имели разные причины, но во всех случаях последствия считались непропорциональными по отношению к первоначальному урону [13-18].

Живучесть обычно связывают с такими свойствами конструкции, как избыточность, пластичность, гибкость и устойчивость к повреждениям. Живучесть также связана с другими свойствами, которые зависят также от окружения конструкции, такими как риск, последствия и уязвимость.

Если конструкция подвергается опасности, некоторые повреждения могут возникнуть в зависимости от типа и величины опасности и местного сопротивления конструкции. В зависимости от величины и характера потерь несущей способности могут возникнуть последствия, как для самой конструкции, так и для ее окружения, и может начаться новый цикл, ведущий в некоторых случаях, к прогрессирующему разрушению [19] (рис. 1).

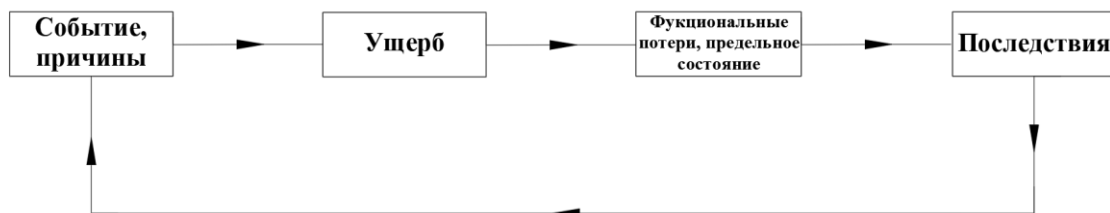


Рисунок1. Прогрессирующая потеря несущей способности конструкции
Figure 1. Progressive loss in structural function

Дерево событий, представленное на рис. 2, и вероятности, связанные с каждым событием, представленные на рис. 1, могут помочь понять используемые концепции и оценить перспективу каждого шага, ведущего к разрушению конструкции [12].

Ashot G. Tamrazyan, Corresponding member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: tamrazian@mail.ru

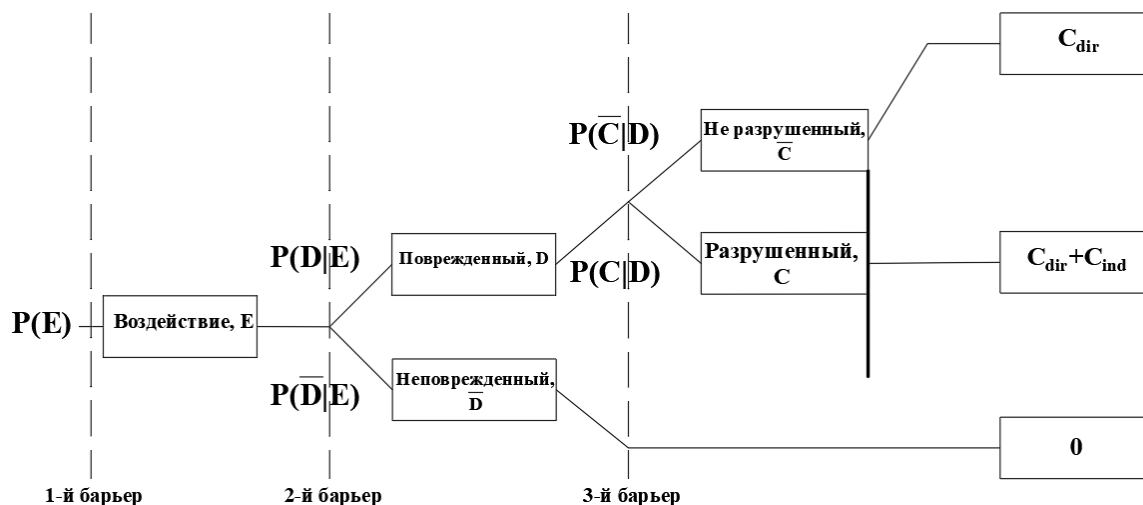


Рисунок 2. Дерево событий, ведущее к разрушению конструкций, зданий от воздействия до последствий
Figure 2. Tree of events leading to structural failure, from exposure to consequences

Вероятность разрушения в дереве событий, показанная на рис. 2 $P(C)$ может быть вычислена как:

$$P(C) = P(E) \times P(D|E) \times P(C|D), \quad (1)$$

где $P(E)$ — вероятность возникновения события, которое может привести к повреждению конструкции; $P(D|E)$ — условная вероятность повреждения конструкции с учетом воздействия на нее E ; $P(C|D)$ — вероятность разрушения при условии повреждения D .

Принимая во внимание возможные последствия каждого сценария на рис. 2, можно получить связанный с ним риск. Для случая, когда после воздействия конструкция повреждается, но не разрушается, возможны только прямые последствия для самой конструкции, C_{dir} . Когда конструкция выходит из строя после повреждения, необходимо учитывать дополнительные косвенные последствия C_{ind} , связанные с окружающей конструкцией средой.

Инженеры всегда будут стремиться снизить риск, связанный с обрушением, что может быть достигнуто за счет уменьшения одной из трех вероятностей в правой части уравнения (1) [20-22]. Таким образом, в качестве барьеров против разрушения могут быть приняты три стратегии.

1. Предотвращение воздействия.

Первая альтернатива снижения риска связана с минимизацией вероятности воздействия $P(E)$. Воздействие определяется здесь как любое событие или угроза, потенциально вызывающая любой ущерб (см. рис. 3).

2. Предотвращение повреждений.

Второй подход к снижению вероятности обрушения направлен на минимизацию условной вероятности локального повреждения конструкции при конкретной угрозе $P(D|E)$.

Текущие нормы и стандарты сосредоточены на ограничении вероятности этих ожидаемых угроз, для неожиданных и случайных угроз действующие нормы менее объективны [23-26].

Стратегия предотвращения непропорционального повреждения зданий по случайной причине заключается в разработке ключевых элементов, способных выдержать соответствующее случайное воздействие [27]. Однако эта стратегия может иметь два основных недостатка. С

одной стороны, случайное действие трудно охарактеризовать, а с другой стороны, выход из строя ключевых элементов может вызвать цепную реакцию последующих отказов.

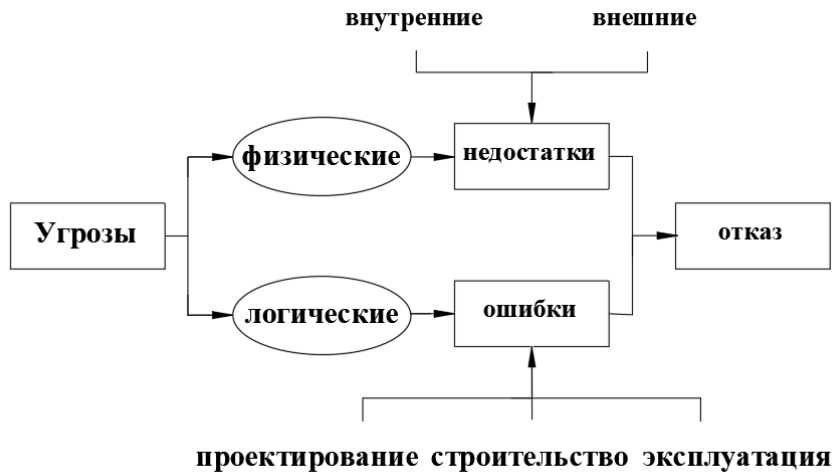


Рис. 3. Классификация угроз сооружения
Figure 3. Structural threats classification

3 Предотвращение отказов.

Третья стратегия предотвращения обрушения связана с общим поведением конструкции, здания и направлена на минимизацию вероятности обрушения после начального повреждения $P(C|D)$.

Запас прочности от начального повреждения до полного разрушения конструкции не всегда учитывается в нормах и стандартах, которые рассматривают безопасность конструкции посредством проверки элемента за элементом, пренебрегая поведением системы [23].

Например, для мостов, многопролётных балочных систем применяется стратегия проектирования сегментации (разрезности) пролета. Для гражданских зданий наиболее распространенная стратегия заключается в проектировании неразрезной системы [28,29].

Однако они являются конфликтующими стратегиями, поскольку сегментация может уменьшить формирование альтернативных путей передачи нагрузки, а неразрезность системы – наоборот.

Если живучесть рассматривается только как конструктивное свойство, то ни причины повреждений, ни последствия повреждения для окружающей ее среды не имеют значения (см. рис. 4).

В данном случае живучесть связана с тем, как конструкция реагирует на начальное повреждение.

Последствия, возникающие в результате повреждения или отказа конструкции, также сильно зависят от самой окружающей среды конструкции. Последствия могут быть как прямыми, так и косвенными. Прямые последствия связаны с самой конструкцией, например, затраты на ремонт или восстановление в результате отказа. Косвенные последствия связаны с конструктивной средой и могут носить различный характер, такой, как социальный, экономический и политический.

Поскольку последствия зависят от окружающей конструкцию среды, то, согласно этой точки зрения, живучесть также зависит от среды конструкции.



Рисунок 4. Живучесть как свойство конструкции и как свойство конструкции и окружающей ее среды
Figure 4. Robustness: structural property vs. property of structure and environment

МЕТОД

Для измерения (оценки) живучести предлагаются несколько классификаций: детерминированные, вероятностные, мерами риска.

1. Детерминированные оценки.

Детерминированный показатель избыточности R по запасу прочности поврежденной и неповрежденной конструкции:

$$R = \frac{L_{\text{intact}}}{L_{\text{intact}} - L_{\text{damaged}}}, \quad (2)$$

где L_{intact} — общая разрушающая нагрузка конструкции без повреждений, L_{damaged} — общая разрушающая нагрузка конструкции с учетом некоторого повреждения одного или нескольких элементов.

Коэффициент избыточности равен 1, когда поврежденная конструкция не имеет запаса прочности, и бесконечен, когда повреждение не влияет на запас прочности конструкции.

В связи с этим отмечаются три варианта оценки живучести.

а) Определение живучести основано на количественной оценке прогрессирующего ущерба, вызванное первоначальным повреждением, и определяется выражением:

$$R_d = 1 - \frac{p}{p_{\text{lim}}}, \quad (3)$$

где R_d — показатель живучести, связанный с повреждениями, p — максимальный размер дополнительного повреждения, возникающего в результате предполагаемого начального повреждения i , p_{lim} — допустимый уровень прогрессирующего повреждения.

б) Вторая оценка живучести была разработана, чтобы избежать зависимости от начального повреждения i , и определяется следующим выражением:

$$R_{d,int} = 1 - 2 \int_0^1 [d(i) - i] di, \quad (4)$$

где $R_{d,int}$ — интегральная мера живучести, основанная на повреждении, $d(i)$ — максимальное общее повреждение в результате первоначального повреждения степени i .

Рисунок 5 иллюстрирует эту меру, рассматривая поведение трех различных конструкций A , B и C . На горизонтальной и вертикальной осях представлены начальный и общий ущерб соответственно. Обе оси нормированы.

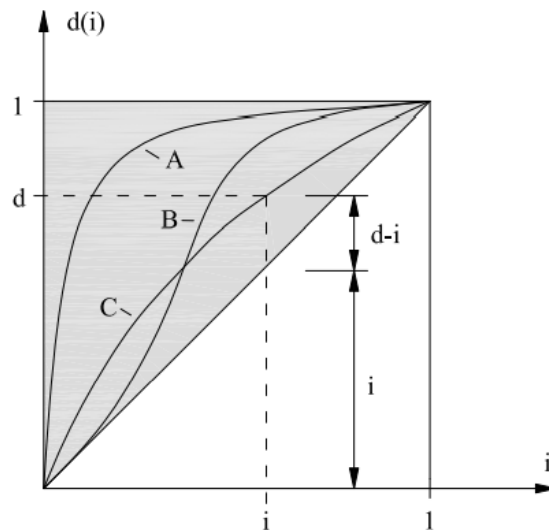


Рисунок 5. Оценка живучести, основанная на повреждении
Figure 5. Damage based robustness measure

Конструкцию можно считать более живучей, если соответствующая кривая лучше приближается к линии 45° , представленной на рисунке. Конструкция, ведущая себя в соответствии с этой линией, имеет максимальную живучесть, поскольку общее повреждение $d(i)$ равно начальному повреждению i , и, следовательно, никакого прогрессирующего повреждения не существует. В этом случае живучесть равна единице $R_{d,int} = 1$.

Когда кривая поведения конструкции имеет тенденцию отклоняться от линии 45° , это означает, что живучесть конструкции начинает снижаться. В пределе для конструкции с нулевой живучестью предлагаемый индекс равен нулю. В этом случае интеграл в уравнении (4) соответствует серой области на рис. 5, а характер кривой представляется горизонтальной линией, определяемой $d(i) = 1$.

Кривые A , B и C на рис. 5 относятся к промежуточным значениям живучести. Менее живуча конструкция по отношению к кривой A , так как разница между полученным повреждением d и начальным повреждением i всегда выше, чем в случаях B и C . Для нормированного начального уровня повреждения i , ниже $0,5$, ($i \leq 0,5$), прогрессирование повреждения выше на кривой C , чем на кривой B , и наоборот для $i \geq 0,5$. Площадь, определяемая между кривой и линией под углом 45° , примерно одинакова в обоих случаях. Таким образом, результаты живучести аналогичны для конструкций B и C .

в) Третья оценка живучести основана на количестве энергии, высвобождаемой во время разрушения. Индекс живучести, связанный с энергией, определяется следующим уравнением:

$$R_s = 1 - \max_j \frac{E_{r,j}}{E_{f,k}}, \quad (5)$$

где R_s мера живучести, основанная на энергии $E_{r,j}$ представляет собой энергию, высвобождаемую при первоначальном разрушении элемента конструкции j и способствующую повреждению элемента k , подвергшегося последующему воздействию, $E_{f,k}$ - представляет собой энергию, необходимую для разрушения впоследствии соударения элемента k . Значение, равное 1, указывает на идеальную живучесть, а отрицательные значения указывают на то, что ущерб может прогрессировать.

2. Вероятностные показатели.

Определяется индекс избыточности, учитывающий вероятностный характер параметров, влияющих на безопасность поврежденных конструкций:

$$\beta_R = \frac{\beta_{\text{intact}}}{\beta_{\text{intact}} - \beta_{\text{damaged}}}, \quad (6)$$

где β_{Intact} — показатель надежности неповрежденной системы, β_{damaged} — показатель надежности поврежденной системы.

Уязвимость и устойчивость к повреждениям являются взаимодополняющими понятиями: уязвимая система не является устойчивой к повреждениям и наоборот.

Уязвимость V системы определяется как:

$$V = \frac{P(r_0, S)}{P(r_d, S)}, \quad (7)$$

где r_0 — сопротивление неповрежденной системы, r_d — сопротивление поврежденной системы, S — нагрузка, $P(r, S)$ — вероятность отказа системы как функции воздействия нагрузки и сопротивления.

Уязвимость V системы может варьироваться от нуля до бесконечности, если повреждение имеет нулевое или большое влияние на сопротивление системы, соответственно.

С другой стороны, устойчивость к повреждениям T_d , может быть определена как величина, обратная уязвимости V :

$$T_d = \frac{P(r_d, S)}{P(r_0, S)}. \quad (8)$$

Такая концепция уязвимости полностью отличается от концепции уязвимости, представленной у нас, поскольку она связана с уязвимостью к повреждениям, а не к воздействию. С этой точки зрения допустимо рассматривать уязвимость к повреждениям и устойчивость к повреждениям как дополняющие друг друга понятия, тесно связанные с живучестью. На самом деле индекс устойчивости к повреждениям очень похож на индекс избыточности.

3. Меры риска.

Предлагается интерпретация живучести, основанная на расчете как прямого риска, связанного с прямыми последствиями, так и косвенного риска, соответствующего косвенным последствиям. Косвенный риск также может быть истолкован как риск, возникающий в результате последствий, непропорциональных причине ущерба. Прямой риск R_{Dir} , и косвенный риск R_{Ind} , можно оценить следующим образом:

$$R_{\text{Dir}} = P(E) \times P(D|E) \times P(\bar{C}|D) \times C_{\text{Dir}}, \quad (9)$$

$$R_{Ind} = P(E) \times P(D|E) \times P(C|D) \times C_{Ind}, \quad (10)$$

где C_{Dir} и C_{Ind} — прямые и косвенные последствия соответственно, а остальные члены имеют тот же смысл, что и в уравнении (1).

Для сценария с несколькими опасностями и с учетом различных типов повреждений уравнения (9) и (10) можно переписать как:

$$R_{Dir} = \int \int C_{Dir} f_{D|E}(y|x) f_E(x) dy dx, \quad (11)$$

$$R_{Ind} = \int \int C_{Ind} P(C|D=y) f_{D|E}(y|x) f_E(x) dy dx, \quad (12)$$

где $f_{D|E}$ — вероятность повреждения при заданном воздействии, f_E — функция плотности вероятности воздействия, $P(C|D=y)$ — вероятность отказа при определенном повреждении. Пределы интегрирования в уравнениях (11) и (12) должны включать x -диапазон возможных воздействий E , и y — диапазон сценариев повреждения D .

Индекс живучести I_{Rob} в этом случае измеряется соотношением между прямым риском и общим риском и определяется как:

$$I_{Rob} = \frac{R_{Dir}}{R_{Dir} + R_{Ind}}. \quad (13)$$

Индекс живучести может принимать значения от нуля до единицы, где единица соответствует очень живучей структуре, связанной с нулевым косвенным риском, и ноль соответствует структуре, в которой прямой риск пренебрежимо мал по сравнению с косвенным риском.

Как видно, такая мера живучести зависит как от прямых, так и от косвенных последствий. Таким образом, это зависит от окружающей среды конструкции и не может рассматриваться как свойство конструкции. Поскольку последствия сильно зависят от социальной и экономической среды, две одинаковые конструкции, построенные в разных средах, дают разные оценки живучести.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагается следующее определение живучести: живучесть — это свойство, которое измеряет степень работоспособности конструкции, сохраняющуюся после ее повреждения.

Для повреждения следует принять следующее определение. Повреждение относится к любому недостатку прочности, появившемуся на этапе проектирования или строительства конструкции, а также к любому снижению прочности, вызванному внешней нагрузкой и/или состоянием окружающей среды в течение срока службы конструкции.

Такое определение живучести не включает никаких ссылок на разрушение, поскольку это лишь одно из возможных последствий повреждения. Таким образом, конструктивные характеристики также следует рассматривать в широком смысле. Смысл состоит в том, чтобы не ограничивать работоспособность конструкции сопротивлением разрушению, а расширить ее до любого показателя эффективности, относящегося либо к предельным состояниям по несущей способности, либо к предельным состояниям при эксплуатации, или к особым состояниям [30].

Однако при рассмотрении экстремальных воздействий сопротивление разрушению является первостепенной характеристикой, а предельные состояния при эксплуатации относятся только к более вероятным воздействиям.

Меры живучести, основанные на повреждении или риске, считаются более подходящими для случаев экстремальных явлений, которые вряд ли произойдут, и когда ожидаются значительные прямые и косвенные последствия. Существует отличие этих случаев от конструктивного старения. Экстремальные события имеют низкую вероятность возникновения $P(E) \approx 0$ и обычно вызывают непропорциональные последствия. С другой стороны, старение почти неизбежно, и, как медленный процесс, в целом ожидаются не столь значимые последствия по сравнению, например, с последствиями теракта. Поэтому меры, ставящие слишком большой упор на эти два аспекта не адекватны сценариям ухудшения.

Поскольку трудно избежать воздействия на конструкции разрушающих агентов и предотвратить связанные с этим повреждения и старение, оценка живучести, основанная на конструктивных характеристиках поврежденной конструкции, тесно связана с $P(C|D)$ и независима от причин повреждения, представляется более подходящим. Предлагаемая оценка живучести также должна определять повреждение как непрерывную переменную из-за непрерывного характера процесса старения.

Важность рассмотрения повреждения как непрерывного процесса обусловлена не только природой процесса старения, но и тем, что конструкция может вести себя эффективно при уровне повреждения, демонстрируя при этом внезапное обрушение при несколько более высоком уровне повреждения.

Чтобы избежать недостаточной чувствительности оценки живучести, можно нормировать как конструктивные характеристики, так и повреждения. Таким образом, индекс живучести R для конкретных характеристик и типа повреждения может быть задан площадью под кривой, определяющей нормированные характеристики конструкции $f(D)$ в зависимости от нормированного повреждения D в виде:

$$R = \int_{D=0}^{D=1} f(x)D(x). \quad (14)$$

Предлагаемый индекс живучести R может варьироваться от 0 до 1 для нулевых и полностью живучих конструкций, соответственно. Для промежуточных случаев, если минимальный уровень повреждения приводит к значительной потере характеристик конструкции, как показано на рисунке 6(а), то конструкцию можно считать недостаточно живучей. С другой стороны, если конструкция способна поддерживать адекватные уровни работоспособности, даже если повреждения увеличиваются, как показано на рис. 6 (с), то конструкцию можно считать живучей. Рисунок 6(б) представляет промежуточную живучесть между случаями (а) и (с).

Сложность предлагаемой оценки зависит от показателя, используемого для измерения работоспособности конструкции $f(D)$. Если используется простой индикатор, то предлагаемый индекс, по сути, достаточно прост. Например, если показателем работоспособности является несущая способность конструкции $L(D)$, то $f(D)$ можно получить через соотношение $L(D = d) / L(D = 0)$, где D — любой сценарий повреждения в результате экспозиции. В этом случае R будет представлять собой среднюю нормированную несущую способность поврежденной конструкции.

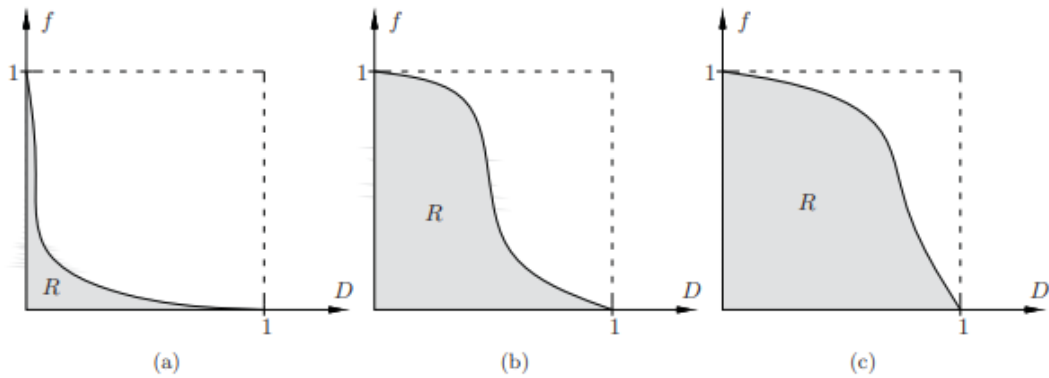


Рисунок 6. Нормированная характеристика конструкции f в зависимости от нормированного повреждения d .
 а) минимальная живучесть; (b) промежуточная живучесть; (c) максимальная живучесть
Figure 6. Normalized structural performance, f , as a function of normalized damage d .
 (a) minimum robustness; (b) intermediate robustness; (c) maximum robustness

С другой стороны, если $f(D)$ основывается на более сложном показателе эффективности, сложность модели возрастает.

Если выбранный показатель эффективности представляет собой вероятность обрушения, а повреждение может принимать только одно значение, то $f(D)$ можно определить как отношение $f(D) = P(C | D = 0) / P(C | D = d)$, став индексом устойчивости к повреждениям.

Поскольку предлагаемая оценка основана на нормированной работоспособности, предлагаемый индекс живучести не может отражать, способна ли конструкция в неповрежденном или поврежденном состоянии работать в соответствии с проектными задачами. Затем проводится оценка живучести путем сравнения предложенного показателя с конструктивными характеристиками, определенными для неповрежденной конструкции на этапе проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье была принята перспектива определения живучести как неотъемлемого свойства конструкции, связанного с устойчивостью к локальным повреждениям, и было предложено новое определение и соответствующий показатель.

Предлагаемая оценка живучести обеспечивает среднее значение характеристик поврежденной конструкции с учетом всех возможных сценариев повреждения. В результате была получена относительная оценка живучести, которую можно использовать для сравнения устойчивости к повреждениям различных типов конструкций и определения более живучих. Чтобы расширить область применения предлагаемой оценки, можно использовать различные показатели эффективности, связанные либо с предельным состоянием, либо с предельным состоянием эксплуатации, либо с конкретными задачами проектирования.

Предложенная оценка живучести обеспечивает объективную меру снижения работоспособности поврежденной конструкции по отношению к неповрежденной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Бухтиярова А.С. Живучесть нагруженных и коррозионно повреждаемых рамно-стержневых железобетонных конструкций при внезапной потере устойчивости несущих элементов. Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 42-47.
2. Бухтиярова А.С., Колчунов В.И., Прасолов Н.О. Расчет обобщенного параметра живучести железобетонной рамно-стержневой конструктивной системы при внезапной потере устойчивости несущего элемента. Строительство и реконструкция. 2013. № 6 (50). С. 9-12.

3. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой. Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
4. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий. Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 819-830.
5. Люблинский В.А., Тамразян А.Г. Безопасность несущих систем многоэтажных зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов. В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: В семи томах. 2014. С. 90-99.
6. Емельянов С.Г., Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика определения параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 252-258.
7. Андросова Н.Б., Ключева Н.В., Колчунов В.И. Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений. Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2011. № 15. С. 17-25.
8. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений. Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 77-83.
9. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Емельянов С.Г. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн. Жилищное строительство. 2018. № 12. С. 3-7.
10. Колчунов В.И., Федорова Н.В. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях. Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 1 (16). С. 115-119.
11. Baker, J.W., Schubert, M. and Faber, M.H. On the assessment of robustness, Structural Safety, 30(3):253–267, 2008.
12. Starossek, U. and Haberland, M. Approaches to measures of structural robustness. Structure and Infrastructure Engineering, 7(7-8):625–631, 2011.
13. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. В сборнике: E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. С. 04005.
14. Тамразян А.Г. Ресурс живучести - основной критерий проектных решений высотных зданий. Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 15-18.
15. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием. Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 92-100.
16. Ключева Н.В., Федоров В.С. К анализу живучести внезапно повреждаемых рамных систем. Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 3 (205). С. 7-13.
17. Agarwal, J., England, J. and Blockley, D. Vulnerability analysis of structures. Structural Engineering International, 16(2):124–128, 2006.
18. Алексейцев А.В. Анализ устойчивости колонны при горизонтальных ударных воздействиях // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12.
19. Sorensen, J.D. and Christensen, H.H. Danish Requirements for Robustness of Structures: Background and Implementation. Structural Engineering International, 16(2):172–177, 2006.
20. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований. Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46-54.
21. Меркулов С.И. К вопросу обеспечения живучести железобетонных конструкций и конструктивных систем. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 2. С. 63.
22. Келасьев Н.Г., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Леонтьев Е.В., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Конструктивные решения защиты одноэтажных каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 17-22.
23. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения.
24. ГОСТ Р 22.2.02-2015 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Оценка риска чрезвычайной ситуации при разработке проектной документации объектов капитального строительства.
25. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
26. СП 63.13330.2018 "СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения" (с изменениями N 1, N 2).
27. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов - необходимое условие безопасности зданий и сооружений. Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". 2009. № 1. С. 160-171.

28. Oliver, J., Huespe, AE, Pulido, MDG and Chaves, E. From continuum mechanics to fracture mechanics: the strong discontinuity approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(2):113–136, 2002.

29. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: Научное издание. -М.: Издательство ассоциации строительных вузов. 2004. 216 с.

30. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций при аварийных воздействиях. *Вестник НИЦ Строительство*. 2018. № 1 (16). С. 120-125.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Bukhtiyarova A.S. Survivability of loaded and corrosion-damaged frame-rod reinforced concrete structures in case of sudden loss of stability of load-bearing elements. *Industrial and civil construction*. 2013. No. 12. Pp. 42-47.

2. Bukhtiyarova A.S., Kolchunov V.I., Prasolov N.O. Calculation of the generalized parameter of survivability of a reinforced concrete frame-rod structural system in the event of a sudden loss of stability of a bearing element. *Building and reconstruction*. 2013. No. 6 (50). Pp. 9-12.

3. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Analysis of the reliability of a reinforced concrete slab with corroded reinforcement. *Building and reconstruction*. 2022. No. 1 (99). Pp. 89-98.

4. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimal design of load-bearing structures of buildings, taking into account the relative risk of accidents. *Vestnik MGSU*. 2019. V. 14. No. 7. Pp. 819-830.

5. Lublinsky V.A., Tamrazyan A.G. Safety of load-bearing systems of multi-storey buildings with local changes in the stiffness characteristics of load-bearing elements. In the collection: Concrete and reinforced concrete - a look into the future. Scientific works of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: In seven volumes. 2014. S. 90-99.

6. Emelyanov S.G., Klyueva N.V., Korenkov P.A. Method for determining the parameters of survivability of reinforced concrete frames of multi-storey buildings. News of higher educational institutions. *Technology of the textile industry*. 2016. No. 3 (363). Pp. 252-258.

7. Androsova N.B., Klyueva N.V., Kolchunov V.I. Some proposals for the normalization of the parameters of the survivability of structures. Bulletin of the Department of Building Sciences of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. 2011. No. 15. Pp. 17-25.

8. Tamrazyan A.G. Recommendations for the development of requirements for the survivability of buildings and structures. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 2-1. Pp. 77-83.

9. Savin S.Yu., Fedorova N.V., Emelyanov S.G. Analysis of the survivability of prefabricated-monolithic frames of multi-storey buildings from reinforced concrete panel-frame elements under emergency impacts caused by the loss of stability of one of the columns. *Zhilishchnoe stroitelstvo*. 2018. No. 12. Pp. 3-7.

10. Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Some problems of survivability of reinforced concrete structural systems under emergency impacts. *Bulletin of NIC Construction*. 2018. No. 1 (16). Pp. 115-119.

11. Baker, J.W., Schubert, M. and Faber, M.H. On the assessment of robustness. *Structural Safety*. 2008. 30(3):253–267.

12. Starossek, U. and Haberland, M. Approaches to measures of structural robustness. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2011. 7(7-8):625–631.

13. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences*. 2019. P. 04005.

14. Tamrazyan A.G. The survivability resource is the main criterion for design solutions for high-rise buildings. *Zhilishchnoe stroitelstvo*. 2010. No. 1. Pp. 15-18.

15. Fedorova N.V., Phan D.K., Nguyen T.Ch. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement. *Building and reconstruction*. 2020. No. 1 (87). Pp. 92-100.

16. Klyueva N.V., Fedorov V.S. On the analysis of the survivability of suddenly damaged frame systems. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2006. No. 3 (205). Pp. 7-13.

17. Agarwal, J., England, J. and Blockley, D. Vulnerability analysis of structures. *Structural Engineering International*. 2006. 16(2):124–128.

18. Alekseytsev A.V. Analysis of column stability under horizontal impact. *Reinforced concrete structures*. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 3–12.

19. Sorensen, J.D. and Christensen, H.H. Danish Requirements for Robustness of Structures: Background and Implementation. *Structural Engineering International*, 16(2):172–177, 2006.

20. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leontiev E.V. Protection of buildings and structures from progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and civil construction*. 2019. No. 2. Pp. 46-54.

21. Merkulov S.I. On the issue of ensuring the survivability of reinforced concrete structures and structural systems. *News of higher educational institutions. Construction*. 2015. No. 2. P. 63.

22. Kelasiev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Leontiev E.V., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Constructive solutions for the protection of one-story frame buildings from progressive collapse. *Industrial and civil construction*. 2021. No. 3. Pp. 17-22.
23. SP 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements.
24. GOST R 22.2.02-2015 Safety in emergency situations. Emergency risk management. Assessment of emergency risk in the development of project documentation for capital construction projects.
25. GOST 27751-2014 Reliability of building structures and foundations. Basic provisions.
26. SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions" (as amended N 1, N 2).
27. Tamrazyan A.G. Assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Vestnik TsNIISK them. V.A. Kucherenko "Research on the theory of structures"*. 2009. No. 1. Pp. 160-171.
28. Oliver, J., Huespe, AE, Pulido, MDG and Chaves, E. From continuum mechanics to fracture mechanics: the strong discontinuity approach. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002. 69(2):113–136.
29. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovsky K.P. Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond-design impacts: Scientific publication. Moscow: Publishing house of the association of construction universities. 2004. 216 p.
30. Kodysh E.N., Trekin N.N. Special limiting state of reinforced concrete structures under emergency impacts. *Bulletin of NIC Construction*. 2018. No. 1 (16). Pp. 120-125.