



УДК 624.3.019.32

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.3-17

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Методология теоретических основ живучести строительных систем

А.Г. Тамразян^{1*}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

* tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: строительные системы, живучесть, надежность, повреждающий фактор, прогрессирующее разрушение, работоспособность, отказоустойчивость

История статьи

Поступила в редакцию: 02.02.2025

Доработана: 22.02.2025

Принята к публикации: 27.02.2025

Для цитирования

Тамразян А.Г. Методология теоретических основ живучести строительных систем // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 3–17.

Аннотация. Объекты строительства являются результатом глубоких научных разработок и обладают функциями, качествами и свойствами, которые изучаются и уточняются на протяжении их эксплуатации. Несмотря на высокие стандарты обеспечения безопасности зданий различного назначения, отмечается неуклонный рост числа и тяжести аварий различного происхождения. Происходит качественное изменение угроз, в частности военных, которые по масштабам сравнимы с природными стихийными бедствиями. Повышение требований к их безопасности в настоящее время вошло в противоречие с обеспечивающими эти требования материально-техническими, финансовыми и научно-методическими ресурсами. Статистика крупных аварий и катастроф свидетельствует о том, что возможности парирования угроз, несмотря на достижения научно-технического прогресса, оказались или ограниченными, или фактически исчерпанными. Указанные обстоятельства требуют пересмотра традиционных подходов к проблеме и приводят к формулировке новых концепций и представлений в области безопасности. Основное внимание уделяется конструкционным аспектам, определяющим общий уровень безопасности строительных систем.

Наиболее разработанными в научном плане являются задачи оценки и обеспечения прочности, ресурса и надежности конструкций, задачи же обеспечения защищенности, живучести и оценки риска требуют дальнейшего научного развития.

Methodology of Theoretical Bases of Robustness of Building Systems

A.G. Tamrazyan^{1*}

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

* tamrazian@mail.ru

Keywords: building systems, robustness, reliability, damage factor, progressive collapse, performance, failure tolerance

Abstract. Building objects are the result of in-depth scientific research and have functions, qualities and properties that are learnt and refined during their operation. Despite the high standards of safety of buildings for various purposes, there is a steady increase in the number and severity of accidents of various origins.

Ашот Георгиевич Тамразян, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2025



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

Article history

Received: 02.02.2025

Revised: 22.02.2025

Accepted: 27.02.2025

For citation

Tamrazyan A.G. Methodology of Theoretical Bases of Robustness of Building Systems. *Reinforced concrete structures*. 2025; 1(9):3-17.

There is a qualitative change in threats, in particular military threats, which are comparable in scale to natural disasters. Increasing requirements to their safety are now in contradiction with the material, technical, financial and scientific-methodological resources that ensure these requirements. The statistics of major accidents and disasters shows that despite the achievements of scientific and technological progress, the possibilities of threat parity have either been limited or actually exhausted. These circumstances require a revision of traditional approaches to the problem and have led to the formulation of new concepts and ideas in the field of safety. The main attention is paid to structural aspects that determine the overall level of safety of building systems. The most scientifically developed are the tasks of assessing and ensuring the strength, service life and reliability of structures, while the tasks of ensuring safety, robustness and risk assessment require further scientific development.

ВВЕДЕНИЕ

К числу особо важных и широко исследуемых свойств строительных систем относятся надежность и безопасность [1]. Безопасность строительных систем рассматривается как комплексное свойство, оцениваемое функционалом $S(t)$, включающим расчетно-экспериментальные характеристики прочности $F(t)$, ресурса $N(t)$, надежности $P(t)$, защищенности $Z(t)$, живучести $L(t)$ и риска $R(t)$ [2]:

$$S(t) = \{F(t), N(t), P(t), Z(t), L(t), R(t)\}. \quad (1)$$

В последние годы существенно возрос интерес к проблеме обеспечения живучести (robustness) строительных конструкций в особых расчетных ситуациях. До недавнего времени термин «живучесть» использовался, в основном, применительно к объектам машиностроения и ряду инженерных систем (например, систем тепло-, газо- и электроснабжения, военной техники, самолетов, кораблей и т.д.). При этом под живучестью понимали «свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов» [3].

Определение свойства живучести конструкции введено в Еврокоде [4]. В соответствии с этим живучесть — свойство конструкции противостоять таким событиям, как пожар, взрыв, удар или результат человеческих ошибок, без возникновения повреждений, которые были бы непропорциональны причине, вызвавшей повреждения. И в соответствии с Еврокодом [4] одной из стратегий для ограничения масштабов локального разрушения является применение расчетных и конструктивных правил, обеспечивающих приемлемую живучесть конструкции.

К этой проблеме непосредственно примыкает обеспечение устойчивости конструкции зданий и сооружений к «прогрессирующему» разрушению при запроектных аварийных воздействиях [5, 6]. Под «прогрессирующим» обрушением понимается «последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей» [2].

Внесение в технические нормативно-правовые акты положений о необходимости учета при проектировании этой проблемы вызывает у некоторых специалистов возражения. Эти возражения, в основном, сводятся к тому, что потребуются значительное увеличение материало-емкости конструкций.

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

Во время эксплуатации строительной системы возможно ненормативное (экстремальное, аварийное и т.п.) возрастание нагрузок или чрезвычайно быстрый рост повреждений. В этих условиях эксплуатационные качества конструкции определяются ее живучестью, т.е. способностью оказывать сопротивление внешним силам, когда несколько элементов системы выйдут из строя. Системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность. Поэтому всегда имеется время для их ремонта. Системы с малой живучестью разрушаются катастрофически, что зачастую сопровождается большими материальными потерями и гибелью людей.

Следовательно, при проектировании конструкций, строительных систем необходимо учитывать экстремальные ситуации и прогнозировать живучесть систем, находя затем конструктивные решения для повышения их живучести, чтобы избежать катастрофических разрушений.

Основная причина сложности данной проблемы заключается в невозможности обеспечения абсолютной защиты конструкций. Как следствие, дискуссию вызывают следующие вопросы:

- как назначать требуемый уровень надежности для сооружения в особых расчетных ситуациях?
- какие виды и параметры особых воздействий необходимо учитывать при проектировании объектов?

Несмотря на актуальность проблемы живучести, в настоящее время отсутствуют соответствующие методики и расчеты живучести конструкций. В рамках данной статьи сделана попытка формализовать задачу живучести и разработать методические положения для ее решения.

В результате действия экстремальных нагрузок, накопления повреждений, деградации материала и тому подобных причин уменьшается способность строительной системы сопротивляться внешним воздействиям.

Живучесть — это свойство строительной системы, определяющее ее способность сохранять по крайней мере ограниченную несущую способность при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению (уменьшению) ее несущей способности и стойкости к прогрессирующему обрушению.

Поиск путей обеспечения живучести строительных объектов различного назначения требует постановки и решения ряда научно-технических задач синтеза живучих строительных систем на этапах их проектирования, строительства и эксплуатации. Отмеченное иллюстрирует технико-экономический аспект актуальности освоения и внедрения в практику теоретических основ живучести строительных систем.

Значительный вклад в разработку вопросов теории живучести различных, в том числе строительных, систем различного назначения внесли работы В.О. Алмазова [7], В.И. Колчунова [8], В.Ф. Крапивина [9], Н.В. Федоровой [10], Ю.И. Кудишина [11], М. Парфенова [12], Б.С. Расторгуева [13], И.А. Рябикина [14], Н.Н. Трекина [15], Б.С. Флейшмана [16], а также зарубежных ученых [17–20] и др.

Анализ этих и других работ позволяет отметить тенденцию постепенного перехода в оценке показателей живучести строительных систем к более совершенным, основанным на моделях с учетом структурных, функциональных факторов.

С учетом опыта представления теоретических основ различных свойств строительных систем, таких как надежность, безопасность и т.п., разработка данной статьи подчинена освещению методологии исследования и формирования теоретических основ живучести строительных систем.

МЕТОД

1. Основные понятия, определения и допущения

Теория живучести строительных систем проходит стадию становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину. В связи с этим в специальной и методической литературе по данному предмету наблюдается многообразие вариантов определений и терминов, составляющих структуру складывающейся теории. Кроме многообразия, наблюдаются и признаки некоторых понятий.

Отмеченное положение вынуждает кратко рассмотреть и изложить систему понятий и определений в теоретических основах живучести с учетом их популярности среди специалистов, максимального приближения к физическому смыслу и потребностей новых разработок.

Под *теорией живучести* будем понимать комплекс научных знаний о закономерностях сохранения строительной системой определенного качества при повреждении ее элементов и о способах обеспечения данного свойства.

Согласно ГОСТу [3], *повреждение* — событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации.

Повреждения могут быть существенными, приводящими к изменению состояния элементов, и несущественными. Будем в дальнейшем учитывать только существенные повреждения.

Элементы системы могут находиться в двух состояниях: работоспособном (r) и неработоспособном ($\bar{r}$).

Переход состояний элементов возможен в обоих направлениях:

- $r \rightarrow \bar{r}$ — при повреждении элемента;
- $r \leftarrow \bar{r}$ — при восстановлении его работоспособности.

Повреждения являются следствием:

- аварий;
- боевых (террористических) воздействий;
- условий внешней среды;
- эксплуатации.

Для удобства изложения общих вопросов теоретических основ живучести строительных систем введем понятие «*повреждающий фактор*» (ПФ) — определенный вид внешнего воздействия, параметры которого превышают значения, на которые рассчитан элемент строительной системы при его проектировании.

Свойство элемента сохранять состояние работоспособности при воздействии ПФ будем называть стойкостью. Ясно, что при наличии временной избыточности стойкость элемента может обеспечиваться не только его защитой или упрочением, но и восстановлением работоспособности.

Под *эксплуатационной средой* будем понимать совокупность параметров ПФ, воздействующих на элементы системы как природного, так и техногенного происхождения.

С повреждениями элементов систем тесно связано понятие *ущерба*, который характеризуется людскими, материальными потерями. В задачах исследования и оптимизации систем по критерию живучести пользуются терминами «предельный ущерб» (наибольший допустимый) и «предотвращенный ущерб» (величина, на которую уменьшается ущерб за счет восстановительных мер).

Подход к формализации состояний систем в теории живучести существенно отличается от принятого в теории надежности. Требование работоспособности, принятое в исследованиях систем на надежность [21], слишком жесткое для оценок свойства живучести. Легко допустить, что системы, утратившие работоспособность, т.е. соответствие по всем параметрам требованиям норм, могут располагать остаточными возможностями. Следовательно, на множестве отказов, с точки зрения надежности,

могут быть выделены состояния, допускающие решение системой задачи стойкости к прогрессирующему разрушению с заданной эффективностью. Назовем эти состояния *состояниями способности*.

Такой подход дает возможность рассматривать системы в двух состояниях — способности (c) и неспособности ($\bar{c}$).

Итак, при воздействии ПФ часть элементов системы неизбежно получит повреждения. Возникает вопрос — сохранит ли система состояние способности решить задачу стойкости к прогрессирующему разрушению? На этот вопрос дает ответ теория живучести, в основе которой лежит определение данного свойства, и существует большое многообразие определений живучести [9, 14, 22–26].

Рассмотрение вариантов определений, распространенных в кораблестроении, самолетостроении, машиностроении и других отраслях, позволяет выделить общее, характерное свойству живучести различных систем, в том числе строительных, и сформулировать единое определение.

Общим является:

- живучесть — составляющая качества, характеризующая изменение свойств строительной системы, эксплуатирующейся в нерасчетных условиях;
- если строительная система обладает живучестью, то ее качество полностью не утрачивается при воздействии ПФ;
- если строительная система располагает резервом функционирования, то возможно полное или частичное восстановление ее способности эффективно эксплуатироваться.

С учетом отмеченных совпадений предлагается следующее определение живучести — свойство, характеризующее способность строительных систем эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) или восстанавливать данную способность.

Из определения следует, что состояние способности при воздействии ПФ строительная система может сохранить за счет внутренних потенциальных резервов (избыточностей) или в результате восстановительных мер.

В задачах исследования живучести, как следует из определения, важно иметь «механизм» идентификации состояний способности строительных систем.

2. Методологический аспект теоретических основ живучести строительных систем

Формирование теоретических основ живучести с учетом опыта проведения подобных исследований [27–29], а также в смежных областях [9, 30] предполагает ряд направлений научного поиска.

Последовательность формирования теоретических основ живучести строительных систем осуществляется на трех уровнях: методологическом, моделирования и оценки обеспечения живучести этих систем.

Методологический уровень, кроме определения свойства живучести систем, его характеристик и некоторых количественных мер, предполагает установление взаимосвязи данного свойства с другими свойствами систем. В конечном счете знание этой взаимосвязи позволяет обоснованно выбрать показатели живучести строительных систем.

Общность предмета исследования и «похожесть» условий, при которых изучается данный предмет в теории надежности и теории живучести, определяют необходимость выявления «зон значимости» этих научных дисциплин.

Пусть качество строительной системы характеризуется вектором параметров $\vec{K}(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)$, значения которых изменяются под воздействием среды. Если эти воздействия расчетные, то отклонение параметров вектора K хотя и носит случайный характер, однако прогнозируется на уровне вероятностных моделей и хорошо изучено. Пусть K_n — вектор параметров строительной системы, характеризующий ее состояние, отвечающее требованиям норм. Для избыточных

систем характерно $K_n > K$, что обеспечивается различными видами избыточностей (n -раз статически неопределимых). Для неизбыточных систем, очевидно, $K_n = K$. В случае, когда по каким-либо причинам изменяются параметры качества строительной системы, так что $K_n < K$, система деградирует, т.е. теряет качество.

Естественно, что процессы, сопровождающиеся изменением качества системы от $K_n \in K$ до $K \in K_n$, могут протекать как в «нормальных» расчетных условиях, так и в нерасчетных. В расчетных условиях данные изменения являются следствием отказов элементов системы. При этом исследованием закономерностей, связанных с анализом и синтезом работоспособных систем, занимается теория надежности.

В том случае, когда требование сохранения строительной системой работоспособного состояния снимается полностью или заменяется требованием сохранения состояния способности, возникает необходимость в решении исследовательских задач при условии накопления отказов элементов. Свойство систем сохранять состояние способности при отказах элементов называют отказоустойчивостью. В работе [12] утверждается, что определение данного свойства строительных систем должно увязываться с состоянием их работоспособности. На взгляд авторов, это утверждение только частично характеризует свойство отказоустойчивости. Представляет научный интерес исследование динамики изменения качества строительной системы в области $K < K_n$.

Теоретические основы отказоустойчивости как научная дисциплина должны давать возможность для анализа и синтеза систем, способных сохранять качество на заданном уровне или допускать его восстановление при многочисленных отказах элементов.

Физический смысл свойства отказоустойчивости близок к свойству живучести строительных систем.

Отличие заключается в том, что последнее оценивается в условиях нерасчетных внешних воздействий, приводящих к отказам элементов вследствие их повреждения. Модели повреждения основываются на сопоставлении параметров, характеризующих проектную прочность и защиту элементов, с параметрами принятой в качестве стандартной модели внешнего нерасчетного воздействия ПФ. Модели отказов элементов, принятые в теории надежности и отказоустойчивости, здесь неприемлемы. В моделировании состояний способности систем, в вычислениях вероятностных функций и показателей свойств отказоустойчивости и живучести систем много общего.

Таким образом, свойства надежности, отказоустойчивости и живучести систем могут исследоваться и обеспечиваться в условиях, как показано в таблице.

Условия проявления свойств надежности, отказоустойчивости и живучести
Conditions of occurrence of reliability, failure tolerance and survivability properties

Воздействия Состояния	Расчетные	Нерасчетные
	Надежность	Живучесть
	Отказоустойчивость	
Работоспособности		
Способности		

Уровень методологических исследований включает также решение задачи обоснования характеристик живучести строительных систем.

Решение данной задачи предполагает учет всех составляющих качества систем, так или иначе определяющих свойство живучести, и синтезирование их в комплексные или частные характеристики.

Комплекс задач третьего уровня исследований, объединенных в блок «обеспечение свойства живучести», ориентирован на разработку теоретических основ синтезирования свойства живучести систем различных типов в ходе их совершенствования или проектирования.

Важным этапом является выбор показателя живучести систем, который в значительной степени связан с определением свойства живучести, и достаточной критичности показателя. Данный этап предполагает подробное рассмотрение взаимосвязи свойства живучести как «вверх» (к эффективности функционирования системы), так и «вниз» (к характеристикам данного свойства).

Формирование теоретических основ живучести строительных систем на уровне моделирования и оценки предполагает:

- решение задач моделирования свойства живучести строительных систем различных типов. Основу данных моделей составляют «механизмы» идентификации состояний способности строительных систем с учетом их особенностей и подход к оцениванию возможности реализации хотя бы одного из них в условиях действия ПФ;
- разработку методик количественной оценки показателей живучести систем различных типов, основанных на соответствующих моделях и подходах.

3. Характеристики живучести систем

Живучесть (равно как и надежность, отказоустойчивость и т.п.) является комплексным свойством. Комплексный характер данного свойства определяется тем, что оно проявляется через возможность сохранять или восстанавливать состояние способности при воздействии ПФ. Если обратиться к определению живучести, то можно заметить, что в нем содержатся два ключевых слова: «сохранять» и «восстанавливать». Эти слова, очевидно, должны составить основу для формирования списка характеристик живучести строительных систем.

Задача определения характеристик живучести сводится к описанию или дальнейшей детализации таких «характерных черт» данного свойства, как «сохранять» и «восстанавливать» состояние способности. При этом необходимо также учитывать наиболее общие требования, которые предъявляют к характеристикам и тем вносят определенный порядок в данный раздел научного поиска [31, 32]. Применительно к характеристикам живучести эти требования должны:

- 1) давать наглядное физическое представление о проявлении свойства живучести в интересующих исследовании условиях;
- 2) допускать количественную оценку с помощью соответствующего показателя аналитическими или экспериментальными методами;
- 3) отображать наиболее существенные черты свойства живучести, проявляемые через свойства элементов и структуры системы.

Имея в виду ключевые слова в определении свойства живучести — «сохранять» и «восстанавливать», а также перечисленные требования, структуру характеристик живучести строительных систем можно представить схемой (рис. 1).

Неуязвимость характеризует свойство системы сохранять состояние способности при получении повреждений от воздействия ПФ.

Очевидно, количество таких повреждений зависит от стойкости элементов системы, а эффект их влияния на ее состояние — от степени конструктивной избыточности.

Частными характеристиками неуязвимости строительных систем могут рассматриваться *стойкость* и *конструктивная избыточность*.

Стойкость характеризует способность строительной системы сохранять состояние способности функционировать при воздействии ПФ.

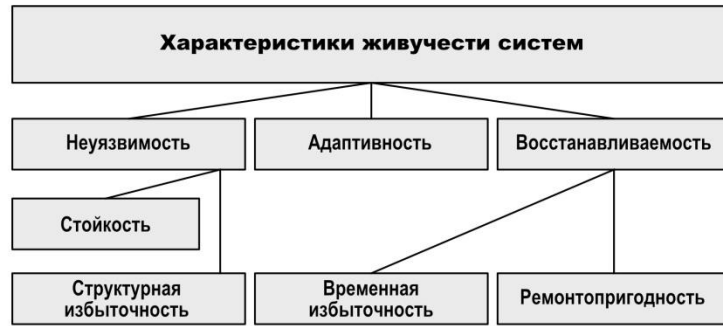


Рис. 1. Структура характеристик живучести строительных систем
Fig. 1. Structure of robustness characteristics of building systems

Частными характеристиками стойкости строительной системы являются: ударостойкость, сейсмостойкость, огнестойкость, коррозионная стойкость, стойкость к прогрессирующему обрушению и т.д. Стойкость — адресная характеристика, так как всегда уязвляется с физической природой конкретного поражающего фактора.

Конструктивная избыточность характеризует неуязвимость строительных систем, обеспечиваемую наличием в структуре резерва ключевых элементов. Количественной мерой данной характеристики может служить степень конструктивной избыточности, например отношение числа ключевых элементов системы к минимально необходимому для ее функционирования.

Адаптивность характеризует свойство системы предотвращать развитие вторичных обрушений и формировать состояние способности функционирования на основе остаточного ресурса.

Адаптация — приспособление и функция строительной системы к условиям эксплуатации.

Приспособление к условиям эксплуатации достигается средствами адаптации, назначение которых заключается в предотвращении развития вторичных обрушений строительной системы за счет развития пожара, взрыва и т.п. Цель адаптации на этапе приспособления строительной системы заключается в сохранении от вторичных обрушений остаточного ресурса системы.

Количественная оценка адаптивности системы к условиям обрушения затруднительна из-за сложности выбора соответствующего показателя.

Существует принципиальная возможность оценки вероятных сценариев протекания адаптационного процесса, что может явиться основой для формирования показателя адаптивности. Очевидно, данный вопрос следует отнести в разряд проблемных для последующих исследований. Заметим, однако, что характеристики, которые не могут быть оценены количественно, имеют право на существование и практическое использование. Как, например, в ГОСТе [33] — ремонтпригодность (характеристика надежности), оценка которой проблематична и неоднозначна для строительных объектов.

Восстанавливаемость характеризует приспособленность строительной системы восстанавливать живучесть за счет внутренних ресурсов.

Данная характеристика живучести проявляется в том случае, когда остаточный ресурс системы достаточен для формирования хотя бы одного состояния способности. Формирование данного состояния может осуществляться путем адаптации остаточного ресурса или проведения восстановительного ремонта.

Частной характеристикой восстанавливаемости является ремонтпригодность.

Ремонтопригодность строительной системы в условиях, созданных действием ПФ, основывается на средствах диагностики и возможности восстановления живучести.

Средства диагностики предназначены для определения текущего технического состояния системы (возможности остаточного ресурса) и выработки методов восстановления.

Количественная оценка ремонтнопригодности строительных систем возможна с учетом научного прогноза текущего состояния остаточного ресурса, эффективности и восстановительных возможностей.

Подходы к учету восстановительных возможностей систем составляют проблемную научно-техническую задачу. В связи с этим многообразие систем разделим на два подмножества:

- восстанавливаемые системы;
- невозстанавливаемые системы.

Данное разделение, которое (по существу) граничит с допущением, дает возможность разработки вопросов теории живучести строительных систем с оговоркой области их применения.

Рассмотренные характеристики могут использоваться в исследовательских и прикладных задачах отдельно, как независимые. При этом полученные результаты носят частный характер и имеют ограниченное применение.

Учет всего комплекса характеристик и их взаимозависимости в моделях живучести приближает оценку данного свойства систем к абсолютной.

4. Показатели живучести систем

Выбор показателей живучести — важный и ответственный этап формирования теоретических основ данного свойства строительных систем. Процесс выбора сопряжен с необходимостью удовлетворения ряда требований, предъявляемых к показателям, часть из которых носит противоречивый характер. Удовлетворение противоречий в данном случае возможно путем компромисса, а также использования в ряде специфических задач строительной системы частных показателей, область использования которых ограничена.

Выбор показателей живучести строительных систем удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) по смысловому содержанию выбор должен соответствовать определению свойства живучести систем;
- 2) показатель должен обеспечивать возможность разработки моделей живучести систем, доступных для проведения исследований и выполнения расчетов;
- 3) показатель должен быть чувствительным к процедурам на уровне характеристик свойства живучести.

Безусловно, наиболее сложна реализация требований п. 2 из-за их противоречивости. Для определения возможного компромисса рассмотрим составляющие качества строительных систем на различных иерархических уровнях.

Уровень функционирования по назначению может считаться высшим уровнем, обеспечивающим комплексную оценку качества строительной системы. Выбор показателя живучести на данном уровне гарантирует исследованию признаки системного подхода.

Однако следует признать, что этап моделирования (требование п. 2) в этом случае представляется весьма сложным, так как модель живучести затрудняется моделями готовности системы и способов использования ее по назначению.

Поиск возможного компромисса между желанием обеспечить системный характер исследования и необходимостью разработки достаточно простых и рабочих моделей живучести сопряжен с анализом компонентов качества строительных систем в двух встречных направлениях: «сверху» — от уровня функционирования строительных систем по назначению и «снизу» — от характеристик строительных систем.

Анализ проявления свойства живучести системы на «верхнем» уровне предполагает рассмотрение структуры показателя успешности функционирования данных систем по назначению (P), который, в общем, может быть представлен выражением:

$$P = P\{U[y_k]; \Pi[n_j]; \Gamma[g_i] \Leftrightarrow H[h_m]_n \Leftrightarrow H[h]_p\}, \quad (2)$$

где $U[y_k]$ — множество параметров, характеризующих условия, в которых осуществляется эксплуатация строительных систем (коррозионная среда, сейсмичность, особенности грунтовых условий и т.д.);

$\Pi[n_j]$ — множество параметров, характеризующих физическую природу ПФ (природную, техногенную, военную) и их возможности;

$\Gamma[g_i]$ — множество параметров, характеризующих готовность системы к нормальной эксплуатации (надежность и т.д.);

$H[h_m]_n$ — множество характеристик назначения системы, реализуемых в условиях воздействия ПФ;

$H[h]_p$ — множество характеристик назначения системы, необходимых для выполнения ею функций с вероятностью не ниже заданной (P_s).

Заметим, что исследование живучести имеет смысл только в отношении систем, находящихся в состоянии готовности. Очевидно, что неприятие этого допущения нарушает однозначность оценок, так как состояний неготовности систем может быть бесконечное множество.

С позиции «верхнего» уровня оценки качества системы показатель живучести (G) может представлять собой оценку возможности сохранить системой состояние способности.

Выполненный анализ убеждает в том, что показатель живучести может быть увязан в ходе логических рассуждений и моделирования с состоянием способности системы.

Данный вывод согласуется с определением свойства живучести (требование п. 1), приведенным выше.

Свойство живучести связано с состоянием способности системы, но связь эта достаточно сложная.

Рассмотрим совокупность свойств строительной системы, в достаточной степени определяющих ее состояние способности. Для большей определенности выделим комплексные и частные свойства системы. К комплексным отнесем:

- свойство устойчивости — свойство системы сохранять характеристики назначения и ресурсы в заданных условиях;
- свойство соответствия — свойство системы удовлетворять (соответствовать) своими характеристиками назначения требованиям, обеспечивающим стойкость к прогрессирующему обрушению;
- свойство достаточности — свойство системы, определяемое наличием остаточных ресурсов, необходимых для обеспечения стойкости к прогрессирующему обрушению.

Вводя в обращение данные определения, автор допускает, что система находится в состоянии способности, если ее текущее состояние по характеристикам назначения и по ресурсам способно обеспечить стойкость к прогрессирующему обрушению в заданных условиях внешних воздействий (природных, техногенных, боевых или аварийных).

Устойчивость системы в условиях, когда воздействие ПФ носит целенаправленный характер (боевые условия, атаки БПЛА, терроризм), определяется ее защищенностью, живучестью

или совокупностью этих свойств. В условиях, когда воздействие ПФ носит нецеленаправленный характер (стихийные бедствия, аварии и т.п.), устойчивость системы определяется ее способностью защищаться и живучестью.

Последовательность проявления свойств устойчивости системы при целенаправленном воздействии ПФ, выводящем систему из состояния способности, свойство живучести является «последней возможностью» строительной системы уцелеть, т.е. сохранить состояние способности.

Приемлемость такого допущения в отношении свойства живучести обосновывается тем фактом, что данное свойство систем проявляется только тогда, когда под воздействием ПФ элементы системы теряют работоспособность (т.е. обрушаются). Это условие предполагает, что такие свойства, как защищенность, отсутствуют или «не сработали».

С учетом данного допущения (которое справедливо для случая нецеленаправленного воздействия ПФ) и определения свойства устойчивости системы свойство живучести может отслеживаться по условию — сохранила ли система состояние способности или нет? При этом приобретает реальные черты возможность моделирования свойства живучести, т.е. разработки аналитического или логического аппарата, позволяющего определять состояние системы после воздействия ПФ по свойствам соответствия и достаточности.

Таким образом, выполненный анализ проявления свойства живучести на различных уровнях оценки качества систем дает возможность сделать вывод о том, что показателем живучести строительной системы может являться количественная мера возможности сохранить системой состояние способности после воздействия на ее элементы поражающих факторов природно-техногенного характера, боевых средств или аварийной ситуации.

Для решения исследовательских и практических задач предполагается система показателей живучести (рис. 2), степень сложности и области применения которых различны.

К общим показателям живучести систем отнесем *показатель живучести восстанавливаемых систем* (G):

$$G = G_n + G_e(\tau_e)(1 - G_n) \tag{3}$$

— вероятность сохранения системой состояния способности или восстановления данного состояния,

где $G_e(\tau_e)$ – показатель эффективности подсистемы восстановления;

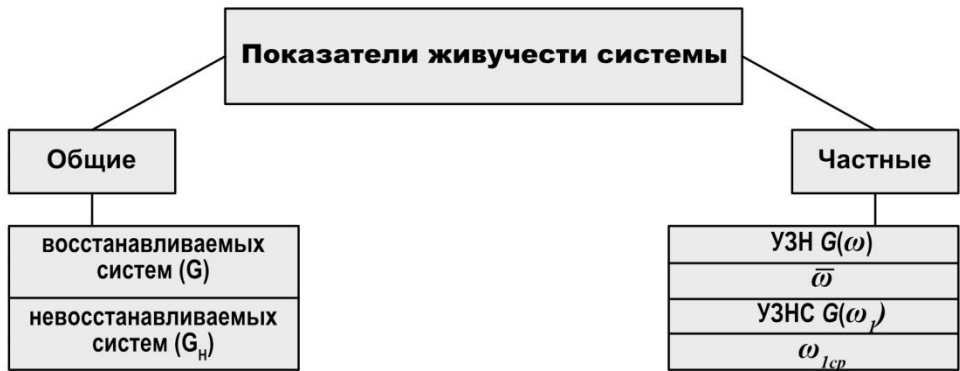


Рис. 2. Система показателей живучести
Fig. 2. System of robustness indicators

(G_n) — показатель живучести невосстанавливаемых систем или показатель неуязвимости — вероятность сохранения системой состояния способности.

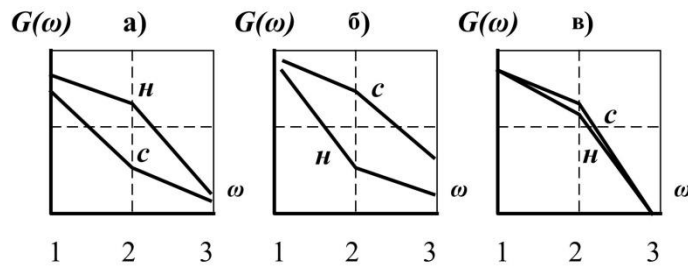
Область применения общих показателей включает задачи анализа и синтеза свойства живучести систем, требующих абсолютных (с учетом принятых условий) оценок, а также задачи формирования различного назначения частных показателей.

В качестве частных показателей живучести систем могут использоваться:

1) *условный закон необрушения системы (УЗНО) $G(\omega)$* , характеризующий «динамику» сохранения системой состояния способности при ω_x -кратном воздействии ПФ x -й природы.

Данный показатель формируется с помощью общих показателей путем принятия условия, что на элементы системы воздействует ПФ x -й природы $\omega = 1, 2, \dots$ раз. Это специфическое условие определяет область применения УЗНО:

- в задачах реализации принципа «равной живучести» системы (c) и ее носителя (n) (рис. 3).



• **Рис. 3.** К принципу «равной живучести» системы (c) и ее носителя (n)
 • **Fig. 3.** To the principle of “equal robustness” of the system (c) and its carrier (n)

Случай (в) демонстрирует реализацию принципа «равной живучести». Динамика утраты состояния способностей системой и ее ключевых элементов одна или близка. Очевидно, средства, выделенные на обеспечение живучести суперсистемы «система – ключевой элемент», потрачены рациональным образом;

- в задачах выбора, когда в результате сравнения альтернатив УЗНО производится выбор варианта системы, обладающей большей живучестью;

2) *условный закон неуязвимости структуры УЗНС $G(\omega_1)$* , характеризующий динамику сохранения системой состояния способности при последовательном удалении ω_1 ее элементов ($\omega_1 = 1, 2, \dots, \prec n$).

УЗНС оценивает конструктивную живучесть систем и является эффективным (возможно, единственным) средством оценки данного свойства систем на ранней стадии их разработки, когда условия распределения и эксплуатации их элементов еще неизвестны;

3) *математическое ожидание числа воздействий ПФ, при котором система теряет состояние способности $(\bar{\omega})$* .

В работе [34] приведено доказательство, что:

$$\bar{\omega} = \sum_{j=0}^{\infty} [1 - G(\omega)_j]; \quad (4)$$

4) среднее число удаленных из структуры системы элементов, при которой она теряет состояние способности ω_{1cp} .

Нетрудно предположить, что:

$$\omega_{1cp} = \sum_{i=0}^{\infty} \left[1 - G(\omega_1)_i \right]. \quad (5)$$

Показатели живучести ω и ω_{1cp} относятся к классу интегральных показателей.

В силу этого обстоятельства, а также их «условности» область применения данных показателей ограничена выполнением сравнительной оценки в задачах выбора более живучего варианта системы.

Список рассмотренных показателей живучести, безусловно, не является исчерпывающим и при появлении необходимости может быть дополнен иными подходами «измерения» живучести строительных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование проблемы обеспечения живучести строительных систем носит комплексный характер и предполагает на начальной стадии разработку ряда научных положений и методов, которые в совокупности составляют теоретические основы — базис данных исследований.

Сама разработка теоретических основ живучести строительных систем в настоящее время составляет научную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические системы. Анализ риска и проблемы безопасности. В 4-х частях. Часть 3. Прикладные вопросы анализа риска критически важных объектов / под ред. К.В. Фролова. М. : МГФ «Знание», 2007. 752с.
2. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Московцев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск : Наука, 2003. 174 с.
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Межгосударственный стандарт, 2017.
4. Еврокод 1: ТКП EN 1991-1-7–2009. Воздействие на конструкции. Часть 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2010.
5. 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.
6. Шапиро Г.И., Эйман Ю.А., Травуш В.И. Рекомендации по защите высотных зданий при чрезвычайных ситуациях. М. : Москомархитектуры, 2006.
7. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов : монография. М. : АСВ, 2013, 128 с.
8. 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.
9. Крапивин В.Ф. О теории живучести сложных систем. М. : Наука, 1978.
10. Ключева Н.В. Основы теории живучести железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: дис. д-ра техн. наук. Орел, 2009. 454 с.
11. Кудишин Ю.И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 28.
12. Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и эффективность корабельных электроэнергетических систем. Л. : ВМА, 1989.
13. Расторгуев Б.С. Методы расчета зданий на устойчивость против прогрессирующего разрушения // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2009. № 13. С. 15–20.
14. Рябинин И.А. Пути повышения эффективности научных исследований в области живучести технических систем // Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем : мат. II Все-союз. науч.-техн. конф. (Алушта, 1987). М. : Наука, 1988.
15. 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.
16. Флейшман Б.С. О живучести сложных систем // Изв. АН СССР. 1966. № 5.
17. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М. : Мир, 1980. 608 с.
18. Baker J.W., Schubert M., Faber M.H. On the Assessment of Robustness // Structural Safety. 2008. Vol. 30. No. 3.

Pp. 253–267.

19. Brett C., Lu Y. Assessment of Robustness of Structures: Current State of Research // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013. Vol. 7. No. 4. Pp. 356–368.
20. Starossek U., Haberland M. Evaluating Measures of Structural Robustness // *Structures*. 2009. Pp. 1758–1765.
21. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций : монография. М. : Издательство АСВ, 2016. 908 с.
22. Анцелович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М. : Машиностроение, 1985. 295 с.
23. Гретченко А.Т., Дорожук Ю.И. Устройство и живучесть корабля // ВВМИУ им. Дзержинского. СПб., 1991.
24. Доронин С.В. Расчеты живучести при проектировании машиностроительных конструкций // *Тяжелое машиностроение*. 2008. № 7. С. 9–12.
25. Советский энциклопедический словарь / науч.-ред. совет: А.М. Прохоров (пред.) и др. М. : Советская энциклопедия, 1980. 1600 с.
26. Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести повреждаемых стержневых конструкций : дис....канд. техн. наук. Красноярск, 2020. 183 с.
27. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 7. С. 22–28.
28. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.
29. 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.
30. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за сосуществование. М. : Наука, 1976. 286 с.
31. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов // *Методология, методы, модели*. М. : МО СССР, 1989.
32. Складчиков А.Н. Надежность систем с накоплением нарушений. Рига : Знание, 1969.
33. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
34. Плещунов М.А., Корчёмкина Л.В. Теория вероятностей : справочник. Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2017. 136 с.

REFERENCES

1. Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical systems. Risk analysis and security problems. In 4x parts. Part 3. Applied issues of risk analysis of critically important objects / edited by K.V. Frolov. Moscow, MGF “Znanie”, 2007; 752.
2. Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskovtsev V.V., Chernyaev A.P. *Probabilistic risk-analysis of the technical system constructions*. Novosibirsk, Nauka, 2003; 174.
3. GOST 27.002–2015. Reliability in technique. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow, Interstate Standard, 2017.
4. Eurocode 1: TCP EN 1991-1-7–2009. Impacts on structures. Part 1-7. General impacts. Particular impacts. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2010.
5. Kabantsev O.V., Mitrovich B. To a choice of characteristics of limit states of monolithic reinforced concrete bearing systems for a mode of progressive collapse. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Technology of textile industry*. 2018; 6(378):234-241.
6. Shapiro G.I., Eisman Yu.A., Travush V.I. *Recommendations for the protection of high-rise buildings in emergency situations*. Moscow, Moskomarhitektury, 2006.
7. Almazov V.O., Cao Zui Khoi. *Dynamics of progressive failure of monolithic multistory frames : monograph*. Moscow, ASV, 2013; 128.
8. 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 Russian).
9. Krapivin V.F. *About the Theory of Survivability of Complex Systems*. Moscow, Nauka, 1978.
10. Klyueva N.V. *Fundamentals of the theory of survivability of reinforced concrete structures under beyond-design effects : Dr. Sci. . Orel*, 2009; 454. (in Russian).
11. Kudishin Yu.I. Conceptual problems of the building structures survivability. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2009; 2:28. (in Russian).
12. Parfenov Y.M. *Reliability, survivability and efficiency of ship electric power systems*. Leningrad, VMA, 1989.
13. Rastorguev B.S. Methods of calculation of buildings for stability against progressive destruction. *Bulletin of the Building Sciences Department of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2009; 13:15-20. (in Russian).
14. Ryabinin I.A. Ways to increase the efficiency of scientific research in the field of survivability of technical systems. *Survivability and Reconfiguration of Information-Computer and Control Systems : Proceedings of the 2nd All-Union Scientific and Technical Conference (Alushta, 1987)*. Moscow, Nauka, 1988.
15. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S. D. Classification of structures of industrial enterprises on the possibility of protection from progressive collapse. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2024;

1(47):15-20.

16. Fleishman B.S. On the survivability of complex systems. *Izv. of the Academy of Sciences of the USSR*. 1966; 5.
17. Poston T., Stewart I. *Theory of Catastrophes and its Applications*. Moscow, Mir, 1980; 608.
18. Baker J.W., Schubert M., Faber M.H. On the Assessment of Robustness. *Structural Safety*. 2008; 30(3):253-267.
19. Brett C., Lu Y. Assessment of Robustness of Structures: Current State of Research. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013; 7(4):356-368.
20. Starossek U., Haberland M. Evaluating Measures of Structural Robustness. *Structures*. 2009; 1758-1765.
21. Mkrtichev O.V., Raiser V.D. *Theory of Reliability in Design of Building Structures : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 908.
22. Antselovich L.L. Reliability, safety and survivability of the airplane. Moscow, Mashinostroenie, 1985; 295.
23. Gretchenko A.T., Doroshchuk Y.I. Device and survivability of a ship. *VVMIU named after Dzerzhinsky*. St. Petersburg, 1991.
24. Doronin S.V. Survivability calculations at designing of the machine-building constructions. *Tyazheloe mashinost.* 2008; 7:9-12. (in Russian).
25. Soviet Encyclopedic Dictionary / Editorial Board: A.M. Prokhorov (predecessor) and others. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1980; 1600.
26. Filippova Y.F. *Estimation of survivability of damaged rod structures : dis....knd. tehn. nauk*. Krasnoyarsk, 2020; 183.
27. Tamrazyan A.G. Survivability as a degree of serviceability of structures under damage. *Industrial and civil engineering*. 2023; 7:22-28.
28. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to the survivability assessment of building structures, buildings and constructions. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74.
29. Tamrazyan A.G., Alexeytsev A.V. Optimal design of the bearing structures of buildings taking into account the relative risk of accidents. *Vestnik MSCU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(7):819-830.
30. Volterra V. *Mathematical theory of the struggle for coexistence*. Moscow, Nauka, 1976; 286.
31. Petukhov G.B. Fundamentals of the theory of effectiveness of purposeful processes. *Methodology, methods, models*. Moscow, MO USSR, 1989.
32. Sklyarevich A N. *Reliability of Systems with Accumulation of Violations*. Riga, Znanie, 1969.
33. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions.
34. Pleskunov M.A., Korchyomkina L.V. *Probability theory : handbook*. Ekaterinburg, Izd-v. Ural. unct, 2017; 136.