

Организационно-технологическая модель прогнозирования функционального устаревания строительного объекта

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

А.Ю. Сергеева³

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Аннотация: В статье исследуется модель, при которой возможно прогнозировать сроки устаревания строительного объекта. Целью описанных методик является обеспечение стабильной эксплуатации и надежной работы объектов. Представленные методологические подходы позволяют улучшить точность оценки процессов деградации, охватывающей как технические элементы, так и конструктивные части зданий и инфраструктурных систем. В материале акцент сделан на результативных инструментах и методах, применяемых для обследования текущего состояния недвижимости, а также для предвидения изменений в их эксплуатационных характеристиках со временем. В работе рассматривается применение обобщённой вычислительной схемы изнашивания, демонстрирующей изменения в организации и разрушении строительных элементов на протяжении всего периода службы. Данная схема учитывает непрерывное влияние внешних условий на структуру сооружения. Универсальная формула, предложенная для анализа, служит инструментом исследования и отображает ход изменения состояния технических систем под действием продолжительных нагрузок.

Ключевые слова: организационно-технологические решения, надежность, контроль качества, мониторинг соответствия стандартам, эффективность, затраты на производство.

При оценке времени функционирования сооружения важно учитывать различия в уязвимости отдельных его компонентов к внешним нагрузкам [1, 2]. Отдельные части строений имеют неодинаковую степень износа, соответственно, продолжительность их использования также отличается [3]. На продолжительность эксплуатации объекта в значительной степени влияет стойкость его конструктивных элементов [4]. Существенную роль играет и анализ темпов материального изнашивания, отражающих изменения количественных параметров в связи с фактической длительностью использования [5]. Из всего вышеперечисленного следует, что существует непосредственная взаимосвязь между величиной физического износа и

временем, т.е. срока эксплуатации здания (строительной конструкции) и долговечностью [6].

Обобщённая числовая концепция деградации строительных объектов рассматривает старение как непрерывный процесс приспособления инженерных систем разных уровней организации к внешним условиям среды и антропогенному воздействию. Модель описывает взаимодействие между конструктивными элементами и факторами окружающей среды через механизмы формирования и разрушения структуры, начиная с момента строительства и заканчивая окончанием срока эксплуатации здания. Если рассматривать безотказную работу строительных конструкций и строительного объекта с момента их возведения, это с точки зрения адаптивного реагирования является адаптацией к антропогенным и природным, климатическим факторам в процессе эксплуатации объекта [7].

Адаптивное поведение строительной системы можно обобщённо представить как результат противодействия между изнашиванием (в виде нарушений целостности и разрушения) и восстановительными мероприятиями (в рамках обслуживающих и ремонтных работ) начиная с этапа строительства и заканчивая переходом объекта в иное функциональное состояние, будь то модернизация, основательный ремонт или демонтаж [8, 9]. Тогда момент возведения стройобъекта $\tau = 0$ строительной системы как раз и будет являться началом процессов влияния антропогенных и природно – климатических факторов. Тогда долговечность - это интервал времени τ_{fc} от возведения здания до его завершения эксплуатации, изменение во временном эквиваленте скоростью, с которым уменьшается несущая способность и увеличивается повреждение, будет являться старением

конструкции. Степень же повреждения системы будет являться кинетикой и динамикой старения [10, 11].

Исходя из обобщённой модели механотермического разрушения твёрдого материала, находящегося под действием напряжений, а также с применением уравнений химической динамики и закона устойчивости систем по Ле-Шателье, можно вывести феноменологическое выражение, описывающее кинетику равновесного взаимодействия между прямыми и обратными техническими процессами:

$$dm/d\tau = B_{0\beta} \times \vartheta_{\beta}(m) \times \exp(-R_s) - B_{0d} \times \vartheta_d(m) \times \exp(-R_s + (\omega \times m_0)/m), \quad (1)$$

описывающее изменения концентрирования корреляций в строительной системе, принимая во внимание период времени $\tau = 0 \div \tau_{fc}$,

где

$\vartheta_d(m)$ и $\vartheta_{\beta}(m)$ - кинетический концепт деструкции и восстановления после ремонта;

$B_{0\beta}$ и B_{0d} - статические множители;

$R_s = R_z/bT$ - безразмерный параметр, оценивающий выносливость строительной системы к деструкции. Показывает, насколько качественно стройконструкция сохраняет персональные, заложенные проектом характеристики и функциональность в течение времени всего срока эксплуатации.

Здесь R_z - представляет собой энергию, необходимую для усиления связи.

b - константа Больцмана, $m_0 = m(0)$; ω - безразмерная величина, определяющая интенсивность и тип внешнего воздействия, влияющего на технические свойства строительной системы, конкретизирующая скорость и силу модификации порога деформирования и деградации внутренних связей

$R_\beta = R_s \omega \times m_0/m$, причем эта зависимость усиливается с возрастом и старением системы.

$B_{d,\beta} = B_{0d,0\beta} \times \exp(-R_s)$ - измеримые и постоянные скорости старения и восстановления строительного объекта после ремонта. Для ясности примем, что законы изменения прочности соединений как в процессе разрушения, так и в ходе их восстановления после технического обслуживания описываются следующим образом. Согласно выражению (1) влияние климатических и природных факторов равномерно распределяется по всей системе взаимодействующих элементов, составляющих структуру объекта:

$$\vartheta_d(m) = (m/m_0)^{f_d}, \quad \vartheta_\beta(m) = (1 - m/m_0)^{f_\beta}, \quad (2)$$

где $f_d > 0$, $f_\beta > 0$ (снижение концентрации связей m влечет за собой уменьшение вероятности их разрушения, а также способствует более эффективному восстановлению после ремонтных и восстановительных процедур).

В показателях безразмерных:

$$0 \leq D = 1 - \left(\frac{m}{m_0}\right) \leq 1, \quad V = (Bd/m_0) \times \tau \quad (3)$$

формула 1 сводится к уравнению:

$$dD/dV = (1 - D)^{f_d} \exp(\omega/(1 - D)) - vD^{f_\beta} \quad (4)$$

содержащему параметр $v = B_\beta/B_d = B_{0\beta}/B_{0d}$, который интерпретируется как относительная константа скорости старения.

Интерпретация совокупной кинетики процессов старения строительного объекта в рамках модели накопления повреждений, можно представить уравнением 4, с учетом параметра R_s , характеризующего устойчивость конструкции, специфики и силы деструктивного влияния

(параметр ω), а также адаптивных возможностей системы (параметр v), которые возрастают при увеличении степени поврежденности D [12].

Уравнение 4 даёт возможность при константах:

$$R_s(\tau), \quad \omega(\tau), \quad v(\tau) \text{ и } f_{a,\beta}$$

достаточно просто определить основные взаимосвязи и закономерности протекания процессов старения.

Время:

$$\tau = \tau_{fc} (V = V_{fc})$$

при котором $D = 1$, что можно интерпретировать как срок службы конструкции, в то время как значение D , изменяющееся во времени, отражает уровень вероятности деформаций или нарушений элементов сооружения. Безразмерный параметр времени V представляет собой период, определяемый интенсивностью разрушения рабочих взаимодействий. На него, в числе прочего, оказывает влияние параметр устойчивости R_s : чем выше эта характеристика, тем, соответственно, медленнее протекает физическое время τ для строительного объекта.

Постепенно и поэтапно будем проводить обобщение. Полученные результаты будут использованы в анализе изменений, происходящих в процессе старения стройобъекта.

1. Отсутствие негативного влияния ($\omega = 0$) и приспособленность системы к условиям эксплуатации стройобъекта ($v = 0$) после восстановительных работ.

Уравнение 4 модифицируется:

$$\frac{dD}{dV} = (1 - D)^{f_a}$$

В результате получаем соотношения:

$$V(D) = \int_{1-D}^1 \frac{dx}{x^{f_d}} dx = \frac{1 - (1-D)^{1-f_d}}{1-f_d}, \quad (5)$$

$$D(V) = \left[\frac{(f_d - 1)V}{1 + (f_d - 1)V} \right]^{\frac{1}{f_d - 1}}$$

Уравнение 5 устанавливает, что долговечность строительного объекта в каждом случае равна:

$$V_{fc} = \frac{1}{1-f_d}, \text{ при } f_d < 1$$

и

$$V_{fc} = \infty, \text{ при } f_d \geq 1$$

Коэффициент f_d обратно пропорционален скорости деструкции. При замедлении процессов разрушения увеличивается срок службы строительной конструкции.

2. В случае присутствия негативных факторов и воздействий ($\omega \neq 0$), но при условии отсутствия фактора адаптации системы (восстановительных работ ($v = 0$)), уравнение 4 имеет вид:

$$dD/dV = (1-D)^{f_d} \exp\left(\frac{\omega}{1-D}\right),$$

а следовательно:

$$V = \frac{1}{\omega^{(f_d-1)}} \int_{\omega}^{\omega/(1-D)} x^{f_d-2} \times \exp(-x) dx \quad (6)$$

Для целых $f_d \geq 2$ интеграл в уравнении 6 выражается через элементарные функции, что позволяет записать итоговое уравнение в явном виде:

$$V(D) = \omega^{1-f_d} \times \{\delta(\omega) - \delta[\omega/(1-D)]\} \quad (7)$$

где

$$\delta(\gamma) = \exp(-\gamma) \times \sum_{i=0}^{fd-2} \gamma^{fd-2-i} \times \prod_{j=0}^{i-1} (fd-2-j).$$

Исчисление долговечности системы основано на уравнении 7:

$$V_{fc} = \lim_{D \rightarrow 1} V(D) = \omega^{1-fd} \times \delta(\omega) \quad (8)$$

3. Присутствия негативных факторов ($\omega \neq 0$) и работ по восстановлению системы ($v \neq 0$).

Из уравнения 4 следует: (если при каком-то $V = V_p$ значение $D(V) = D_p$ где D_p – корень уравнения):

$$(1 - D)^{fd} \exp[(\omega / (1 - D))] = v \times D^{fb} \quad (11)$$

то затем устанавливается стационарный режим (мода): $D(V) = D_p = \text{const}$ при $V = V_p$.

В результате уравнивания процессов разрушения за счёт восстановительных мероприятий (формируется динамическая стабильность) прекращается деградация строительной конструкции [13]. Конструкция приспособляется к воздействующей нагрузке, достигая определённого уровня дефектности D_p , который определяется характеристиками системы и масштабом внешнего воздействия.

Литература

1. Шеина С.Г., Балашев Р.В., Живоглядов Г.А., Шахриев 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. Шеина С.Г., Мищенко В.Я., Сергеев Ю.Д., Мясищев Р.Ю. Выявление и классификация дефектов строительных конструкций по установленным критериям эксплуатационного износа // Инженерный вестник Дона, 2024, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8986.
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 B., 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. 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.

13. 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. Sheina S.G., Mishhenko V.Ya., Sergeev Yu.D., Myasishhev R.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8986

4. Yemelyanov D.I., Ponyavina N.A., Klovok 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. Petrov K.S., Fedoryaka A.V., Lami Karrar, Semenecz V.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717.
7. Arty'shhenko S.V., Pisareva A.A., Emel'yanov D.I., Stepanova T.V. Proektnoe upravlenie v stroitel'stve. 2024. №2 (31). pp. 24-39.
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 arhitektura i stroitel'stvo. Nauchno-texnicheskij zhurnal. 2016. № 4 (29). pp. 67-70.
12. 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.
13. Emel'yanov D.I., Ponyavina N.A., Klovkov I.A. Nauchny'j zhurnal stroitel'stva i arhitektury'. 2023. №3 (71). pp. 60-67.

Дата поступления: 8.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025