

Прогнозирование риска разрушения строительных конструкций

С.Г. Шеина¹, Ю.Д. Сергеев², Р.Ю. Мясищев², А.Ю. Сергеева²,

А.В. Мищенко²

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Аннотация: Статья посвящена оценке признаков, способных привести к разрушению строительных конструкций, которые с течением времени подвергаются физическому износу. Разрушение элементов может повлечь за собой неблагоприятные последствия. Для проведения диагностики разрушения конструкций используется математическая основа. С ее помощью можно определить влияние признаков, способствующих разрушению конструкции, на степень разрушения. В данной статье рассматриваются основные положения общей кинетической теории, а также методы ее применения в целях определения аварийного состояния конструкций. Техническое состояние конструкций рассматривается с позиции детерминационной теории. В основе концепции лежит принцип надежности работы конструкции до первого отказа. Модель безотказности работы объекта включает в себе науку о скоростях процессов в области структуризации и разложения сложных структур систем в течение всего жизненного цикла и показывает адаптивную реакцию конструкций на факторы, которые сокращают срок службы объекта. Данная концепция дает возможность более точно оценивать риски аварийности конструкций от воздействия определенных неблагоприятных факторов.

Ключевые слова: строительно-техническая экспертиза, дефекты, надежность, диагностические задачи, методики диагностики, эффективность.

Основными требованиями по отношению к новым и уже существующим зданиям и сооружениям являются надёжность, экономическая эффективность и экологическая безопасность [1]. Технологические процессы и факторы внешней среды оказывают определенное воздействие на конструкции и материалы, изменяя их свойства. Такие изменения влекут за собой увеличение риска ухудшения их качества [2, 3]. Последствия могут привести к нанесению ущерба окружающей среде и угрозе жизни людей. Для того, чтобы не усугубить ситуацию, важно своевременно выявлять и устранять дефекты отдельных элементов зданий. Серьезные нарушения могут повлечь за собой большие материальные затраты, которые будут направлены на восстановление свойств конструкций [4, 5]. На стадии проектирования невозможно

предусмотреть все факторы, оказывающие влияние на здания и сооружения. Процесс возникновения дефектов в конструктивных элементах не поддается планированию простыми методами [6].

Под надежностью объекта принято понимать свойство объекта выполнять требуемые к нему функции в течение определенного времени. На протяжении всего срока службы должны быть сохранены эксплуатационные параметры данного объекта. К ним относят безотказность, долговечность, ремонтпригодность [7].

Первое свойство является самым важным, так как оно обозначает непрерывное выполнение объектом своих функций в течение определенного промежутка времени. Безотказность определяет функциональный комфорт и безопасность зданий. Долговечность объекта направлено на выполнение им своих функций до наступления критического состояния. В данном свойстве возможны перерывы в работе. Ремонтпригодность определяет способность объекта восстанавливать свою работоспособность после отказа. Физический износ – потеря материалами или конструкциями своих первоначальных качеств [8, 9]. В подавляющем большинстве стройобъекты характеризуются индивидуальными пространственно-планировочными и конструктивными решениями, употребляемых разновидностей стройматериалов, стройконструкций и эксплуатируются в разнородных условиях. Осуществление стройэкспертиз проводят эксперты-специалисты, которые имеют неодинаковый навык в техобследованиях [10]. При содействии концептуально-общеметодологических аспектов математической модели есть вероятность предвидеть потенциальную опасность деструкции стройконструкции [11].

На сегодняшний момент разработан схематизированный аспект математического моделирования. Варьирование математических моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Математические модели

Наименование модели	Обоснование	Основа
Аналитические	Модели, не использующие и скрывающие гипотезы о физических системах, при рассмотрении которых они были применены	Балансовые соотношения, которые связывают переменные
Системные	Модели, базирующиеся на физических законах и гипотезах о структуризации и функционировании системы	Метод описания структуры системы

Временные рамки, в ходе которых измеряется надежность стройобъекта, назначается, беря во внимание цель обследования. В случае с обследованием несущих стройконструкций или систем жизнеобеспечения, то цикл диагностирования надежности стоит считать время эксплуатации стройобъекта в целом [12].

Надежность конструкций, определяемая в момент эксплуатации строительного объекта, представлена общепринятым интегральным показателем. Это свойство тесно связано с безотказностью и долговечностью объектов, которые способны изменять свои свойства под влиянием факторов внешней среды. Надежность определяется решением общего уравнения:

$$\int_0^{t_m} (dD / dt) dt = 1,$$
 в котором верхний предел интегрирования t_m является

безотказностью и долговечностью. При условии $D = 1$ конструкция будет разрушена.

Для того чтобы найти долговечность (t_m) применяется уравнение функциональной зависимости $dD(t) / dt$. Значение интеграла должно

близиться к 1 (больше 0,95, но меньше 1). В таблице 2 воссоздана используемая терминология.

Таблица 2

Терминология, используемая в процессе моделирования

Наименование	Обозначение	Обоснование
Кумулятивная функция распределения разрушения	$D(t)$	Вероятность аварии в период, не превышающий время установки конструкции (t). Вероятность разрушения располагается в диапазоне от 0 до 1. При возрастании времени (t) функция (D) ближе к 1, а при уменьшении периода эксплуатации функция стремится к 0. Если время будет равно 0, то функция будет равна 0
Функция работы конструкции без нарушения ее свойств	$S(t)$	Связь функций $S(t)$ и $D(t)$ определяется отношением $S(t)=1-D(t)$. Оно показывает вероятность того, что время работы конструкции без нарушений превосходит промежуток эксплуатации (t)
Функция допустимости аварии или возможная опасность аварии	dD	Пороговая значимость отношения допустимости деструкции во временных рамках $[t, t + \Delta t]$ к широте промежутка Δt , в рамках которого $t \rightarrow 0$
Функция эретизма разрушения	$\mu(t)$	Габариты разрушения стройконструкции отображают пороговое значение отношения допустимости аварии в промежутке времени $[t, t + \Delta t]$ к функции работы конструкции без нарушения ее свойств ($S(t)$) при условии, что $\Delta t \rightarrow 0$: $(dD/dt)/S(t) = dD/dt/(1 - D(t)) = \mu(t)$

Существует большое количество моделей конструкций, которые изменяют свои свойства в связи с влиянием на них внешних факторов и аварий [13].

Численность групп строительных конструкций принято измерять через равные промежутки времени n . В группы таблицы аварий включают величины, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Величины группы таблицы аварий

Величины	Обоснование
lt	Число безотказности конструкции по долговечности до t
dt	Число конструкций, изменивших свойства под воздействием внешних факторов в интервале времени $[t, t + n]$
$qt = \frac{dt}{lt}$	Вероятность разрушения конструкции в интервале времени $[t, t + n]$ под воздействием комплекса внешних факторов
$Lt = n \cdot lt + n + \binom{n}{2} dt$	Суммарное время безотказности конструкции в интервале времени $[t, t + n]$
$t = Lt + \dots + Lw$	Суммарное время безотказности конструкции всех членов группы в интервале времени равном t и выше
w	Значение периода конструкции, равного началу последнего периода
$et = Tt/lt$	Ожидаемая безотказная работа конструкции, которая проработала до времени t
$\mu(t) = -dl(t)/l(t)dt$	Интенсивность разрушения конструкции

Теории разрушения конструкции разделяются на 2 группы, которые описаны в таблице 4.

Стохастическая модель разрушения конструкции описывается частным случаем показательной функции – функцией экспоненты (рис. 1). Математическое трактование допустимости аварий, воспроизведенная в уравнении 1, служит предположительным отображением интенсивности деструкции стройконструкции экспоненциальной корреляции в

фиксированном промежутке времени в масштабе общего диапазона $[0, t_{mb}]$, где t_{mb} соответствует $D = 1$.

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

В этом уравнении R и α являются положительными параметрами, при этом $\alpha > 0$.

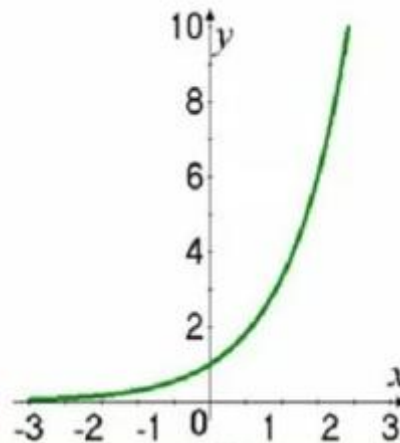
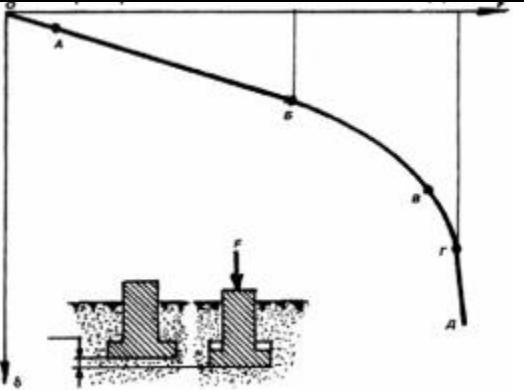


Рис. 1 - Стохастическая модель разрушения конструкции

Таблица 4

Теории разрушения конструкции

Название 1	Обоснование 2	Модель 3
Теория стохастической модели	Разрушение конструкции представлено суммарным значением последствий неблагоприятных событий, накопленных в процессе воздействия случайных факторов. При этом $t \rightarrow \infty$.	

1	2	3
Теория программируемой модели	Разрушение является неотъемлемым природным процессом	

Представим, что модель включает компоненту, зависящую от внешних причин, которые не связаны со степенью износа, возрастающей с течением роста продолжительности эксплуатации конструкции. В данном случае уравнение принимает вид:

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

В этом уравнении A – фоновая компонента разрушения.

Это помогает минимизировать противоречие реальности и аппроксимации в промежутке времени $< t$ по отношению ко времени монтажа конструкции. Большое значение имеет то, что в идеологию причины аварии, помимо технически-обусловленной компоненты износа конструкции, вносится фоновая компонента, которая представляет собой детерминанту воздействия внешней среды.

Принцип строится на быстром увеличении масштаба разрушения строительной конструкции, что противоречит изменению разрушения в интервале времени $< t$ относительно момента установки конструкции. В приведенном случае для конструкций характерно уменьшение аварий сразу после установки конструкции в первый год эксплуатации и до 25 лет дальнейшей эксплуатации. Конструкции здания, прошедшие капитальный ремонт, распределяют факторы производства в среде своих подсистем,

которые делают возможным воспроизводство и регенерация повреждений. Для конструкций здания, которые прошли капитальный ремонт, интенсивность разрушения заметно уменьшается.

Влияние окружающей среды на конструкцию является косвенным показателем изменения продолжительности ее безотказной работы.

Общий коэффициент аварий в частных случаях используется как показатель продолжительности работы конструкции без нарушения свойств в системе мониторинга инженерно-технического обеспечения. Для вычисления данного коэффициента применяется выражение отношения числа аварийных конструкций, используемых за год, к среднегодовому числу безотказно-работающих конструкций, которое рассчитывается на количество элементов Q , в большем количестве случаев $Q=1000$:

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

В этом уравнении m является общим коэффициентом разрушения конструкции. M – числом конструкций, которые получили физический износ в пределах от 61 до 80% за год. S - численность элементов здания.

По критерию общей аварийности подход к оценке качества безотказной работы конструкции является правомерным только в том случае, если все факторы, определяющие надежность работы строительной конструкции, действуют одинаково, что практически невозможно. Для жилых и производственных зданий и сооружений более важное положение занимает надежность совокупности элементов, определяющая эксплуатационные качества и безопасность. В связи с этим, при столкновении с задачами такого рода, нужно учитывать показатели аварийности в зависимости от физического износа конструкции.

При использовании «нагрузочных» моделей интенсивности разрушения строительной конструкции воздействие отрицательных факторов

внешней среды представлено нагрузочной функцией. Для того, чтобы оценить работу конструкций, сопоставить нагрузки и несущую способность элементов, требуется определять расчетные схемы и владеть методами расчета конструкций.

Состояние строительной конструкции характеризуется дефектами, накопленными в процессе эксплуатации за определенное время, которые снижают ее надежность.

Интенсивность разрушения $\mu(t,p)$ в моделях такого рода представляется произведением функций технического состояния конструкции $\beta(t,p)$ и интенсивности нагрузки $h(t,P)$:

$$\mu(t,p) = \beta(t,p) \cdot h(t,P), \quad (4)$$

В данном уравнении параметр P описывает неблагоприятное воздействие факторов, которые заметны на стадии проектирования. Величина степени силы нагрузки $h(t,P)$ описывается уравнением:

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

При этом стоит учесть равенство: $h(t) = h(t, 0)$. Значение $\Delta h(t,P)$ является вспомогательным элементом нагрузки, обусловленным действием разрушительного внешнего фактора.

Для нахождения степени силы разрушения конструкции также применяется следующее выражение:

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

В данном произведении применяются:

$\mu(t)$ - функция степени силы повреждения без учета влияния неблагоприятных факторов наружной среды; $(1 + \Delta h(t,P)/h(t))$ - функция,

которая учитывает вспомогательный элемент внешней нагрузки;

$\exp\left(\alpha \int_{t_0}^t \frac{h}{h_1} dt\right)$ – показательная функция кумуляции повреждений за время

$t = 0$ от начального момента влияния отрицательных факторов. Под действием постоянной нагрузки значения α и h_1 являются константами.

Разрушение конструкций редко происходит внезапно. Чаще всего оно случается по мере развития и накопления повреждений в конструкциях. В большинстве случаев визуально наблюдается постепенное появление признаков, которые внешне проявляются на конструкциях. Примерами могут быть трещины и деформации. С проявления первых признаков повреждения конструкции до её полного разрушения проходит определённый промежуток времени, за который необходимо оценить степень дефекта и определить план действий по предотвращению аварии. Развитие дефектов протекает с разной скоростью. Для предотвращения неблагоприятных последствий необходимо оценить начальные признаки повреждения, выявить причины его возникновения и определить возможность и быстроту его развития [14].

Износ можно обозначить результатом нарушения работоспособности системы с течением времени из-за увеличения энтропии на структурных уровнях. На износ конструкции оказывают влияние внутренние и внешние причины. Внутренние обусловлены вторым законом термодинамики, а внешние - факторами окружающей среды, которые частично возмещают внутренние изменения. Данные проблемы могут быть устранены с помощью внешнего воздействия. Несмотря на благоприятные условия эксплуатации, с течением времени конструкции подвергаются старению и утрачивают свои первоначальные свойства. Для предотвращения последствий, к которым могут привести аварии, необходимо своевременно оценивать состояние

конструкций, проводить прогнозирование возможного развития повреждений и составлять план действий по устранению и стабилизации дефектов.

Литература

1. Шеина С.Г., Новоселова И.В., Чернявский И.А. Организационно-технологические подходы к оценке безопасности зданий, пострадавших в результате природных и техногенных аварий и катастроф // Инженерный вестник Дона, 2022, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7795.
2. Hussamadinu Raafat., Jansson Gustav, Mukkavaara Jani. Digital Quality Control System—A Tool for Reliable On-Site Inspection and Documentation // Luleå University of Technology. Sweden Buildings 2023. 13(2), 358 p; URL: doi.org/10.3390/buildings13020358.
3. Shuo Yuan, Yanqing Wang, Limin Kang, Zhengquan Yu, Yong Fen. Discussion on Quality Management and Control in Construction Engineering. // Smart Construction Research. vol. 2 Issue 1. June 2018. pp. 1-5. DOI:10.18063/scrv 0.653.
4. Ройтман А.Г. Предупреждение аварий жилых зданий. М.: Стройиздат, 1990. 240 с.
5. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. СПб.: Центр качества строительства, 1998. 96 с.
6. Лapidус А.А., Экба С.И., Билонда Трегубова Е., Кормухин С.А. Методика оценки потребности проведения капитального ремонта для каждого типа многоквартирного дома // Инженерный вестник Дона, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8387.
7. Сергеева А.Ю., Сергеев Ю.Д., Мясищев Ю.В., Мясищев Р.Ю. Анализ факторов, влияющих на организационно-технологическую надежность строительства // IX Международная научно-практическая

конференция "Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России - синтез наук в конкурентной экономике". Воронеж: ВГТУ, 2021. С. 223-232.

8. 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.

9. Ассайра М. М. Эффективная оценка и управление рисками строительства в условиях глобального экономического кризиса // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4756/.

10. Mishchenko V.Ya., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishev Yu., Myasishev R. Selection of methods of inspection of building structures to prevent damage // In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. pp. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012063.

11. Henley E.J., Kumamoto H. Probabilistic risk assessment: Reliability Engineering, Design, and Analysis // IEEE Press. New York. 1992. 596 p.

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. 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.

14. Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Коваленко А. И. Вероятностный подход к оценке риска прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. 2021. №10. С. 36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.

References

1. Sheina S.G., Novoselova I.V., Chernyavskiy I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7795.
2. Hussamadinu Raafat., Jansson Gustav, Mukkavaara Jani. Luleå University of Technology. Sweden Buildings 2023. 13(2), 358 p. URL: doi.org/10.3390/buildings13020358.
3. Shuo Yuan, Yanqing Wang, Limin Kang, Zhengquan Yu, Yong Fen. Smart Construction Research. vol. 2 Issue 1. June 2018. pp. 1-5. DOI:10.18063/scrv.0.653.
4. Rojzman A.G. Preduprezhdenie avarij zhilyx zdaniy [Prevention of accidents in residential buildings]. M.: Strojizdat, 1990. 240 p.
5. Grozdov V.T. Texnicheskoe obsledovanie stroitelnyx konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Technical inspection of building structures of buildings and structures]. SPb.: Centr kachestva stroitelstva, 1998. 96 p.
6. Lapidus A.A., Ekba S.I., Bilonda Tregubova YE., Kormukhin S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8387.
7. Sergeeva A.Yu., Sergeev Yu.D., Myasishhev Yu.V., Myasishhev R.Yu. IX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Problemy sovremennyx ekonomicheskix, pravovyx i estestvennyx nauk v Rossii - sintez nauk v konkurentnoj ekonomike". Voronezh, 2021. pp. 223-232.



8. Petrov K.S., Fedoryaka A.V., Lami Karrar, Semencz V.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717.
9. Assira M. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4756/.
10. Mishchenko V.Ya., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishev Yu., Myasishev R. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. pp. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012063.
11. Henley E.J., Kumamoto H. IEEE Press. New York. 1992. 596 p.
12. Fedotova M. I., Shmelev G. D. Scientific Journal. 2022. No. 2(21). pp. 30-37. DOI: 10.36622/VSTU.2021.21.2.003.
13. 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.
14. Vedyakov I.I., Solov`ev D.V., Kovalenko A.I. Ezhemesyachny`j nauchno-texnicheskij i proizvodstvenny`j zhurnal. 2021. №10. pp. 36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.

Дата поступления: 9.01.2024

Дата публикации: 28.02.2024