

# ПОВРЕЖДЕНИЯ И АВАРИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**В. Н. Левченко, к.т.н., профессор; С. Н. Машталер, к.т.н., доцент**

ФГБОУ ВО «ДОННАСА», г. Макеевка

*Аннотация.* Анализ различных отказов и аварий строительных конструкций показал, что многие из них не произошли бы при рациональной организации проектирования производства работ и эксплуатации строительных конструкций. В то же время обзор произошедших аварий и повреждений позволяет составить некоторые практические рекомендации по совершенствованию проектных решений и технологических процессов строительного производства.

В статье приведены основные мероприятия и схемы, при которых возможно исключение вероятностного появления случаев отказа и аварий конструкций, а также отражено особое внимание совместному воздействию износных и внезапных отказов. Кроме того, установлено, что закономерность возникновения внезапных или постепенных отказов, а также вероятность их совместного воздействия на конструкцию могут быть с достаточной достоверностью установлены в результате статистической обработки обширных экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* коррозия, безотказность, вероятность, надежность, деформация.



*Левченко  
Виктор Николаевич*



*Машталер  
Сергей Николаевич*

Изучение причин повреждений и аварий строительных конструкций всегда привлекает внимание ряда научно-исследовательских организаций и отдельных авторов. Систематические исследования в этой области проводились в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко) под руководством А. А. Шишкина. В этой области широко известны труды А. Н. Шкинева [8], И. А. Физделя [6] и других специалистов. Из иностранных авторов следует отметить Ролта-Хэммонда [4] и Томаса Х. Мак Кейга [5].

Приведенные в указанных работах результаты научных исследований и описание аварий и повреждений не позволяют вывести строгие математические закономерности внезапных и постепенных отказов, так как пока еще отсутствует единая научно обоснованная методика накопления и обработки экспериментальных статистических данных. Тем не менее, анализ причин известных аварий и повреждений позволяет составить некоторые практические рекомендации по совершенствованию проектных решений и технологических процессов строительного производства. Если отбросить иногда встречающиеся грубые ошибки, то главными причинами возникновения внезапных или износных отказов следует считать: по линии проектирования – недостаточно точный учет конкретных производственных и эксплуатационных условий; по линии производства – несовершенство организаций технического контроля качества и авторского надзора за соблюдением проектных решений.

Из материалов А. Н. Шкинева [8] об авариях строительных конструкций видно, что отказы в работе чаще всего наступают в результате совместного воздействия нескольких причин, главными из которых следует считать: отступление от проектных решений, низкое качество исходных материалов, нарушение технических условий на производство изготовительных и монтажных работ; особо следует отметить плохую организацию или полное отсутствие производственного контроля качества, недостаточный авторский и технический надзор.

Внезапные отказы сборных железобетонных конструкций чаще всего происходят из-за неправильной постановки монтажных связей, чрезмерных отклонений в сопряжениях элементов, нарушений технологии при выполнении стыков. Постепенные отказы вызываются коррозией металла стыковых соединений и бетона элементов, образованием трещин, пустот и недостаточной толщиной защитного слоя.

Аварии кирпичных зданий объясняются главным образом несоблюдением правил производства работ в зимнее время и наличием недопустимых размерных отклонений в местах опирания элементов перекрытий на столбы или стены.

Томас Х. Мак Кейг [5] описывает серию аварий, произошедших в результате воздействия нескольких причин, которые в конечном итоге сводятся к грубым нарушениям правил производства работ и отступлением от проектных решений. В ряде примеров автор указывает на социальные причины некоторых аварий. Погоня подрядчиков за прибылью и стремление любой ценой снизить стоимость строительства приводят иногда к недопустимому уменьшению расчетных сечений несущих конструкций, размеров фундаментов и экономии на техническом надзоре.

Изучение аварий показывает, что многие из них не произошли бы при рациональной организации проектирования производства работ и эксплуатации строительных конструкций [2, 3, 7, 10].

Для этого необходимо:

- прогнозировать вероятность возникновения внезапных и постепенных отказов применительно к конкретным условиям строительства и эксплуатации зданий и сооружений, устанавливая в процессе проектирования минимальный, практически допустимый процент риска;

- при производстве изготовительных строительно-монтажных работ организовать активный производственный контроль качества, обеспечивающий обязательное совпадение действительных характеристик начальной безотказности строительных конструкций с проектными (теоретическими);

- организовать техническую эксплуатацию зданий и сооружений в соответствии с предъявленными к ним требованиями долговечности и ремонтпригодности.

Очевидно, что вероятностная оценка степени надежности и долговечности строительных конструкций может быть правильной только в том случае, если она будет базироваться на экспериментальных статистических данных, сбор которых следует считать одной из главных задач общегосударственной службы надежности.

Эта работа должна проводиться применительно к различным видам строительных конструкций зданий и сооружений, выполненных из различных материалов, примерно по следующей схеме [1, 7]:

1. Анализ проектных решений и оценка теоретических характеристик надежности (начальной безотказности, долговечности и ремонтпригодности). Определение проектного процента риска возникновения внезапных и износных отказов.

2. Накопление экспериментальных данных о действительных физико-механических и геометрических характеристиках качества элементов и конструкций в процессе осуществления пооперационного производственного контроля за ходом технологических процессов производства.

3. Сбор экспериментальных данных об интенсивности воздействия внешней среды, деформаций грунта, коррозии, старения, истираемости материалов и других факторов, влияющих на долговечность элементов и конструкций, а также об изменчивости эксплуатационных нагрузок.

Особое внимание должно быть уделено совместно-му воздействию износных и внезапных отказов [2]. При длительном износе элементов строительных конструкций их расчетные характеристики могут настолько уменьшиться, что конструкция перестанет удовлетворять требованиям безотказности. Запас прочности, установленный с учетом требований долговечности, будет поглощен износом, и конструкция приблизится к предельному состоянию. Может отказаться, что эксплуатационные нагрузки или климатические воздействия (ветер, снег) достигнут в это время наибольшей величины, и тогда наступит авария.

Закономерность возникновения внезапных или постепенных отказов, а также вероятность их совместного воздействия на конструкцию могут быть с достаточной достоверностью установлены в результате статистической обработки обширных экспериментальных данных.

На основе уже известных теоретических положений и полученных экспериментальных данных может быть высказана гипотеза, вероятность возникновения внезапных отказов, являющихся следствием изменчивости физико-механических и геометрических характеристик качества и внешних нагрузок, описывается законом нормального распределения. Интенсивность постепенных износов элементов строительных конструкций, чаще всего зависящая от воздействия какого-либо одного фактора, подчиняется экспоненциальному закону [3].

Причиной выхода сооружения из строя обычно является либо строительный дефект, либо перенапряжение конструктивных элементов вследствие увеличения усилий, вызванных различными факторами: перегрузкой, вынужденными температурными деформациями, коррозией, перераспределением усилий в связи с деформациями основания, а также между отдельными элементами вследствие усадки и ползучести.

В начальный период работы сооружения, когда его элементы находятся в состоянии приработки, часто выявляются неисправности и дефекты, вызванные недостатками производства работ или проектирования.

Понятие разрушения строительных элементов здания или сооружения как конечного изменения их состояния можно рассматривать под углом зрения достижения дефектами и повреждениями предельных величин.

Поскольку реальная окружающая среда подвержена изменениям в течение жизненного цикла конструкций, то и фактические сроки службы не являются стабильными. Через дефекты и повреждения обеспечивается обратная связь от сооружения к нормам проектирования, что способствует их совершенствованию.

Один из наиболее развиваемых подходов к изучению долговечности существующих железобетонных конструкций реализуется на основе экспертной оценки параметров эксплуатационного состояния сооружения: визуально или инструментально обнаруженных дефектов и повреждений

Между дефектами и повреждениями чаще всего существует связь в виде «цепной реакции»: допу-

щенные при изготовлении и монтаже дефекты могут развиваться при эксплуатации, при этом возникают новые нарушения структуры материала от воздействий окружающей среды и нагрузок [1].

Накопление повреждений при силовых воздействиях и деформации вызывается:

– *повторным действием нагрузок*, под влиянием которого нарушается структура бетона. Процесс нарушения структуры при действии сжимающих усилий начинается с образования микротрещин, направленных вдоль действия усилия и существует тенденция их дальнейшего развития вплоть до разрушения;

– *длительным действием нагрузок*, когда повреждения приводят к деструкции материала при напряжениях, превышающих предел длительной прочности  $R_b(t) = (0.82 \div 0.85) R_b(t)$ .

Природа ползучести бетона связана с его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при длительном твердении цементного камня. При напряжениях в бетоне предел границ микротрещинообразования  $R_{cr}^o$  происходит уплотнение структуры, и прочность бетона повышается.

Силовые воздействия на уровне железобетонных конструкций проявляются чаще всего в виде разрушений защитного слоя, потери устойчивости сжатых элементов, наклонных и нормальных трещин, разрушения сжатой зоны бетона, образования продольных трещин и проскальзывания арматуры на торцевых участках.

В справочной, научной и нормативной литературе существуют разные взгляды на классификацию дефектов и повреждений в зависимости от типов объектов и назначения классификации.

Разнообразие и взаимодействие факторов, регулирующих долговечность железобетонных конструкций, привели к необходимости разработки общей схемы, приближенно моделирующей особенности процесса накопления повреждений и дающей более четкое представление о причинах этого феномена (рисунок 1). Общая классификация повреждений железобетонных конструкций дана по следующим признакам: причины и характер повреждений, вид воздействий, уровень изученности, форма проявления и стадия накопления. Рассмотрены повреждения, обнаруживаемые при визуальном наблюдении; скрытые и предполагаемые повреждения, выявляемые с применением методов, средств и правил. Особенностью подхода является то, что повреждения рассматриваются как внешнее или скрытое проявление необратимых процессов износа и старения.

Рекомендуемая область практического приложения классификации: системы контроля за дефектами и повреждениями, накапливающимися за длительный период эксплуатации; банки данных для разработки систем экспертных оценок; управляющие системы сетевого уровня для поддержания и ремонта железобетонных конструкций. При анализе причин и подготовке схем ранжирования повреждений железобетонных конструкций обычно используются данные институтов ЦНИИпромзданий, Харьковского ЦНИИпромстройпроекта, МГСУ, НИИЖБ.

Классификация основных повреждений железобетонных конструкций по их внешнему проявлению дана в таблице 1.

К эксплуатационному износу отнесены повреждения, накопившиеся за время межремонтных периодов эксплуатации, а также нарушения приемов техобслуживания, профилактического или капитального ремонтов.

В перечень конструктивных дефектов включены дефекты, возникшие на разных этапах воздействия и разработки конструкций в результате недостаточной информации, нарушений стандартов и строительных правил, неосознанных ошибок, а также вследствие длительных перерывов в строительстве без надлежащей консервации.

Оценка надежности как степени физического износа железобетонных конструкций, пригодности сооружений к эксплуатации, сроков и вида ремонтов выражается через оценку технического состояния эксплуатируемого сооружения и его элементов, выполняемую путем натурных обследований, поверочных расчетов и пробных испытаний (рис.2 и таблица 2) [3].



Рис. 1. Общая классификация повреждений железобетонных конструкций

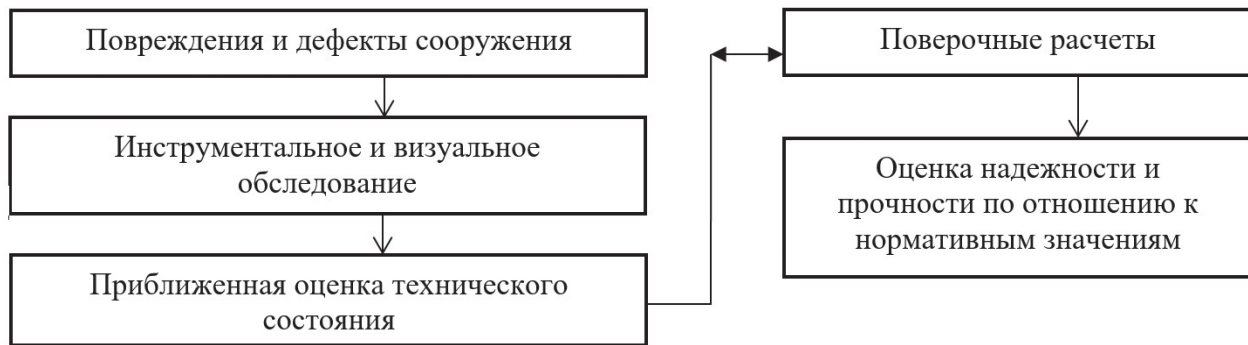


Рис. 2. Схема оценки надежности по внешним признакам или изменению технического состояния конструкций

Таблица 1.

Классификация необратимых процессов по их внешнему проявлению

Характер процесса	Вид повреждения	Разновидности повреждений
Объемный	Разрушение	Нарушение сцепления бетона и арматуры; разрыв арматурных стержней; сквозные вертикальные трещины большой протяженности; чрезмерное раскрытие горизонтальных и наклонных трещин; «хлопающие» трещины.
	Деформация	Значительные деформации элементов: осадка или крен сооружения; выпучивание домкратных стержней.
	Изменение свойств материала или конструкции	Снижение плотности и прочности бетона на 20 % и более; изменение структуры бетона и пластических свойств арматуры при циклических нагружениях; трещинообразование.
Поверхностный	Коррозия	Пласты, потеки и другие коррозионные разрушения бетона; скрытые дефекты и нарушение защитного слоя, вызывающие коррозию арматуры.
	Изменение свойств поверхностного слоя	Повреждение вследствие внешних воздействий на бетон; изменение шероховатости; разрушение бетона вследствие отслоений, раковин, каверн; трещины в торкретном или поверхностном слое.
	Износ	Повреждения бетона, вызванные механическими ударами или в результате истирающего действия сыпучих материалов для емкостных сооружений; усталость поверхностных слоев

Техническое обследование инженерных сооружений производится с целью получить фактические данные о размерах, прочности и повреждениях конструкций, которые необходимы при разработке проектов усиления; выяснения причин повреждений и аварий, а также для оценки остаточной несущей способности железобетонных конструкций. При этом отражается влияние длительной эксплуатации (малоцикловые нагрузки, внешние среды, длительность воздействий) на показатели надежности.

Основные этапы технического обслуживания: сбор и анализ проектной документации; обследование визуальными и инструментальными методами, длительное наблюдение и измерение для определения характера развития деформаций во времени, испытания пробной нагрузкой.

Оценка технического состояния с использованием классификации повреждений производится по категориям технических состояний на основании инструментальных и визуальных обследований [3].

Практические и теоретические аспекты накопления повреждений в строительных конструкциях освещены в работах [4, 5, 6, 7, 8].

Потеря эксплуатационных качеств железобетонных элементов инженерных сооружений из-за необратимого накопления повреждений проявляется на всех

этапах их работы до наступления отказа. Снижение этих качеств на уровне конструкции выражается в форме снижения ее несущей способности, приращения прогибов, дополнительного раскрытия существующих трещин и появления новых трещин. После наступления отказа железобетонная конструкция снижает работоспособность и не в состоянии воспринимать в полном объеме рабочие нагрузки от давления сыпучего материала или жидкости.

Если допустить, что фактический срок службы подчиняется закону нормального распределения и интенсивность износа в течение срока службы постоянна, то закон сохранения во времени железобетонных конструкций (величина, обратная износу) может быть выражен как;

$$v = e^{-\alpha t} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – опытный коэффициент, принимающий ориентировочные значения 0.003–0,005;

$t$  – время (в годах).

В предположении экспоненциального закона и при цепной схеме накопления повреждений железобетонных конструкций приближенная величина относительной надежности конструкций при эксплуатации  $y = \gamma/\gamma_0$  и величина этих повреждений  $\varepsilon = I - y$  через  $t_F$  лет эксплуатации может быть найдена по формуле:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

где  $\lambda = \frac{\ln}{t_F}$  – постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения несущей способности в момент обследования;  $\gamma$  – фактический коэффициент надежности конструкций с учетом имеющихся повреждений;  $y = \gamma/\gamma_0$  – относительная надежность, определяемая по категориям технического состояния конструкции в зависимости от ее повреждений;  $t_F$  – срок эксплуатации конструкций к моменту обследования.

Значения  $y$  и  $\varepsilon$  для различных категорий технического состояния даны в таблице 3. Преобразуя (2), получим выражение для определения эксплуатации конструкции в годах с начала эксплуатации:

$$t = \frac{\ln y}{\lambda} = \frac{\ln(\gamma/\gamma_0)}{\lambda} \quad (3)$$

Тогда срок эксплуатации до капитального ремонта и срок наступления аварийного состояния в годах с начала эксплуатации выразятся соответственно как:

$$t = \frac{0.162}{\lambda} \quad (4)$$

$$t = \frac{0.43}{\lambda} \quad (5)$$

Таблица 2.

Категория технического состояния

Категории технического состояния	Описание технического состояния	Относительная надежность $y = \gamma/\gamma_0$	Поврежденность $\varepsilon = 1 - e^{-\lambda t}$
1	2	3	4
1	Исправное (нормальное): повреждения отсутствуют	1	0
2	Удовлетворительное: незначительное снижение несущей способности	0,95	0,05
3	Неисправное: несущая способность снижена, требуется средний ремонт	0,85	0,15
4	Недопустимое: непригодность конструкции к эксплуатации	0,75	0,25
5	Аварийное: немедленная разгрузка конструкции	0,65	0,35

Недостатком данного детерминированного подхода является условность относительной надежности и приближенность ее величины из-за неполного учета возможных вариаций входящих в него коэффициентов надежности, предопределенности закона ее изменения и фиксированного значения  $\lambda$ ; область применения ограничена оценкой только эксплуатируемых конструкций и не может быть использована

при прогнозировании ресурса на стадии их проектирования; за пределами оценки остаются скрытые формы повреждений.

В наиболее простой форме изменение эксплуатационного качества конструкции вплоть до выхода ее из строя, то есть отказа, вследствие постепенного развития повреждений может быть выражено через уравнение накопления повреждений;

$$\Delta(t) \leq \Delta_{\text{lim}} \quad (6)$$

где  $\Delta(t)$ ;  $\Delta_{\text{lim}}$  – соответственно текущее значение и предельная величина повреждений.

В реальных условиях эксплуатации конструктивные элементы инженерных сооружений подвергаются нескольким воздействиям в различной последовательности или одновременно. Вследствие этого возрастают скорости деградиационных процессов и интенсивность накопления повреждений. В теоретическом плане влияние нескольких факторов может быть учтено введением многофакторной меры повреждений  $D$ , принимаемой априорно  $D$ , [9]:

$$D = \frac{\Delta(\chi_1, \dots, \chi_j; \sigma; t)}{\Delta_k - \Delta_0} \quad (7)$$

где  $\Delta_0$  – значение меры повреждений в начальный период эксплуатации  $t = 0$ ;  $\Delta_k$  – конечное значение меры накапливаемых повреждений;  $\Delta(\chi_1, \dots, \chi_j; \sigma; t)$  – текущее значение меры в момент наступления отказа в течение времени  $t$  в зависимости от величины напряжений, переменных факторов режима нагружения и условий эксплуатации  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_j$ .

## ВЫВОДЫ

Вероятностная оценка степени надежности и долговечности строительных конструкций может быть правильной лишь в том случае, если она будет базироваться на экспериментальных статистических данных, сбор которых осуществляется по следующей схеме:

- анализ проектных решений и оценка теоретических характеристик надежности;
- определение проектного процента риска возникновения внезапных и износных отказов;
- накопление экспериментальных данных о действительных физико-механических и геометрических характеристиках качеств элементов и конструкций;
- сбор экспериментальных данных об интенсивности воздействия внешней среды, деформаций грунта, коррозии, старения, истираемости материалов и других факторов, влияющих на долговечность элементов и конструкций, а также об изменчивости эксплуатационных нагрузок.

## Список литературы

1. Калинин, В. М. Оценка технического состояния зданий и сооружений. Учебник. ИНФРА / В. М. Калинин, С. Д. Сокова. – Москва: 2009. – 267 с. – Текст: непосредственный.

2. Левченко, В. Н. Анализ методов оценки технического состояния и методология экономических обоснований повышения долговечности строительных конструкций при реконструкции зданий и сооружений. Учебное пособие / В. Н. Левченко, С. Н. Маишталер. – Макеевка. 2021. – 272 с. – Текст: непосредственный.
3. Пухонто, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений. Издательство АСВ. – Москва: 2004. – 435 с. – Текст: непосредственный.
4. Ролт Хеммонт. Аварии зданий. – Москва: Стройиздат. 1980. – 127 с. – Текст: непосредственный.
5. Томас Х. Мак Кейг. Строительные аварии. – Москва Стройиздат. – 1967. – 205 с. – Текст: непосредственный.
6. Физдель, И. А. Дефекты бетонных и каменных сооружений и методы их устранения. – Москва: Стройиздат. 1983. – 96 с. – Текст: непосредственный.
7. ЦНИИСК им. Кучеренко В. А. Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. (Методы восстановления и совершенствования). – Москва: Стройиздат. 1985. – 117 с. – Текст: непосредственный.
8. Щпинеv, А. М. Аварии на строительных объектах, их причины и способы предупреждения и ликвидации. Изд. 2-е – Москва: Стройиздат. 1976. – 308 с. – Текст: непосредственный.
9. Чирков, В. П. Основы теории расчета ресурса железобетонных конструкций //Бетон и железобетон/. – 1990. – № 10, с. 15-17.
10. Брыжатый, О. Э. Влияние состояния узловых сопряжений сборных конструкций на работу элементов каркаса многоэтажного здания [Электронный ресурс] / О. Э. Брыжатый, Э. П. Брыжатый // Строитель Донбасса. – 2021. № 2 (15), 2021 – С. 15-19. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/sd/2021/sd\\_2021-2\(15\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2021/sd_2021-2(15).pdf).