

Организационно-технологические подходы математического моделирования и прогнозирования риска аварийности строительного объекта

С.Г. Шеина¹, В.Я. Мищенко², Ю.Д. Сергеев³, Р.Ю. Мясищев³,
А.Ю. Сергеева³

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Аннотация: В данной статье рассмотрены эффективные способы и средства для анализа состояния объектов недвижимости, а также прогнозирования изменений их эксплуатационных свойств в динамике. Эти подходы открывают перспективы для повышения точности предсказаний закономерностей износа как физических, так и функциональных компонентов, а также старения строительных конструкций, сооружений и инженерных систем. В конечном итоге это способствует поддержанию должного уровня их работы и обеспечению качественного функционирования. Также значительное внимание уделено общей кинетической теории износа конструкций строительных объектов, т.к. известно, что данная теория даёт возможность с достаточно высокой точностью оценивать соответствующие риски надёжности в зависимости от сроков эксплуатации строительных конструкций объекта. В качестве инструмента для проведения исследования предлагается использование универсальной математической модели износа, которая иллюстрирует динамику процессов структурирования и деструктурирования строительных систем на протяжении всего срока их эксплуатации. Модель отражает постоянное взаимодействие конструкции с факторами длительного воздействия. Также разработана статистическая модель, позволяющая определить вероятность перехода строительных элементов в состояние разрушения из-за влияния неблагоприятных факторов, что непосредственно связано с потерей их надёжности.

Ключевые слова: организационно-технологические решения, надёжность, контроль качества, эффективность, себестоимость, производительность труда.

Прогнозирование закономерностей старения и износа конструкций, как физических, так и функциональных, имеет важное значение. Учет воздействия внешних и технологических факторов на процессы износа и старения материалов также играет значительную роль в повышении качества и эффективности строительства и эксплуатации зданий. Для улучшения этих аспектов необходимо использовать эффективные методы и инструменты для анализа состояния объектов, а также предсказания изменений их

эксплуатационных свойств с течением времени [1, 2]. Требуется проводить прогнозирование износов и старения строительных объектов и систем, а также инженерного оборудования для того, чтобы обеспечивалось надлежащее качество их функционирования [3].

Свойства конструкций изначально зависят от микроструктуры материала, из которого они изготовлены, а также от технологий производства и монтажа зданий. На ранних стадиях эксплуатации здания могут проявляться первые нарушения. Со временем под воздействием внешней и технологической среды, а также нагрузок происходят развитие дефектов и коррозия, что в итоге может привести к разрушению конструкций. Понимание механизмов возникновения и развития дефектов дает возможность разработать меры для защиты элементов здания и предотвращения аварийных ситуаций [4]. Успех всего исследования, а также точность предсказания поведения строительной системы в будущем будет зависеть от того, насколько точно исследователь определит ключевые переменные, влияющие на фазовые изменения [5, 6].

Для предсказания и анализа поведения системы в будущем возможно использовать разнообразные тщательно разработанные математические методы, а также вычислительную технику при условии, что эти переменные будут учтены в модели. Описанная с использованием математики система называется математической моделью, а если речь идет об экономической системе, то такая модель называется экономико-математической.

В строительном математическом моделировании различают два основных типа моделей: системные (модели описывающие системы) и аналитические (модели данных). Модели систем базируются на общефизических постулатах и гипотезах о структурировании и функционировании модели. Данные модели представляют собой репрезентацию системы и интринсивных её функций, реализуемые

уравнениями, репрезентирующие взаимовлияние всех ингредиентов исследуемой системы. Несколько иначе ведут себя аналитические модели, которые не осуществляют, не требуют, не нуждаются в предположениях о функциональных методах и не демонстрируют гипотезы, аффилированные с используемыми процессами. Данный тип включает в себя эмпирические и статистические ферристоры, выражающие результаты анализа данных в ракурсе математических депенденций, максимально точно отображая процессы и их внешние проявления [7].

Продолжительность эксплуатации здания с обеспечением требуемого для него уровня надёжности – это основной общепринятый интегральный показатель безотказной работы строительного объекта [8].

Анализ механизмов прочности связан с исследованием процессов износа и старения конструкций, что выражается через решение следующего уравнения:

$$\int_0^{t_m} \left(\frac{dD}{dt} \right) dt = 1.$$

В данном уравнении верхняя граница интегрирования t_m соответствует времени эксплуатации конструкции при сохранении необходимого уровня надёжности. Это объясняется тем, что при $D = 1$ конструкция теряет свою целостность (происходит авария).

Для нахождения искомого значения t_m следует использовать следующий математический критерий:

$$\frac{dD(t)}{dt}.$$

Интеграл можно принять как приближенно равной единице (в интервале от 0,95 до 0,99). Вероятность разрушения строительного объекта не раньше, чем через 50 лет в условиях стандартной эксплуатации зданий и

сооружений массового типа обозначается как риск аварии $D(t)$ для времени t . Ориентировочные сроки эксплуатации таких объектов показаны на рисунке 1.

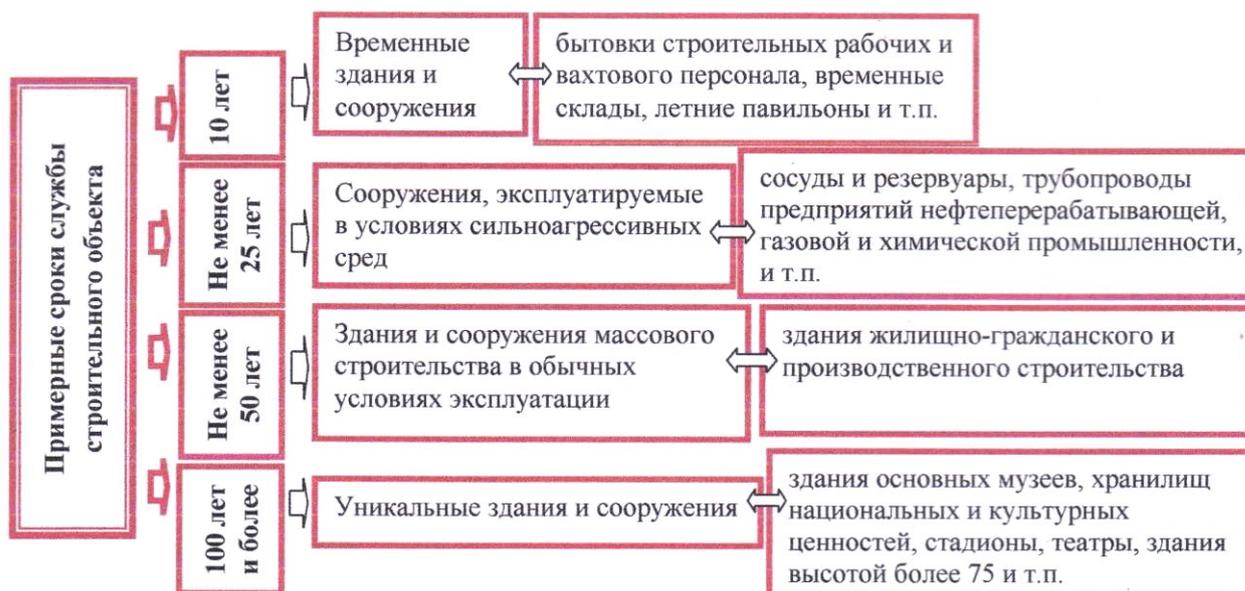


Рис. 1 - Примерные сроки функционирования строительного объекта

Объективная возможность наступления аварии пребывает в интервале от нуля до единицы. Когда продолжительность эксплуатации объекта (t) увеличивается, тогда функция D будет стремиться к единице. При минимизации величины t функция D будет значительно меньше единицы.

Аффилированная с опцией $D(t)$, функция $S(t)$, характеризующая итоговую длительность эксплуатации здания при заданном уровне надежности, определяется через зависимость $S(t) = 1 - D(t)$. Эта функция показывает вероятность того, что срок службы конструкций составит не менее t , то есть будет больше (превысит) t .

Риск полного разрушения строительного объекта (функция плотности вероятности аварии) $D(t)$ можно рассматривать как предел отношения вероятности наступления аварийного события в интервале $[t, t + \Delta t]$ к его ширине Δt в том случае, если последняя стремится к 0.

Когда величина интервала приближается к нулю, соотношение вероятности наступления аварийного состояния будет находиться в пределах $[t, t + \Delta t]$ к функции продолжительности эксплуатации объекта при обеспечении требуемой надёжности $S(t)$ и определяться как показатель интенсивности деградации, разрушения (или коэффициент разрушения, аварийная частота, удельная аварийность) [9]. В таком случае ширина интервала Δt будет стремиться к 0: $(dD/dt)/S(t) = dD/dt/(1-D(t)) = \mu(t)$.

Разрушения конструкций стройобъекта, измерения которых проводятся через одинаковые временные промежутки n , включают величины:

- lt – количество объектов, чья продолжительность эксплуатации экстраполируется до консеквенции t ;
- $d(t)$ – количество объектов, которые были повреждены в процессе эксплуатации в период $(t, t + n)$;
- объективная возможность аварии стройконструкции во временных рамках $(t, t + n)$:

$$qt = \frac{dt}{lt};$$

- кумулятивный временной промежуток $(t, t+n)$ эксплуатирования стройобъекта:

$$L_t = n \times l_t + n + \left(\frac{n}{2}\right) dt;$$

- кумулятивный временной промежуток t и больше эксплуатирования всех обследуемых стройобъектов:

$$t = L_t + \dots + L_w;$$

- w - величина интервала, прямо пропорциональная исходному моменту завершающему периоду;

- предполагаемый временной период эксплуатации стройобъекта, который достиг временной промежуток t :

$$et = Tt/l_t;$$

- показатель интенсивности разрушения конструкции:

$$\mu(t) = -dl(t)/l(t)dt.$$

Все теории, которые существуют в настоящее время, сводятся к следующим основным группам износа. Стохастический износ (или разрушение) может быть представлен как случайный вероятностный процесс (результат накопления повреждений функционального и морфологического характера вследствие непредсказуемых событий), либо как запрограммированный процесс (естественное эволюционное развитие, заложенное экосистемой) [10].

Математическую модель интенсивности износа строительного объекта (уравнение 1) можно интерпретировать как приближение функции интенсивности разрушения конструкции, определяя экспоненциальную связь в рамках указанного временного интервала, который зависит от продолжительности использования объекта в пределах обобщенного периода времени $[0, t_{mb}]$. Здесь t_{mb} взаимосоответствующее переменной $D = 1$:

$$(dD/dt)/(1 - D) = R \exp(\alpha t).. \quad (1)$$

В уравнении R и α величины положительные, а величина α обязательно больше нуля.

Однако этот принцип имеет серьезные ограничения, так как его можно использовать лишь в пределах полувека, но не дольше. Предположить также можно, что внешние факторы, не связанные с увеличением износа объекта по мере его старения, будут определять одну из составляющих аналитической модели. Математически эту формулу можно представить, как данное уравнение:

$$(dD/dt)/(1 - D) = A + R \exp(\alpha t). \quad (2)$$

Параметр A в данном случае, помимо того, что уменьшает различие между реальным положением дел и приближённой моделью в период 25-50 лет, также вводит в теоретическое обоснование причины разрушения, включая фактор, не имеющий отношения к износу — воздействие внешней среды, не зависящее от времени эксплуатации. Также параметр A будет обозначать компонент разрушения, не связанный с износом конструкции, то есть фоновую составляющую.

Следует отметить, что ресурсы строительных конструкций распределяются между их подсистемами, которые отвечают за восстановление и репарацию повреждений [11]. Трещины в кирпичных конструкциях, связанные с температурными колебаниями, часто возникают из-за неправильного архитектурного подхода, не обеспечивающего достаточную устойчивость к деформациям, вызванным изменениями температуры. Диссонанс содержится в том, что наружная облицовка стройобъекта сочленена с внутренним слоем исключительно гибкими элементами. Наружный слой претерпевает жесточайшие температурные колебания, спровоцированные воздействием внешней среды. В это самое время слой внутренний получает чуть ощутимые температурные колебания сезонные и суточные. Этот диссонанс имеет последствия того, что поверхностный слой не имеет возможность без препятствий сокращаться, когда температура начинает понижаться. Все вышеозначенное способствует возникновению трещин.

Вибрирования температуры, протекающие на протяжении десятков лет, формируют благоприятную ситуацию для создания высокоустойчивых трещин. Когда температура падает, трещины, ранее образовавшиеся в кирпичной кладке, не могут нацело «зарубцовываться» при возможном увеличении температурных градусов. По ходу времени аккумулировавшиеся

дефекты вызывают деструкцию экстринсивного слоя, что приводит к выпадению отдельных частей отделки за границы конструкции [12].

На сегодняшний день продолжают оставаться нерешёнными споры, проходят дебаты касательно добавления дополнительной фазы или фонового элемента в математическое представление скорости разрушения зданий. Неспособность полностью восстановить повреждённые элементы приводит к тому, что разрушение ускоряется, а интенсивность ухудшения структуры возрастает, что, в свою очередь, усугубляет процессы деградации.

Можно предположить, что параметр R точно отражает влияние внешней среды на степень разрушения строительной конструкции, в то время как параметр α характеризует возрастную составляющую разрушения, связанную с изменениями объекта с течением времени. В таком случае можно считать, что изменение длительности эксплуатации строительного объекта является косвенным показателем, который отражает воздействие и влияние окружающей среды на продолжительность использования и эксплуатации строительного объекта.

Общий коэффициент износа строительного объекта, который, в частности, служит показателем продолжительности эксплуатации в системе мониторинга организационно-технологического процесса, можно вычислять как отношение количества конструкций, подвергшихся разрушению за год, к среднегодовому числу возведенных объектов. Этот показатель рассчитывается для Q строительных объектов чаще всего на 100:

$$m = (M \times Q) / S. \quad (3)$$

где m - общий показатель разрушения строительных конструкций;

M - количество объектов, которые были разрушены за год;

S - среднегодовое количество возведенных строительных объектов.

Оценка и анализ эффективности управления сроком службы строительных объектов через параметр общего износа является обоснованной и оправданной только в том случае, если все аспекты и факторы, влияющие на долговечность и эксплуатационный ресурс, оказывают одинаковое воздействие на каждый отдельно взятый объект, независимо от его типа и назначения. Это предположение может быть справедливо только в условиях идеальных или теоретических ситуаций, где все параметры одинаково влияют на строительство. Однако на практике такие ситуации крайне редки и почти не встречаются в реальных условиях эксплуатации. Исключением из этого правила становятся лишь чрезвычайные, аварийные ситуации, когда воздействие на объект носит внезапный, катастрофический характер, и его исход может не зависеть от обычных эксплуатационных факторов. Эти исключения касаются чрезвычайных происшествий, стихийных бедствий или иных факторов, которые не имеют отношения к обычному циклу эксплуатации и функционирования. Таким образом, при решении подобных задач следует учитывать параметры разрушения зданий, которые зависят от их возрастного состояния в процессе эксплуатации [13].

Можно внедрить теоретическую концепцию, которая описывает воздействие различных нагрузок на конструктивные элементы, принимая во внимание как внешние, так и внутренние факторы, влияющие на объект и постепенно способствующие его деградации и разрушению. Это позволяет точнее учитывать все условия эксплуатации, которые со временем вызывают ухудшение состояния сооружения. Состояние строительного объекта, таким образом, можно установить через степень накопленных повреждений или дефектов, которые постепенно снижают его эксплуатационные параметры и функциональные характеристики. В рамках подобных математических моделей степень износа или разрушения конструкции, обозначаемая как

$\mu(t,P)$, представляется в виде произведения двух функций, каждая из которых выполняет определённую роль в описании процесса разрушения. Одна функция, которая показывает состояние конструкции в зависимости от времени и воздействия внешних факторов, обозначена как $\beta(t, P)$. Вторая функция выражает интенсивность нагрузки, которая действует на объект — $h(t, P)$, и таким образом, взаимно влияет на скорость его износа и разрушения. Всё это в совокупности даёт полное математическое описание процессов разрушения конструкции, учитывая как механическое воздействие, так и природные или внешние нагрузки, что важно для более точного прогнозирования долговечности строительных объектов. В конечном итоге формула для выражения интенсивности разрушения будет выглядеть следующим образом:

$$\mu(t,P) = h(t,P) \times \beta(t,P). \quad (4)$$

P - переменная, отражающая негативное влияние внешней среды на стройобъект.

Интенсификация нагрузки:

$$h(t,P) = h(t) + \Delta h(t,P). \quad (5)$$

$$h(t) = h(t,0);$$

$\Delta h(t, P)$ – дополнительный компонент нагрузки, обусловленный действием негативного фактора [14].

Принимая во внимание вышеизложенное аппроксимированное отображение, получаем детерминацию износа, т.е. произведение опции напряженности износа без учета отрицательного влияния внешней среды ($\mu(t)$), принимая в расчет комплементарные составляющие экстринсивной нагрузки - $(1 + \Delta h(t, P)/h(t))$ и опции аккумуляции дефектов в течение времени t_0 в качестве экспоненциальной функции:

$$\mu(t, t_0, P) = \mu(t) \left(1 + \frac{\Delta h(t, P)}{h(t)} \right) \exp \left(\alpha \int_{t_0}^t \frac{h}{h_1} dt \right). \quad (6)$$

В данной функции, если соблюдается, что нагрузка постоянная, α и h_1 также будут являться постоянными величинами.

Для того что бы создать большее количество рабочих системных математических моделей, показывающих износ строительных конструкций, необходимо понимать, что является объектом моделирования в организационно - технологическом плане. Этот вопрос в настоящее время, к сожалению, является нерешённым, т.к. общая концептуальная модель износа до сих пор отсутствует. Именно над созданием такой общей концептуальной модели износа стоит работать в будущем.

Литература

1. Шеина С.Г., Балашев Р.В., Живоглядов Г.А., Шахиев Р.Д. Устойчивое строительство зданий // Инженерный вестник Дона, 2023, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8911.
2. Любин Н.С. Архитектура как часть устойчивого развития // Инженерный вестник Дона, 2021, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6968.
3. Mishchenko V., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishchev Yu., Myasishchev R. Risk Management in Energy Efficient Constructional Projects // AIP Conference Proceedings. VIII international scientific and technical conference "Solving environmental problems in the construction industry" ESCI 2022. AIP publishing, 2023. pp. 050020 doi: doi.org/10.1063/5.0125004.
4. Yemelyanov D.I., Ponyavina N.A., Klokov I.A. Methods of work organization on complex restoration capital construction projects // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. №2 (62). pp. 63-69.

5. Гинзбург А.В. Организационно-технологическая надежность строительных систем // Вестник МГСУ. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. 2010. №4-1. С. 251-255.
 6. Петров К.С., Федоряка А.В., Лами Каррар, Семенец В.Г. Модернизация зданий и сооружений как способ восстановления жилищного фонда РФ // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717.
 7. Артыщенко С.В., Писарева А.А., Емельянов Д.И., Степанова Т.В. Применение риск-менеджмента в задачах управления: качественные и количественные методы // Проектное управление в строительстве. 2024. № 2 (31). С. 24-39.
 8. Новоселова И.В., Аль-Фатла А.Н.М., Дахнова Т.М. Организационно - технологические положения строительно - технических исследований по определению качества строительных конструкций// Инженерный вестник Дона, 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7923.
 9. Titarenko V., Hasnaoui A., Titarenko R. Risk management system model for construction projects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue. 4. Art. №42019.
 10. Соколов В.А. Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // XV научно-методическая конференция "Дефекты зданий и сооружений". СПб.: ВИТИ, 2011. С.54-63.
 11. Абрашитов В.С., Жуков А.Н., Устинова А.В. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // Региональная архитектура и строительство. Научно-технический журнал. 2016. № 4 (29). С. 67-70.
-

12. Чернышева А.С., Чернышева Е.В. Технический надзор в строительстве // VI международная научно-практическая интернет-конференция "Актуальные проблемы менеджмента качества и сертификации". Белгород: БГТУ им В.Г. Шухова, 2016. С. 188-192.

13. Федотова М. И., Шмелев Г. Д. Прогноз риска аварии несущих строительных конструкций на основе расчета снижения несущей способности // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. Научный журнал. 2022. № 2(21). С. 30-37. DOI: 10.36622/VSTU.2021.21.2.003.

14. Емельянов Д.И., Понявина Н.А., Клоков И.А. Методика организации работ по комплексному восстановлению объектов капитального строительства // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. №3 (71). С. 60-67.

References

1. Sheina S.G., Balashev R.V., Zhivoglyadov G.A., Shahiev R.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8911.

2. Lyubin N.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6968.

3. Mishchenko V., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishchev Yu., Myasishchev R. AIP Conference Proceedings. VIII international scientific and technical conference "Solving environmental problems in the construction industry" ESCI 2022. AIP publishing, 2023. pp. 050020 doi: doi.org/10.1063/5.0125004.

4. Yemelyanov D.I., Ponyavina N.A., Klokov I.A. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. №2 (62). pp. 63-69.

5. Ginzburg A.V. Vestnik MGSU. Nauchno-texnicheskij zhurnal po stroitel'stvu i arxitekture. 2010. №4-1. pp. 251-255.

6. Arty`shhenko S.V., Pisareva A.A., Emel`yanov D.I., Stepanova T.V. Proektное управление v stroitel`stve. 2024. №2 (31). pp. 24-39.
7. Petrov K.S., Fedoryaka A.V., Lami Karrar, Semenez V.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717.
8. Novoselova I.V., Al`-Fatla A.N.M., Daxnova T.M., Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7923.
9. Titarenko B., Hasnaoui A., Titarenko R. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue. 4. Art. № 42019.
10. Sokolov V.A. XV nauchno-metodicheskaya konferenciya "Defekty` zdaniy i sooruzhenij". SPb., 2011. pp. 54-63.
11. Abrashitov V.S., Zhukov A.N., Ustinova A.V. Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo. Nauchno-texnicheskij zhurnal. 2016. № 4 (29). pp. 67-70.
12. Cherny`sheva A.S., Cherny`sheva E.V. VI mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya internet-konferenciya "Aktual`ny`e problemy` menedzhmenta kachestva i sertifikacii". Belgorod: BGTU im V.G. Shuxova, 2016. pp. 188-192.
13. Fedotova M. I., Shmelev G. D. Housing and communal infrastructure. Scientific Journal. 2022. No. 2(21). pp. 30-37. DOI: 10.36622/VSTU.2021.21.2.003.
14. Emel`yanov D.I., Ponyavina N.A., Klokov I.A. Nauchny`j zhurnal stroitel`stva i arxitektury`. 2023. №3 (71). pp. 60-67.

Дата поступления: 25.01.2025

Дата публикации: 3.02.2025