

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра «Мосты и транспортные тоннели»**

**АШРАБОВ А. А., РАДЖАБОВ Т. Ю.**

**ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ  
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Учебное пособие**

**Ташкент – 2011**

УДК 624. 046:5

В учебном пособии изложены основные положения теории надежности конструкций транспортных сооружений и даны основные терминологические понятия и определения, используемые в практических расчетах элементов на надежность. Приведены понятия и классификация отказов и дефектов в конструкциях. В пособии освещены основные аспекты исследования и принципы анализа надежности конструкций и сооружений с учетом технического состояния транспортных сооружений за период эксплуатации, отмечены основные факторы, определяющие надежность сооружений. Рассмотрены вероятностно-статистические и стохастические основы расчета надежности элементов сооружений. Обобщены и изложены вероятностные понятия случайных событий, величин и потоков случайных событий, даны их характеристики. Подробно освещены основные характеристики и законы распределения случайных величин, процессов и событий, применяемые в практических расчетах элементов на надежность. Рассмотрены системы случайных величин. Во всех разделах пособия приведены примеры решения задач различной степени сложности, имеющих практическое и прикладное значение.

Учебное пособие предназначено для бакалавров направлений 5А580200-Строительство зданий и сооружений (Транспортное строительство), 5А580400 – Строительство инженерных сетей, 5580600 – Эксплуатация искусственных сооружений, 5140900 – Педагогическое образование и магистрантов специальностей 5А580212 – Мосты и транспортные тоннели, 5А580603 – Эксплуатация мостов и транспортных тоннелей, 5А580204 – Проектирование, строительство зданий и сооружений и аспирантов строительных факультетов и ВУЗов, и может быть использовано инженерно-техническими работниками научных и проектных организаций. Рисунков – 16; таблиц – 5; библиография – 11 наим.

**Составители:** проф. А. А. Ашрабов, ст. преп. Раджабов Т. Ю.,

**Рецензенты:** д.т.н, проф. кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» А. Ф. Шахидов.

Учебное пособие одобрено на заседании кафедры «Мосты и транспортные тоннели» и утверждено учебно-методическим советом Дорожно-строительного факультета ТАДИ.

Ташкентский автомобильно дорожный институт - 2011 г.

# ГЛАВА I. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

## 1.1. Общие положения

Проектирование и строительство транспортных сооружений, обладающих все более высокими качествами, составляет основное содержание технического прогресса в дорожном строительстве. Доминирующим признаком качества конструкций любых сооружений как строительных систем является их *надежность* – количественный статистический показатель, объединяющий комплекс физико–механических, геометрических, расчетных и эксплуатационных характеристик. Однако, чем сооружение сложнее и многофункциональнее, тем труднее обеспечить его надежность, т. к. оно представляет собой сложную систему, предназначенную для выполнения разнообразных функций. Совокупность потребительских свойств, характеризующих полезные функции конструкций в строительных системах, и определяющих степень их соответствия требованиям эксплуатации, представляет их *качество*. Помимо основных функций, составляющих главное назначение строительных систем (прочность, устойчивость, безопасность), может ставиться еще ряд дополнительных требований, например, эстетические требования, требования комфорта и т. п.

С первого дня существования сооружения в отдельных его узлах и конструкциях начинают происходить изменения, выражающиеся в ухудшении характеристик и показателей. Эти изменения по важности и интенсивности различны: одни приводят к ухудшению эксплуатационных качеств, другие – к авариям и разрушениям всего сооружения; одни можно быстро устранить, другие устранить вообще невозможно; одни протекают во времени медленно и непрерывно, другие – внезапно, случайно, бессистемно. Но все изменения через какой–то промежуток времени приводят к нарушению работоспособности конструкции или сооружения (невозможности выполнения заданных функций или разрушению). Таким образом, на протяжении всего срока нормального функционирования сооружения имеется *вероятность* (возможность) выхода его из строя полностью или отдельных его элементов. Чем меньше такая вероятность, тем надежнее сооружение.

Качество сооружения как строительной системы должно сохраняться в течение всего времени, установленного для её эксплуатации. В понятие эксплуатации включается не только полезное функционирование строительной системы, но и вся совокупность операций над нею, начиная от изготовления и кончая демонтажем или сносом. Качество может быть утрачено не только во время функционирования, но и, например, при возведении или транспортировании. Вопрос о сохранении качества имеет весьма большое значение. Реальная система всегда в той или иной мере отличается от идеализированной системы, составляющей содержание проекта. Это отличие обусловлено многочисленными технологическими несовершенствами, дефектами материала, некондиционностью комплектующих элементов и т. п. Условия эксплуатации реальной системы также могут существенно отличаться от тех условий, которые рассматривались на стадии проектирования. Поэтому параметры функционирования реальной системы могут оказаться далекими от расчетных значений. Таким образом, не будет обеспечен необходимый уровень качества системы и она окажется недостаточно эффективной.

Разработка методов оценки надежности систем и создания систем, обладающих заданными показателями надежности и долговечности, составляет содержание *теории надежности*. В качестве основных предпосылок для создания единой теории надежности строительных конструкций и сооружений используются результаты исследований в рамках следующих научных направлений: математическая теория надежности; теория надежности систем в смежных областях науки и техники; статистические методы расчета строительных конструкций; метод расчета конструкций по предельным состояниям; методы обследования, испытаний и контроля качества материалов и конструкций; теория долговечности материалов и конструкций; принципы технической эксплуатации зданий и сооружений; типизация, стандартизация и унификация основных элементов и конструкций и др. Наиболее существенным достижением теории является создание достаточно общей системы понятий и терминов, нашедших отражение в ГОСТ 13377–75 и применимых в различных областях техники, в том числе к строительным сооружениям.

*Надежностью* можно назвать свойство строительной системы, заключающееся в ее способности выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации. Другими словами, надежность – это устойчивость качества строительной системы по отношению ко всем возможным возмущениям, которые могут встретиться при её изготовлении, возведении, полезном функционировании, транспортировании, хранении и т. п. В зависимости от назначения строительной системы и условий ее эксплуатации надежность может включать такие свойства, как *безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость* или любое сочетание этих свойств.

Согласно ГОСТ 13377–75, *надежность определяется как свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.*

Отсюда видно, что обеспечение надежности основных конструкций сооружения на всех этапах эксплуатации – важнейшая технико–экономическая проблема его проектирования, строительства и эксплуатации. При строительстве сооружения несущие конструкции должны обладать такими запасами прочности, которые обеспечивали бы его нормальное функционирование на протяжении всего срока службы с учетом снижения прочности и ухудшения технических характеристик во времени за счет износа, влияния окружающей среды, внешних и внутренних нагрузок и т. д., с учетом обеспечения нормативной системы технического обслуживания и ремонта. Но эти запасы прочности должны быть экономически оправданы. Чем выше начальная надежность, тем больше стоимость сооружения. Оптимальный уровень надежности определяется из условий минимума затрат на строительство и его содержание за весь период существования. В связи с этим, целью поисков является не максимальная возможная надежность, а нахождение оптимального компромисса между приведенными затратами и надежностью.

Различают: *проектную (теоретическую, расчетную) надежность* сооружения, предусмотренную документацией на его строительство; *начальную надежность* – фактическую надежность построенного сооружения к моменту начала его эксплуатации; *эксплуатационную надежность* – фактическую надежность на любом этапе использования сооружения. Исследование надежности сооружения в конечном итоге имеет две цели: обеспечение надежности уже построенных сооружений (эксплуатационной надежности) на

любом этапе его использования; накопление информации о надежности для учета ее при проектировании и строительстве новых сооружений в порядке обратной связи. Исследуя надежность основных конструкций сооружений, рассматривают пять её аспектов:

*философский*, включающий фундаментальные вопросы теории, концепций, определений и формулировок. Сюда входят критерии отказов отдельных конструкций и сооружений в целом, классификация отказов по значимости в системе всего сооружения;

*математический*, устанавливающий вопросы формализации расчетов сооружений и конструкций с учетом изменчивости внешних и внутренних факторов во времени, специализацию и углубление расчета детерминированных систем, составляющих сооружение;

*научно–технический*, рассматривающий вопросы генезиса и синтеза системы сооружения, включающие классификацию элементов и конструкций по важности (применительно к надежности), расчетные схемы, методы и модели, сведение отдельных элементов («простых» систем) к сложным;

*экономический*, предусматривающий оптимизацию расчетов надежности с учетом всего срока эксплуатации с использованием вероятностных методов;

*организационный*, включающий получение, накопление и обработку информации о характеристиках элементов сооружений в течение их эксплуатации, организацию и внедрение нормативной системы планово–предупредительных ремонтов конструкций и сооружений в целом.

## 1.2. Основные терминологические понятия теории надежности строительных систем

**Надежность** является комплексным свойством, которая зависит от значения строительной системы и условий её эксплуатации. Она включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость строительных систем в целом (зданий и сооружений) и его составных частей (их элементов и конструкций). *Надежность – свойство строительной системы выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.*

*Показатель надежности* – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность строительной системы. В частности, к таким свойствам относятся показатели прочности конструкций при различных видах разрушения, устойчивости, прогибов, углов поворота, амплитуд колебаний, образование и раскрытие трещин в железобетоне, степень коррозии бетона и арматуры. *Единичный показатель надежности* – это показатель надежности, относящийся к одному из свойств, составляющих надежность строительной системы. Например, наработка на отказ характеризует свойство безотказности, которое только в совокупности с другими (долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) составляет надежность строительной системы.

Применительно к строительным системам различного назначения, используемым в транспортном строительстве, особенно важно отметить нижеследующие показатели, характеризующие их надежность.

**Безотказность** – свойство конструкции или сооружения в целом непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого срока

эксплуатации или некоторой наработки. Вероятность безотказной работы означает вероятность того, что в пределах заданного срока службы отказ конструкции не возникает. К показателям безотказности относят: вероятность безотказной работы, среднюю наработку до первого отказа, наработку на отказ, интенсивность отказов, параметр потока отказов, гарантийную наработку.

**Долговечность** – свойство конструкции или сооружения в целом сохранять работоспособное состояние с момента возведения до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания или ремонта, т. е. с возможными перерывами в работе. Показателями долговечности являются гамма–процентный ресурс, средний ресурс, назначенный ресурс, средний срок службы, срок службы до первого капитального ремонта или списания, межремонтный срок службы.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого ухода заданных параметров за установленные нормами пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимого, или необходимости проведения среднего или капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно–технической документацией на данный объект.

Объекты могут быть ремонтируемыми и неремонтируемыми, восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми. Неремонтируемый объект всегда невосстанавливаемый. Невосстанавливаемый объект не всегда неремонтируемый. Восстанавливаемость зависит от условий, процесса и т. д. Ремонтируемость характеризует приспособленность объекта к проведению ремонтов и технического обслуживания. Неремонтируемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или достижении заранее установленного предельно допустимого значения срока службы или суммарной наработки. Значения предельного срока службы или предельной суммарной наработки неремонтируемых объектов могут определяться расчетным, экспериментально–статистическим или совместным использованием этих методов. Для ремонтируемых объектов – переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация его невозможна или нецелесообразна по одной или нескольким следующим причинам: становится невозможным поддержание безопасности ими эффективности эксплуатации объекта на допустимом уровне; ремонт требует больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления работоспособности.

**Характеристические значения** – это значения случайных величин, осязательно реализуемых и задаваемых нормативно; они определяются в доверительных границах 5 – 95%. В оценках прочности и выносливости материалов конструкции пользуются кривой снизу, отсекающей – 5% статистических данных; в оценках нагрузок и воздействий – кривой сверху – 95% статистических наблюдений. Количественная оценка уровня надежности дается с использованием понятия «степени безопасности», которая выражается коэффициентом безопасности  $\beta$ , т.е. количеством стандартных отклонений, откладываемых в большую (для нагрузок и воздействий) или меньшую (для прочности) сторону от математического ожидания силовых или прочностных параметров.

**Коэффициент сочетаний временных нагрузок  $\eta$**  отражает в детерминированной форме осязательную вероятность (более 5%) совпадения во

времени некоррелируемых нагрузок (например, временная вертикальная нагрузка и ветровая нагрузка).

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации конструкции от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Остаточный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации конструкции от момента контроля её технического состояния до перехода в предельное состояние.

**Гарантированный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой строительная система или её элемент не достигают предельного состояния с заданной вероятностью. Они могут находиться в работоспособном, неработоспособном и предельном состояниях.

**Работоспособность (работоспособное состояние)** – состояние конструкции, при котором значения параметров, характеризующих её способность выполнять заданные функции, соответствуют нормативным требованиям.

**Исправность (исправное состояние)** – состояние конструкции, при котором оно соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Работоспособная конструкция может быть неисправна.

**Ремонтопригодность** – свойство элемента или конструкции, заключающееся в доступности и удобстве в проведении мероприятий по предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, а также устранению их путем ремонта и технического обслуживания. Надежность сооружения, его работоспособность обеспечивается своевременным ремонтом. К показателям ремонтпригодности относятся вероятность восстановления в заданное время, среднее время восстановления, удельная трудоемкость обслуживания и ремонтов, средняя и относительная стоимость ремонтов конструкции.

**Сохраняемость** применительно к сооружениям рассматривается как: а) сохраняемость отдельных изделий (конструкций) как свойство непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение (и после) хранения и транспортировки; б) сохраняемость объекта в целом до ввода в эксплуатацию и во время ремонтов (или консервации).

**Неработоспособное состояние** – состояние конструкции, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего её способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации.

**Повреждение** – несущественное событие, заключающееся в нарушении исправного состояния конструкции при сохранении его работоспособности.

**Отказ** – событие, влекущее за собой полную или частичную потерю работоспособности конструкции. Признаки (критерии) отказов устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект. Отказ – одно из самых основных понятий теории надежности.

**Полный отказ** соответствует полной потере работоспособности конструкции.

**Частичный отказ** – отказ, после возникновения, которого конструкция может быть использована по назначению, но с меньшей эффективностью.

**Внезапный отказ** – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров

конструкции. Наступление внезапного отказа, как правило, трудно прогнозировать предварительным контролем или диагностированием.

**Постепенный отказ** – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких заданных параметров конструкции (увеличение раскрытия трещин, рост прогибов, снижение прочности бетона, и др.).

**Приработанный отказ** обусловлен наличием дефектных элементов в сооружении, ошибками сборки и монтажа. Надежность сооружения в период приработки полностью определяется вероятностью отказов дефектных элементов. Надежность сооружения не может быть выше надежности самого дефектного элемента.

**Отказ в период нормальной работы** является следствием внезапных недопустимых концентраций нагрузок на элемент или внезапных изменений качества самого элемента.

**Износостойкий отказ** возникает в результате усталости, механического или химического износа и т.д.

**Независимый отказ** – это отказ элемента сооружения, не обусловленный повреждением или отказами других элементов объекта.

**Сбой** – самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности.

**Перемежающийся отказ** – многократно возникающий сбой одного и того же характера.

**Устойчивый отказ** – это отказ, для ликвидации которого требуется вмешательство извне.

**Конструкционный отказ** – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) норм конструирования.

**Производственный отказ** – отказ, возникающий в результате нарушения установленного процесса изготовления или ремонта сооружения.

**Эксплуатационный отказ** возникает в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации сооружения.

**Систематический отказ** – многократно повторяющийся отказ, обусловленный дефектами конструкции сооружения, нарушением процесса его изготовления, низким качеством используемых материалов и т.д.

**Параметрический отказ** – отказ, при котором какой-либо параметр сооружения выходит за установленный допуск.

### **1.3. Понятия и классификация отказов и дефектов в конструкциях сооружений**

Понятие безотказности сооружения в целом как сложной технической системы шире, чем его элементов и простых систем, способных находиться лишь в двух состояниях – работоспособном либо неработоспособном. Отказы отдельных конструкций и технических устройств (тротуаров, ограждений, деформационных швов в мостах, покрытий, систем водоотвода и др.) обычно являются частичными отказами. Не приводя к прекращению функционирования объекта в целом, они снижают качество (уровень) функционирования и выходной эффект объекта. Такая адаптация сооружения к комплексу внешних условий возникает благодаря наличию определенной избыточности – некоторому запасу технических характеристик сверх минимально необходимых для выполнения заданных функций. Связано это с



тем, что обеспечение локальных требований прочности и жесткости, влаго- и теплозащиты, пожарной безопасности сопровождается возникновением обратных связей, известным «перекрытием» отдельных функций конструкций и систем. В результате объективно возникают различные виды резервирования – нагрузочное, структурное, функциональное и временное.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется *отказом*, т. е. под отказом понимают прекращение выполнения конструкциями заданных функций, которые устанавливаются с соответствующими допусками. При назначении нормативной надежности как несущих, так и ограждающих конструкций, под отказом понимают техническое состояние элемента, предшествующее исчерпанию несущей способности или полной потере несущих или ограждающих функций. Отказы можно классифицировать следующим образом:

1) в зависимости от причин возникновения: *внутренние отказы*, вызванные недостатком конструкций; *отказы из-за внешних причин*, (перегрузки, изменение схем работы и нагрузки и т. п.);

2) в зависимости от скорости их проявления: *последовательные, постепенные и внезапные отказы*. *Постепенные* отказы являются функцией времени, вызываемые главным образом старением материалов, накоплением внутренних напряжений и т. д. *Внезапные* отказы вызываются такими изменениями параметров элемента, при которых его следует считать неработоспособным. Такие отказы появляются при перераспределении и суммировании в узлах нагрузок, действия дополнительных внешних нагрузок, неучтенных сочетаний нагрузок. При расчете систем с учетом этих двух видов отказов ориентируются на следующие положения:

– постепенные отказы можно исключить, если учесть все возможные изменения характеристик и параметров во времени;

– внезапные отказы – случайны, их нельзя полностью исключить или предсказать;

– постепенные и внезапные отказы взаимосвязаны и не являются независимыми;

3) в зависимости от диапазона отказов: *частичные*, (связанные с отклонением характеристик от допускаемых пределов и не вызывающие полной утраты работоспособности) и *полные отказы*;

4) по сочетанию предыдущих концепций: *катастрофические отказы* – внезапные и полные; *отказы с постепенным ухудшением параметров и характеристик*;

5) в зависимости от последствий; *незначительные*, не приводящие к ухудшению эксплуатационных характеристик, *значительные*, критические отказы, приводящие к полному прекращению выполнения функций и появлению большого риска;

6) в зависимости от срока эксплуатации: *преждевременные* (часто до монтажа), *случайные* и *износные* отказы.

В отличие от простых систем, где имеются только два возможных состояния – нормальное эксплуатационное и отказ, в сооружениях большая часть конструкций и элементов может иметь несколько состояний, соответствующих частичным отказам и неисправностям. В связи с этим отказы иногда классифицируют по следующим двум группам: 1-я группа – частичный отказ узла или элемента, усиление которого приводит к полному восстановлению надежности сооружений; 2-я группа – отказы наиболее

ответственных элементов сооружений (основания, фундаментов, колонн, ригелей и т. д.), приводящие к полному отказу всего сооружения. Отказы второй группы могут быть внезапными. Усиление этих элементов порой связано с большими объемами предварительной разборки. Для сооружений ответственного назначения целесообразно выделять в отдельную группу отказы, которые могут приводить к катастрофическим последствиям, например к гибели людей. Поэтому при обеспечении надежности требования по безопасности необходимо выделять в отдельную группу.

В составных конструкциях или сооружениях отказ одного составляющего элемента может привести к отказу всей конструкции, хотя остальные элементы продолжают нормально функционировать. Такое состояние предотвращается обеспечением при проектировании так называемой *робастности* сооружения, при котором обеспечивается его сопротивление прогрессирующему обрушению. Его можно избежать устройством системы внешних и внутренних связей с определением и усилением ключевых (критических) элементов, выход из строя которых повлечет за собой более чем ограниченный ущерб для сооружения. Например в действующих Британских нормах такие элементы проектируются на особо тяжелую нагрузку ( $34 \text{ кН/м}^2$ ), прикладываемую в любом направлении на площадь, которую они поддерживают, а в зданиях выше пяти этажей должна допускаться возможность удаления любого вертикального несущего элемента, не являющегося ключевым, без причинения более чем ограниченного ущерба. Статистика, показывает, что большая часть отказов и аварий происходит все же из-за так называемых мелочей: невыполнения всех проверочных расчетов конструкций (особенно по узлам при проектировании), при работе над проектом разных авторов, неаккуратности рабочих при изготовлении изделий (элементов) и монтаже при сборке, небрежности и недостаточной квалифицированности эксплуатационного персонала. Допустимая вероятность отказа должна определяться в зависимости от тяжести последствий.

Отказы в работе конструкции наступают в результате повреждений, которые, накапливаясь, ухудшают эксплуатационные качества конструкции. Оставленные без внимания незначительные дефекты могут привести к серьезным нарушениям целостности конструкций и даже к авариям. Надежная работа строительных конструкций возможна в случае, когда во время эксплуатации принимаются эффективные меры по устранению дефектов или ограничению их вредного влияния. ГОСТ 15467–79 определяет дефекты как каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Длительное изучение дефектов и отказов конструкций позволило классифицировать их по частным признакам (табл.1.1). При этом особое внимание обращено на то, что наиболее часто встречаются отказы, вызванные их сочетанием.

В процессе изготовления и монтажа в элементах конструкции могут быть допущены дефекты, которые ослабляют конструкцию, а в процессе эксплуатации с течением времени способствует более раннему возникновению отказов. К таким дефектам в железобетонных конструкциях относятся раковины, пустоты, трещины технологического происхождения, смещение арматуры от проектного положения, низкий по сравнению с проектным уровень обжатия бетона, заниженная толщина защитного слоя, отклонения положения и геометрических размеров элементов конструкций и изделий от проектных, низкая прочность бетона и заполнителей, плохое уплотнение бетонной смеси,

нарушение режима теплообработки. В процессе монтажа отклонения от нормативных требований приводят к снижению несущей способности и возникновению дополнительных усилий в железобетонных конструкциях.

Во всех периодах эксплуатации в элементах конструкции происходит накапливание повреждений, которые в зависимости от характера сочетания нагрузки и влияния внешней среды, вызываются следующими причинами:

1) многократно повторное (циклическое) действие нагрузки является причиной нарушения структуры материала и возникновения усталостных повреждений. Например, при сжатии, этот процесс начинается задолго до достижения внутренними микронапряжениями критических величин с образованием необратимых микротрещин, направленных вдоль действующего усилия. Образование микротрещин в бетоне при его первом нагружении создает опасность разрушения материала под воздействием многократно повторной нагрузки.

2) длительно действующие нагрузки вызывают повреждения, приводящие к деструкции конструкционного материала и протеканию процессов ползучести. При напряжениях в бетоне, превышающих предел длительной прочности  $R_l = 0,85R_b$ , с течением времени происходит интенсивное нарастание микротрещин, приводящее к разрушению бетона. При малых напряжениях  $\sigma < R_{crc}^0$  происходит уплотнение структуры бетона и его прочность повышается. Природа ползучести бетона связана с его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при твердении цементного камня. В изгибаемых элементах с течением времени высота сжатой зоны увеличивается, что приводит к возрастанию напряжений в арматуре, дополнительному раскрытию трещин и росту прогибов при неизменной нагрузке.

3) агрессивные, технологические и природные воздействия вызывают коррозионные повреждения бетона и арматуры, что приводит к снижению прочности и разрушению конструкции. Выход из строя конструкции может быть обусловлен потерей защитного действия бетона, разрушением защитного слоя бетона, коррозией арматуры и потерей сцепления стальной арматуры с бетоном. В зависимости от характера коррозионного процесса различают три основных вида коррозии бетона: а) выщелачивание извести из бетона мягкими водами при фильтрации воды через

**Таблица 1. Классификация дефектов и отказов строительных систем**

По степени опасности	Критический дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недоступно
	Значительный дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению (или на ее долговечность, но не является критическим)
	Малозначительный дефект, который существенно не влияет на

	использование продукции по назначению на ее долговечность
По способам обнаружения	Явный дефект, для выявления которого в нормативной документации предусмотрены соответствующие правила, методы, средства
	Скрытый дефект, для выявления которого не предусмотрены соответствующие правила, методы, средства
По возможности устранения	Устранимый дефект, устранения которого технически возможно и экономически целесообразно
	Неустраняемый дефект, устранения которого технически невозможно и экономически нецелесообразно
По технологическому характеру	Ухудшение прочностных характеристик
	Сверхнормативные деформации
	Нарушение эксплуатационных характеристик
В зависимости от причин возникновения	Внутренние отказы, вызванные недостатками конструкций
	Отказы из-за внешних причин перегрузки, изменения
В зависимости от сохранности продукции	Последовательные и постепенные отказы
	Внезапные отказы
В зависимости от последствий	Незначительные отказы, не приводящие к ухудшению эксплуатационных характеристик
	Значительные отказы
	Критические отказы, приводящие к полному прекращению функционирования
По диапазону отказа	Частичные отказы, связанные с отклонением от нормативных параметров
	Полные отказы
В зависимости от срока эксплуатации	Отказы в период строительства
	Эксплуатационные отказы
	Износные отказы

бетон, пористая структура которого обладает способностью пропускать жидкости и газы; в результате выщелачивания происходит растворение гидроксида кальция и вынос его водой из бетона. При этом поверхность бетона покрывается белыми отложениями, образовавшимися в результате карбонизации гидрооксида кальция, вынесенного из толщи бетона; б) растворение цементного камня кислотами в местах их соприкосновения по контактной поверхности; кислотную коррозию вызывает углекислота, присутствующая в большинстве природных вод, соляная, серная, азотная и другие кислоты; чем энергичнее протекает реакция между кислотой и цементным камнем, тем более растворимы новообразования, тем скорее и полнее разрушается бетон. Так, например, при действии углекислоты цементный камень полностью разрушается, а продукты разрушения частично растворяются; в) в порах и капиллярах бетона происходит накопление и кристаллизация солей, образующихся вследствие химических реакций агрессивной среды (сульфатов натрия, магния и калия) с составными частями цементного камня. При таких реакциях объем конечных продуктов реакций в порах и капиллярах превышает объем исходных продуктов, что вызывает растягивающие усилия в стенках пор и капилляров и разрушение структуры бетона.

Газовая коррозия бетона вызывает коррозионные повреждения, приводящие к потере бетоном защитного действия по отношению к арматуре. Защитные свойства бетона, предохраняющие арматуру от коррозии, полностью нейтрализуются в результате процесса карбонизации под влиянием углекислого газа, содержащегося в чистом воздухе и атмосфере промышленных предприятий. Прочность бетона карбонизированного слоя может возрастать до 30%. Воздействие других кислых газов – сернистого ангидрида, сероводорода, хлористого водорода, хлора – также приводят к разрушению защитного слоя.

Коррозионные повреждения арматуры вызываются физико–химическими процессами её разрушения под воздействием окружающей среды. Защитный слой бетона ограждает арматуру от внешней среды, но не изолирует её полностью. Бетон проницаем для влаги и кислорода – основных компонентов, необходимых для химической коррозии стали. Коррозия арматуры возрастает с увеличением содержания хлоридов, бикарбонатной щелочности и температуры окружающей среды. Коррозионные повреждения стали проявляются в виде сплошной (общей) коррозии, которая охватывает всю поверхность металла, или местной коррозии, поражающей отдельные участки поверхности в виде пятен и язв, ориентированных нормально растягивающему усилию. Коррозия арматурных стержней под напряжением, как правило, протекает белее интенсивно. Однако общая равномерная коррозия мягких малоуглеродистых сталей под напряжением не изменяет их механических характеристик. Влияние напряжений ниже предела текучести на коррозию стали незначительно.

Наиболее опасно коррозионное растрескивание, проявляющиеся у многих видов высокопрочных арматурных сталей. Высокопрочные арматурные стали с пониженной пластичностью, применяемые для предварительно напряженных конструкций в транспортном строительстве, для производственных и общественных зданий, склонны к хрупкому разрушению. Коррозия высокопрочных сталей сопровождается значительным снижением пластичности и обычно заканчивается хрупким разрушением. Поэтому наряду с уменьшением площади поперечного сечения проволок и стержней

первостепенное значение приобретают количественные показатели изменения прочности и пластичности высокопрочной арматурной стали. Влияние коррозионных повреждений на механические свойства арматуры аналогично действию концентраторов напряжений, которые локализуют пластическую деформацию в небольшом объеме металла. У пластических мягких сталей около этих очагов происходит перераспределение напряжений, в то время как у высокопрочной арматуры с малой пластичностью такого не происходит.

Так, например, к основным повреждениям, обнаруженным при обследовании эксплуатируемых железобетонных мостов, относятся коррозия бетона и арматуры, зависящие от состояния гидроизоляции и водоотвода с пролетного строения, и трещины в различных зонах изгибаемой предварительно напряженной балки. Коррозия и деструктивные процессы в бетоне вызываются неисправностью гидроизоляции и системы водоотводных устройств. Повреждения гидроизоляции в железобетонных пролетных строениях мостов возникают в связи с недостаточной долговечностью изолирующего материала – рубероида, из-за некачественной укладки изоляционного ковра в зонах его сопряжения с водоотводными трубками, сколами бетона и нарушениями гидроизоляции при монтаже в зоне строповочных отверстий. С потерей балластом дренающих свойств происходит обводнение стенок балок, выщелачивание и разрыхление бетона при замораживании и оттаивании. Коррозия рабочей арматуры пролетного строения происходит вследствие недостаточной толщины защитного слоя, систематического увлажнения из-за неисправности гидроизоляции и водоотвода, чрезмерного раскрытия трещин на поверхностях балок. Трещины в железобетонных пролетных строениях бывают поверхностные и сквозные. Поверхностные трещины образуются в результате воздействия усадочных, температурных деформаций и поперечных растягивающих деформаций от предварительного обжатия бетона. Главная опасность возникновения в эксплуатации трещин заключается в том, что они могут привести к перегрузке рабочей арматуры, не учитываемой в расчетах на действие многократно повторных нагрузок, и способствуют интенсивной коррозии стальной арматуры.

4) Возникшие на стадии изготовления и монтажа повреждения, развиваясь в процессе эксплуатации, изменяют работоспособность конструкции. Постепенная потеря эксплуатационных качеств конструкции вследствие необратимого накапливания повреждений проявляется в снижении прочности бетона от многократного и длительного действия нагрузки, попеременного замораживания и оттаивания, вследствие протекания указанных выше трех видов коррозий. Ухудшение эксплуатационных качеств конструкций проявляется также и в снижении прочности и площади поперечного сечения арматуры в связи с развитием коррозионных повреждений стали. Развитие коррозионных повреждений может привести к потере сцепления, увеличению прогибов и дополнительному раскрытию трещин.

#### **1.4. Факторы, определяющие надежность сооружений**

В процессе проектирования и конструирования сооружения закладывается его теоретическая надежность. В процессе изготовления обеспечивается фактическая надежность каждого конкретного элемента, что зависит от качества применяемых в изготовлении отдельных деталей, качества сборки и монтажа конструкций. После изготовления надежность следует поддерживать

на необходимом уровне правильной организацией эксплуатации. При проектировании учитывают следующие факторы, влияющие на надежность конструкций: качество и количество применяемых элементов; режим работы элементов и деталей; стандартизацию и унификацию изготовления; доступность деталей, узлов и блоков для осмотра, ремонта. В процессе строительства и эксплуатации на надежность сооружения оказывают воздействие следующие условия: внутренние напряжения в конструкциях, не соответствующие их проектным значениям; воздействия внешней среды (в заданных или иных режимах); система технического обслуживания (предупредительного и систематического); техническая квалификация обслуживающего и ремонтного персонала. В результате нарушения правил монтажа сооружения; отсутствия соответствующего контроля качества материалов и комплектующих изделий; нарушения сортности и недоброкачественной замены материалов; установки элементов, подвергающихся длительному хранению в неблагоприятных условиях; недостаточного контроля на операциях и при выпуске готовой продукции, а также нарушения самой технологии монтажа возникают условия, отрицательно влияющие на надежность конструкции сооружения в целом.

Современные сооружения можно отнести к большим системам, представляющим соединение значительного числа разнообразных по сложности компонентов, подверженных переменным изменяющимся нагрузкам. В противоположность отдельным малым детерминированным системам и устройствам, большие системы ведут себя «случайно». В сложной системе, как правило, значимость отдельных частей для целого неодинакова. Почти всегда ее можно привести к модели, состоящей из ряда более простых составных частей, которые делятся на уровни высшие и низшие. Сложные системы – иерархические, методология их исследования в отличие от физических представлений основана на умозрительности и неведении целого к части. Здесь важно отметить один из принципов исследования таких систем – принцип рекуррентного объяснения: свойства систем данного уровня выводятся исходя из постулируемых свойств элементов систем непосредственно нижестоящего уровня. При каждом переходе на следующий иерархический уровень система данного уровня становится элементом системы высшего уровня.

Надежность системы зависит от надежности составляющих ее элементов. Однако важна надежность не отдельных элементов, а их совокупности, включая стыки и сопряжения, и надежность не только прочностная, но и эксплуатационная (включая и надежность функционирования инженерных систем). Вместе с тем, в практике проектирования, строительства и эксплуатации конструкций и сооружений часто надежность по прочности рассматривается как главное, а надежность в смысле обеспечения эксплуатационных характеристик – как второстепенное. Практически при проектировании эксплуатационные характеристики сооружения не являются исходными (расчетными). Элементы и их стыки рассчитывают по деформациям и прочности, однако допускаемые деформации не всегда обеспечивают нормативное эксплуатационное состояние сооружения. Надежность сооружения и отдельных конструкций обуславливается изменчивостью во времени внутренних свойств (материалов) и внешних условий (нагрузок и воздействий). Характеристики и показатели этих факторов к моменту окончания монтажа сооружения определяют начальную его надежность,

которая с первого дня эксплуатации постепенно снижается. Вся совокупность причин (факторов), вызывающих изменение работоспособности сооружения в целом и отдельных его элементов, с точки зрения механизма их воздействия, может быть условно разделена на две группы причин – внутреннего и внешнего характера. К причинам *внутреннего характера* относят физико–химические процессы, протекающие в материалах, из которых изготовлены конструктивные элементы нагрузки и процессы, возникающие при эксплуатации, конструктивные факторы, качество изготовления (дефекты производства). К причинам *внешнего характера* относят климатические факторы (температуру, влажность, солнечную радиацию), факторы окружающей среды (ветер, пыль и песок, наличие в атмосфере агрессивных соединений, биологические факторы), а также качество эксплуатации. К ним также, очевидно, следует отнести и воздействия, предусмотренные системой технического обслуживания и ремонта.

Более дифференцированно факторы, определяющие надежность зданий и сооружений могут быть объединены в четыре основных группы, представленных на рис.1.1.

В *первую* группу входят общенормативные положения, регламентирующие номенклатуру расчетных предельных состояний конструкций и сооружений, включающих требования по обеспечению уровня надежности, рекомендуемые для различных схем и моделей, расчетные нагрузки и воздействия и их сочетания, а также расчетные характеристики материалов.

Во *вторую* группу входят расчетные схемы и модели, принятые по результатам экспериментально–теоретических исследований и опыту предшествующего проектирования. Они и определяют выбор и обоснование методов расчета, объёмно–планировочных и конструктивных решений, обеспечение нормативных требований по прочности, устойчивости и выносливости. Основными факторами при этом являются: способы определения усилий и деформаций в системе; методы расчета сопротивления конструкций и узлы сопряжений; адекватность принятой расчетной схемы реальным условиям; учет пространственной работы систем и характера соединений и заземлений при сдвиге и отрыве; пластические свойства и нелинейность деформирования системы; конструкций и связей; методика учета длительных процессов, определяющих деформирование, прочность и долговечность конструкций.

В *третью* группу входят условия изготовления конструкций и их монтажа при возведении здания или сооружения, определяющие такие факторы как изменчивость свойств материалов и несущей способности конструкций, отклонения размеров и проектного положения конструкций, дефекты их изготовления и монтажа, контроль качества строительных работ и т. п.

*Четвертая* группа объединяет номенклатуру требований по технической эксплуатации зданий и сооружений, включающих систему планово–предупредительных ремонтов и контроля их технического состояния, уровень квалификации обслуживающего персонала.

Рассмотрим некоторые факторы, являющиеся причиной изменения технического состояния сооружений в процессе их эксплуатации. Наиболее существенными являются факторы *конструктивного характера*. Рациональные конструктивные решения обеспечивают требуемую работоспособность всех элементов сооружений в течение установленной продолжительности их

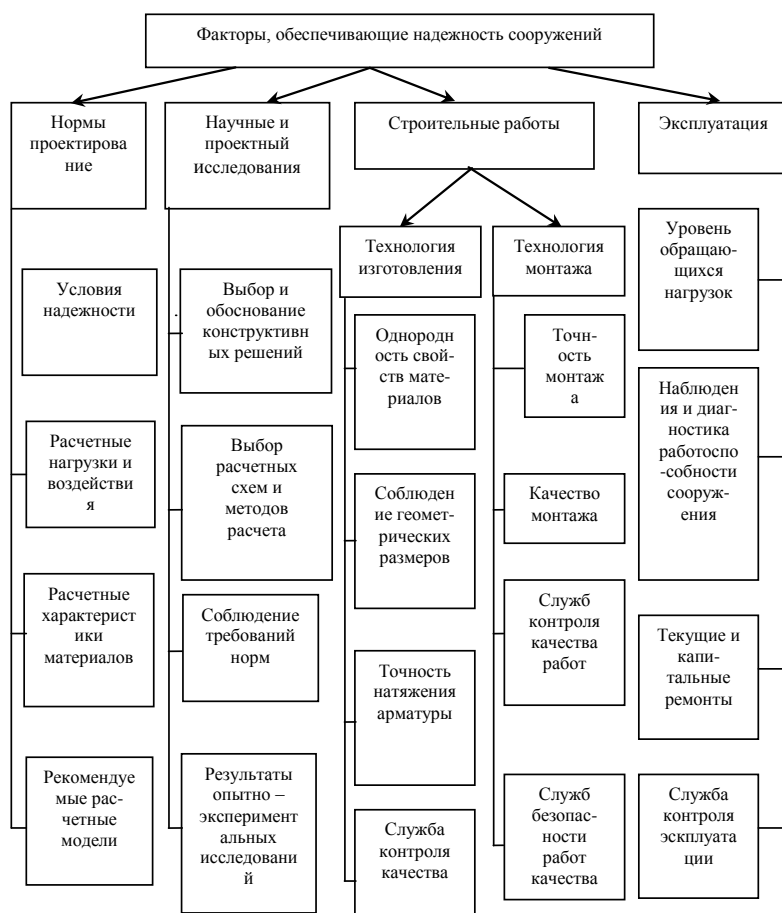


эксплуатации при минимальных затратах труда и средств на поддержание их нормального состояния. В то же время нерациональные и конструктивные решения могут являться причиной быстрой утраты работоспособности или разрушения отдельных конструктивных элементов.

Действие *факторов окружающей среды и климатических факторов* на работоспособность элементов и конструкций сооружений проявляется или непосредственно, или путем воздействия на интенсивность протекания процессов, являющихся причиной изменения работоспособности конструктивных элементов. Соответствующими конструктивными решениями отрицательное воздействие этих факторов может быть значительно снижено или вовсе исключено. *Производственные факторы* вносят значительные коррективы в значения характеристик работоспособности конструкций, а *условия эксплуатации* (режимы использования и нагружения, квалификация эксплуатационного персонала, качество обслуживания) оказывают большое влияние на интенсивность изменения характеристик их работоспособности.

При проектировании сооружений и планировании для них профилактических мероприятий необходимо знать характеристики работоспособности конструктивных элементов, определяющих работоспособность в целом в определенных режимах и условиях их использования. Недостаточное знание физической природы протекающих процессов, являющихся причиной утраты работоспособности конструктивными элементами работоспособности, случайный и неопределенный характер воздействующих эксплуатационных, климатических и других факторов, как правило, не позволяют получить зависимости для большинства конструктивных элементов аналитическими методами.

В этих условиях основными методами получения информации и значений характеристик работоспособности конструктивных элементов является *статистический эксперимент*. При этом необходимо отдавать предпочтение активному многофакторному статистическому эксперименту, когда требуемая информация может быть получена при значительно меньшем объеме наблюдений, чем в случае однофакторного эксперимента. Данные пассивных экспериментов (результаты эксплуатационных наблюдений и некоторых видов испытаний) должны использоваться как априорная информация при планировании активных экспериментов.



**Рис.1. Факторы, определяющие надежность зданий и сооружений на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации.**

Сложность исследования надежности всех конструкций сооружений состоит в многочисленности факторов, определяющих надежность. Главные из них – вид материалов, характер конструкций и их схем, качество изготовления изделий и монтажа, допусков и т. д. Причем очень часто все эти требования взаимопротивоположны, например стыки тяжелых и легких элементов. Здесь тяжелые железобетонные элементы мало поддаются объемным деформациям под влиянием изменения температурно-влажностного режима, но допуски при их изготовлении, особенно монтажные, довольно значительны. В легких элементах из металла, дерева, пластмасс возникают большие деформации в процессе эксплуатации, но допуски при их изготовлении значительно меньше. Еще большие трудности при исследовании надежности эксплуатируемых сооружений связаны с использованием различных по физическим и структурным свойствам материалов. Таким образом, под надежностью сооружения в целом как сложной системы, прежде всего, понимают стабильность показателей качества и эффективности его функционирования, которая зависит от надежности конструкций и систем. Задача оценки надежности сооружения сводится к установлению влияния частичных и полных отказов на качество и выходной эффект функционирования объекта. Надежность должна характеризоваться тем основным показателем, который является определяющим и в то же время составной частью оценки использования объекта. Функционирование моста оправдано в той мере, в какой он удовлетворяет не только техническим, но и изменяющимся

социально–экономическим и организационным требованиям, поэтому в плане системного подхода, определяющим показателем его надежности в целом как конечной продукции, является его *оптимальный срок службы*. Надежность можно понимать как сохранение качества в течение времени. Понятно, что без базового хорошего качества не может быть и речи о надежности.

### 1.5. Количественные показатели надежности

Исследования и расчеты в области надежности становятся на практическую основу только тогда, когда исследователь или проектировщик имеет в своем распоряжении количественные методы сравнительной оценки и измерения надежности. Числовые значения количественных показателей надежности конструкций зависят от того, как часто в них возникают отказы и насколько быстро они устраняются. Понятие отказа является одним из основных понятий теории надежности. *Отказом называется событие, которое состоит в нарушении работоспособности системы*. Иначе говоря, отказ – это частичная или полная утрата качества системы. К отказам относятся недопустимые отклонения параметров системы от расчетных значений, временные нарушения условий нормальной эксплуатации системы, полный выход системы из строя. Понятие отказа весьма близко по смыслу к понятию предельного состояния в строительной механике и в расчетах сооружений. Однако в теории надежности под предельным состоянием понимается такое состояние системы, которое соответствует технической невозможности или нецелесообразности ее дальнейшей эксплуатации. Таким образом, в теории надежности понятию предельного состояния придается более узкий смысл, чем в теории сооружений.

Значительная часть отказов конструкций и сооружений имеет механическое происхождение. Примерами отказов, приводящих к выводу конструкции из строя или по крайней мере требующих прекращения ее эксплуатации, могут служить обрушение, опрокидывание, потеря устойчивости или равновесия сжатых элементов, хрупкое разрушение и т. п. Многие отказы носят постепенный характер: параметры системы по мере эксплуатации постепенно ухудшаются и в некоторый момент времени достигают значений, при которых дальнейшая эксплуатация становится невозможной или нецелесообразной. К явлениям этого типа принадлежат процессы накопления остаточных деформаций, механический и коррозионный износ, растрескивание и т. п. Отказы изделий, как правило, принадлежат к категории случайных событий. Поэтому и показатели надежности принадлежат к категории показателей, которые используются для характеристики случайных величин и случайных событий. Почти все отказы вызваны влиянием случайных факторов, которые либо заложены в систему при ее изготовлении и возведении, либо действуют на нее в процессе эксплуатации. Поэтому отказы, как правило, носят случайный характер. Трактовка отказов как случайного события является исходным пунктом при построении теории надежности.

За основной показатель надежности системы может быть принята вероятность безотказной работы в течение всего срока службы  $T^*$ , т. е. вероятность случайного события, состоящего в том, что в течение срока  $T^*$  не произойдет ни одного серьезного отказа. Эту вероятность в дальнейшем обозначим через  $P$  и назовем просто *показателем надежности*, тогда очевидно, что  $P \equiv P(T^*)$ . Наряду с показателем надежности  $P$ , определяемым для всего установленного срока службы  $T^*$ , целесообразно рассматривать вероятность

безотказной работы на отрезке времени  $(0, t)$ , где  $t$  – переменная величина. Эту функцию времени  $t$  будем называть в дальнейшем функцией надежности и обозначать через  $P(t)$ . Она содержит в себе значительную информацию о надежности системы и через неё могут быть выражены некоторые другие показатели надежности. К ним относится, например, плотность распределения времени до первого отказа, равная производной от функции надежности  $P(t)$ , взятой с обратным знаком:

$$P(t) = -dP(t)/dt. \quad (1.1)$$

Срок службы системы  $T$  является тоже случайной величиной. Если эксплуатация системы прекращается после первого отказа, то функция распределения сроков службы  $F(T)$  выражается через функцию надежности  $P(t)$  следующим образом:

$$F(T) = 1 - P(t)_{t=T}. \quad (1.2)$$

Соответствующая плотность вероятности  $p(T)$  определяется по формуле (1.1) с заменой  $t$  на  $T$ . Средний срок службы вычисляется как:  $\langle T \rangle = \int_0^{\infty} tp(t)dt$ . Отсюда после интегрирования по частям и использования формулы (1.1) получим:

$$\langle T \rangle = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (1.3)$$

Выше за независимую переменную принималось время  $t$ . В теории надежности в качестве независимой переменной часто используется более общий параметр – *наработка*, которая определяется как продолжительность или объем работы, выполненный системой. Нарботка может измеряться в единицах времени, в единицах произведенной продукции, в числе производственных циклов и т. п. Вместо срока службы при этом иногда употребляется более общий термин «ресурс», равный наработке от некоторого начального момента времени до наступления предельного состояния. В дальнейшем, однако, мы будем всюду брать время в качестве независимого переменного, имея в виду, что результаты легко распространяются на более общий случай.

Теория надежности содержит также ряд понятий, которые позволяют включать в рассмотрение ремонт, восстановление, профилактику. Эти понятия образуются по такому же принципу, как и введенные выше понятия теории надежности. Так, понятие вероятности безотказной работы – функции надежности  $P(t)$  – распространяется на восстанавливаемые системы: после каждого восстановления функция надежности принимает значение, равное единице, после чего значения функции  $P(t)$  вновь монотонно уменьшаются. В общем виде конструкцию рассматривают как систему, если она восстанавливается, или как элемент, если она не восстанавливается. Удачная конструкция восстанавливаемого изделия отличается малым объемом обслуживания, а его надежность оценивается средней наработкой между отказами. Удачная конструкция невосстанавливаемого изделия характеризуется долговечностью работы до отказа. Неремонтируемые изделия подлежат замене после первого отказа. Все несущие и ограждающие конструкции сооружений в основном относятся к ремонтируемым изделиям. Применительно к строительным конструкциям случайные величины, встречающиеся в задачах надежности, как правило, имеют нормальное распределение.

Показатели надежности, полученные из предварительно составленной математической модели могут определяться математическим выражением, дающим *математическое определение показателя надежности*. Для опытного определения показателей надежности неремонтируемых конструкций и изделий проводят наблюдения за испытаниями или эксплуатацией  $n$  изделий в заданных условиях.

Показатели надежности могут определяться также в результате статистической обработки большого числа данных опытов или наблюдений. В этом случае пользуются *статистическим определением показателя надежности* (со звездочкой сверху). Например, статистическая вероятность безотказной работы за время  $t$  обозначается  $P^*(t)$ . ГОСТ 27.002–83 содержит подробный перечень показателей надежности, часть которых, применительно к конструкциям и сооружениям, рассмотрена ниже.

**Вероятность безотказной работы  $P(t)$**  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет (*наработка* – продолжительность или объем работы).

*Математическое определение:*  $P(t_3) = P(t > t_3)$ , где  $t$  – случайное время работы объекта до отказа;  $t_3$  – заданная наработка.

*Статистическое определение:*  $P^*(t) = N^*(t)/N^*(t=0)$ , где  $N^*(t)$  – число работоспособных объектов в момент времени  $t$ ;  $N^*(t=0)$  – число работоспособных объектов в начальный момент времени при  $t=0$ .

**Вероятность отказа  $Q(t)$**  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта возникнет. *Математическое определение:*  $Q(t_3) = 1 - P(t_3)$ . *Статистическое определение:*  $Q^*(t) = n^*(t)/N^*(t=0)$ , где  $n^*(t)$  – число отказавших объектов на интервале  $0 - t$ .

**Нормативное значение надежности.** Нормативным значением надежности считается величина вероятности отказа, которая является безопасной. Опыт эксплуатации сооружений позволил установить нормативные коэффициенты надежности, приведенные в табл. 2.

**Интенсивность отказов невосстанавливаемого объекта  $\lambda(t)$ .** Это условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени  $t$  при условии, что до этого момента отказ не возник.

*Математическое определение:*  $\lambda(t) = f(t)/P(t)$ , где  $f(t)$  – плотность вероятности отказа в момент времени  $t$ :

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{d}{dt} [1 - P(t)] = -\frac{d}{dt} P(t). \quad (1.4)$$

**Таблица 2**

Наименование конструкций	$0$	$(t)$
Самонесущие ограждающие элементы	.95	.85
Элементы статически неопределимых систем, отказ которых по прочности не влечет внезапного разрушения системы	.99	.95
Несущие элементы с постепенными отказами (перекрытия, опоры, колонны, балки и фермы)	.999	.99

Функция надежности выражается через интенсивность отказов (т. е. связь между  $\lambda(t)$  и  $P(t)$ ) следующим образом:

$$\lambda(t)dt = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{P(t)}; \quad -\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t) \Big|_0^t; \quad P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right). \quad (1.5)$$

В частном случае при  $\lambda = \text{const}$ , из последней формулы вытекает экспоненциальный закон распределения отказов,

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (1.6)$$

Для экспоненциального закона надежности (распределения отказов) формула (1.3) дает  $\langle T \rangle = 1/\lambda$ , а формула (1.6) принимает следующий вид:

$$P(t) = \exp(-t / \langle T \rangle). \quad (1.7)$$

*Статистическое определение:*  $\lambda^*(t) = [n^*(t + \Delta t) - n^*(t)] / [N(t)\Delta t]$ , где  $n^*(t)$  – число отказов к моменту времени  $t$ ;  $n^*(t + \Delta t)$  – число отказов на интервале от  $t$  до  $t + \Delta t$ , т. е. на интервале  $\Delta t$ , примыкающем к  $t$ ;  $N(t)$  – число работоспособных объектов в момент времени  $t$ ;  $N(t)\Delta t$  –наработка объектов на интервале  $\Delta t$ .

Таким образом,  $\lambda^*(t)$  – это число отказов в единицу времени на интервале  $\Delta t$ , примыкающем к  $t$ . Интервал  $\Delta t$  должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить плавный характер кривой  $\lambda(t)$ , и в то же время достаточно большим, чтобы на нем могли быть зафиксированы отказы объекта.

**Средняя наработка до отказа  $T_1$ .** *Математическое определение* в общем виде:

$$T_1 = \int_0^{\infty} f(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt \text{ или приближенно: } T_1 = 1/n \sum_1^n t_i,$$

где  $t$  – время от начала работы невозстанавливаемого изделия до его отказа. *Статистическое определение:*

$$T_1^* = (t_1^* + t_2^* + \dots + t_n) / n = (1 / n) \sum_1^n t_i.$$

**Средняя наработка на отказ восстанавливаемого изделия (конструкции)  $T_0$ .** *Математическое определение:*  $T_0 = \int_0^{\infty} t f(t)dt$ , где  $t$  – время

работы восстанавливаемого изделия от момента окончания  $(k - 1)$ -го восстановления до момента наступления  $k$ -го отказа. *Статистическое*

*определение:*  $T_0^* = (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n) / n = (1 / n) \sum_1^n t_i$ , где  $t_i$  – наработка

восстанавливаемого изделия между отказами, т. е. от начала его работы (либо после постановки на работу, либо после восстановления) до момента очередного отказа.

**Гамма-процентная наработка до отказа  $T_\gamma$ .** Это наработка, в течение которой отказ не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

– наработка от начала эксплуатации до перехода изделия в предельное состояние, т. е. состояние, при котором либо невозможно, либо нецелесообразно продолжать использовать изделие по его назначению и необходимо снять его с эксплуатации и сдать в ремонт или списать. Ресурс

представляет собой непрерывную случайную величину, характеризующуюся законом распределения или интегральной функцией распределения  $F(t)$  и её первой производной – плотностью вероятности. *Средний ресурс* – математическое ожидание ресурса. *Назначенный ресурс* – установленная в нормативно–технической документации суммарная наработка, при достижении которой дальнейшее применение изделия по назначению следует прекратить независимо от его технического состояния.

**Срок службы** – календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия до перехода его в предельное состояние. *Средний срок службы* – математическое ожидание срока службы. *Назначенный срок службы* – установленная в нормативно–технической документации календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой дальнейшее применение изделия по назначению следует прекратить независимо от его технического состояния.

**Вероятность восстановления за заданное время  $t_3$ .** Это вероятность того, что время восстановления работоспособности  $t_B$  не превысит заданного времени, т. е.  $P(t_B/t_3)$ .

**Среднее время восстановления  $T_B$ .** Оно представляет собой математическое ожидание *времени восстановления* – времени, затраченного на поиск места неисправности и устранение неисправности. Время, затраченное на организационные простои, не предусмотренные инструкцией по эксплуатации, не должно входить в  $T_B$ .

**Назначенный срок хранения.** Это календарная продолжительность хранения, по истечении которой применение изделия не допускается независимо от его технического состояния.

**Коэффициент готовности  $K_r$**  – вероятность того, что восстанавливаемое изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени его использования по назначению:

$$K_r = t_{p\Sigma} / (t_{p\Sigma} + t_{B\Sigma}) \quad (1.8)$$

где  $t_{p\Sigma}$  – суммарное время нахождения изделия в работоспособном состоянии;  $t_{B\Sigma}$  – суммарное время восстановления изделия; учитывая, что  $t_{p\Sigma} = T_0 n$ ;  $t_{B\Sigma} = T_B n$ , где  $n$  – число отказов на интервале времени, для которого определяются значения  $t_{p\Sigma}$  и  $t_{B\Sigma}$ , эту формулу можно записать в следующем виде:

$$K_r = T_0 / (T_0 + T_B). \quad (1.9)$$

Данная формула находит широкое применение в инженерной практике. Степень ее приближения к истинному значению  $K_r$  тем больше, чем больше интервал времени, на котором определяется  $t_{p\Sigma}$ . Поток отказов и восстановлений при этом становится установившимся и  $K_r$  приобретает стационарный характер. Коэффициент готовности – комплексный показатель надежности. Как правило, он учитывает свойство аппаратурной безотказности и восстанавливаемости. Если под отказом понимать не только отказ аппаратуры, но любой отказ изделия в выполнении заданных функций (в том числе вызванный дефектом программы, снижением достоверности и т. п.), тогда  $K_r$  может выполнять роль комплексного показателя надежности, учитывающего и другие свойства изделия. Поэтому при использовании  $K_r$  всегда надо указывать, какие свойства изделия он учитывает.

**Коэффициент оперативной готовности,  $K_{ог}$**  – это вероятность того, что объект в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов в

работе, окажется работоспособным, когда требуется его применение по назначению, и с данного момента будет работать безотказно в течение заданного времени:  $K_{ог} = K_r P(t_3)$ , где  $K_r$  – коэффициент готовности;  $P(t_3)$  – вероятность безотказной работы на интервале заданного времени  $t_3$ .

Рассмотрение количественных показателей надежности позволяет сделать следующие выводы:

1. Показатели надежности сооружений сложной системы имеют характер системы показателей. Чем большее число показателей надежности системы определяется при анализе ее надежности, тем более подробным становится этот анализ. Но это не означает, что всякий раз либо при анализе надежности, либо при задании требований к надежности надо использовать весь перечень возможных показателей надежности. Перечень используемых показателей надежности должен быть не просто возможно более полным, но и целесообразным, т. е. отвечающим задаче объективной характеристики требуемых свойств системы.

2. В системе показателей надежности целесообразно выделять главные показатели и вспомогательные. В отдельных случаях, например, определение ремонтпригодности, срока службы, долговечности и сохраняемости может оказаться неактуальным и даже ненужным. В других случаях показатели долговечности или срока службы могут стать главными показателями надежности системы. Для объектов, сложных по своей структуре, многофункциональных по своим задачам, используемых в большом числе рабочих режимов, к главным показателям надежности относятся комплексные показатели надежности.

3. Количественные значения показателей надежности следует задавать с учетом двух противоречивых требований: с одной стороны, показатель надежности должен быть не ниже некоторого уровня, который обеспечивает требуемую эффективность, с другой стороны, он не должен превышать уровня, который может быть обеспечен возможностями производства.

Искусство проектирования состоит в том, чтобы выбором расчетной схемы сооружения, учетом действительного характера и условий его работы и соблюдением мероприятий по обеспечению надежности выполнить эти два противоречивых требования.

**Пример 2.13.** Определить вероятность того, что случайная величина  $t$  будет меньше среднего значения на  $-600$ , если известно, что закон распределения нормальный, а  $\sigma(t) = 300$ ;  $a = -600/200 = -2$ ;  $f(t)_{u=-2} = 0.023$ .

**Пример 2.14.** Определить  $Q(t)$  для  $t = 100$  ч, если  $\sigma(t) = 150$  ч,  $T = 500$  ч. Нормированное отклонение  $t$  относительно  $T$  равно  $u = -2,6$ ;  $Q(t)$  (см. табл.2.2) равно 0,005.

Интенсивность отказов монотонно возрастает и после  $t = T$  начинает приближаться к асимптоте  $y = (t - T)/\sigma$ . Монотонное возрастание  $\lambda(t)$  – характерный признак нормального распределения. Нормальному распределению подчиняется время появления износных отказов.

**Правило трех стандартов.** При оценке надежности строительных систем часто необходимо определить вероятности того, что значение случайной величины попадет в интервал  $(a; b)$ . Эта вероятность находится по формуле:

$$P(a < x < b) = F(a) - F(b) = \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma}\right), \quad (2.60)$$

где:  $\Phi(-\infty) = 0$ ;  $\Phi(\infty) = 1$ ;  $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$ .



Отложим от центра рассеивания  $m$  в обе стороны отрезки длиной  $\sigma$  (рис.2.11.) и вычислим вероятности:

$$P(m - \sigma < X < m + \sigma) = \Phi(1) - \Phi(-1) = 2\Phi(1) - 1 = 2 - 0,841 - 1 = 0,6827;$$

$$P(m - 2\sigma < X < m + 2\sigma) = \Phi(2) - \Phi(-2) = 2\Phi(2) - 1 = 2 - 0,977 - 1 = 0,9545;$$

$$P(m - 3\sigma < X < m + 3\sigma) = \Phi(3) - \Phi(-3) = 2\Phi(3) - 1 = 2 - 0,999 - 1 = 0,9973.$$

Это означает, что для нормально распределенной случайной величины, зная ее математическое ожидание и дисперсию, можно ориентировочно указать интервал ее практически возможных значений, а именно:  $m \pm 3\sigma$ . Такой способ оценки диапазона возможных значений случайной величины называется «правилом трех стандартов». Это правило используется в теории надежности для определения расчетных значений параметров конструкции.

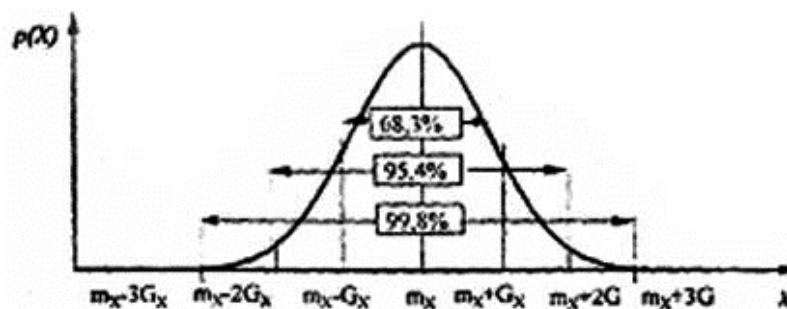


Рис.2.11. Правило трех стандартов

**Пример 15. Статистический характер прочности.** Прочность материалов конструкций, определяемая экспериментально по стандартной методике, имеет значительный разброс и, следовательно, является случайной величиной. Кривая распределения прочности асимметрична и ограничена снизу нулевым значением. Приблизительно принимается, что прочность материалов распределена по нормальному закону. В современных нормах проектирования железобетонных конструкций учитывается случайная природа прочности бетона и стальной арматуры. Поэтому в расчет введено понятие «нормативная прочность», обладающая 95% обеспеченностью. Нормативная прочность бетона определяется по формуле:

$$R_{bn} = m_b - 1,64\sigma_b, \quad (2.61)$$

где  $m_b, \sigma_b$  – среднее и стандарт прочности бетона,

$$P(R_b < m_b - 1,64\sigma_b) = 1 - \Phi(1,64) = 1 - 0,95 = 0,05. \quad (2.62)$$

Коэффициент вариации прочности бетона  $v = \sigma_b / R_b$  не является постоянной величиной. Нормированное его значение зависит от уровня технологии производства бетона и является среднестатистическим для множества заводов по производству железобетонных изделий. Он принят равным 0,135. Нормативное сопротивление арматуры также соответствует 95%–ной обеспеченности

$$R_{sn} = m_s - 1,64\sigma_s, \quad (2.63)$$

где  $m_s, \sigma_s$  – среднее и стандарт прочности арматуры.

Характеристики прочности и нормированные значения коэф-фициентов вариации прочности арматуры даны в приведенной выше таблице.

**Биномиальный закон распределения случайной величины.** Биномиальный закон распределения числа  $n$  появления события  $A$  в  $m$  независимых опытах (наблюдениях, испытаниях). Если вероятность появления события  $A$  в одном испытании равна  $p$ , вероятность не появления равна  $q = 1 - p$ , число независимых испытаний  $m$ , то вероятность появления  $n$  событий равна

$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}$ , где  $C_m^n$  – число сочетаний из  $m$  по  $n$ . Свойства биномиального распределения следующие: 1) математическое ожидание числа событий равно  $mp$ ; 2) среднеквадратическое отклонение числа событий,  $\sigma = \sqrt{mp(1-p)}$ . При увеличении числа испытаний биномиальное распределение приближается к нормальному со средним значением  $n/m$  и дисперсией  $p(1-p)/m$ .

**Закон Пуассона.** Вероятность числа  $n$  случайных событий за время  $t$  определяется как:  $P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  (среднее число событий в единицу времени) – интенсивность появления случайного события;  $\lambda t$  – среднее число событий за время  $t$ .

**Свойства распределения Пуассона** следующие: 1) математическое ожидание числа событий за время  $t$  равно  $\lambda t$ ; 2) среднеквадратическое отклонение числа событий  $\sigma = \sqrt{\lambda t}$ .

**Характерный признак распределения Пуассона** – равенство математического ожидания и дисперсии (используется для проверки степени соответствия исследуемого опытного распределения с распределением Пуассона).

**Пример 2.16.** Определить вероятность того, что за время  $t = 100$  ч произойдет 0 – 3 отказа, если  $\lambda = 0,025$ . Среднее число отказов за время  $t$ ,  $\lambda t = 2,5$ . Из таблицы 1 (приложение) вероятность отсутствия отказов  $P_0(100) = e^{-2,5} = 0,082$ . Вероятность одного отказа  $P_1(100) = \lambda t e^{-\lambda t} = 0,205$ . Вероятность двух отказов  $P_2(100) = [(\lambda t)^2 / 2!] e^{-2,5} = 0,256$ . Вероятность трех отказов  $[(\lambda t)^3 / 3!] e^{-2,5} = 0,131$ . Распределение Пуассона получается из биномиального распределения, если число испытаний  $m$  неограниченно возрастает. Покажем это:

$P_m^n = \frac{m(m-1)(m-2)\dots(m-n+1)}{n!} p^n (1-p)^{m-n}$ . Примем, что  $a = mp$  – среднее число событий при  $m$  испытаниях, равное  $n$ ;  $p = n/m$  – вероятность событий в  $m$  испытаниях. Тогда  $(1-n/m)^m = e^{-n} = e^{-mn/m} = e^{-a}$ ;  $(1-n/m)^n = 1$ ;  $m(m-1)(m-2)\dots(m-n+1) = mm(1-1/m)m(1-2/m)\dots = m^n$ . При таких допущениях формула может быть преобразована как:

$$P_m^n = \frac{mm(1-1/m)m(1-2/m)\dots m(1-(n-1)/m)}{n!} p^n (1-p)^{m-n} = \frac{(mp)^n}{n!} \left(1 - \frac{n}{m}\right)^{m-n} = \frac{a^n}{n!} \times \frac{(1-n/m)^m}{(1-n/m)^n} = \frac{a^n}{n!} e^{-a}. \quad (2.64)$$

Вероятность получить  $n$  событий за время  $t$  равна:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}.$$

**Экспоненциальный закон распределения случайной величины** (рис.2.12). Функция распределения,  $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ . Плотность вероятности,  $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ . Интенсивность (среднее число событий в единицу времени),  $\lambda = f(x)/1 - F(x) = \text{const}$  (числовые значения  $e^{-x}$  даны в табл. 1 приложений). Когда  $x$  – время до возникновения отказа, вероятность того, что за время  $t$  возникает отказ,  $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , а  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  – плотность вероятности отказа в момент времени  $t$ . Вероятность того, что за время / отказ не возникает равна:

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.65)$$

Дисперсия и среднеквадратическое отклонение времени работы до возникновения отказа соответственно:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_1)^2 f(t) dt = 1/\lambda^2 \text{ и } \sigma(t) = \sqrt{D(t)} = 1/\lambda = T_i.$$

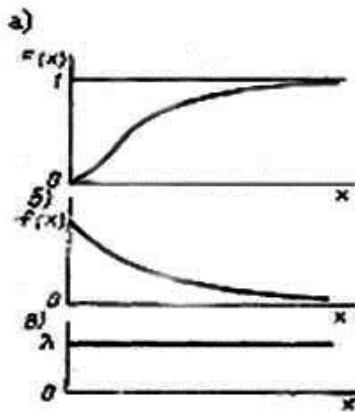


Рис. 12.

**Экспоненциальный закон распределения:** *a* – интегральный; *б* – дифференциальный; *в* – параметр закона  $\lambda$ ;

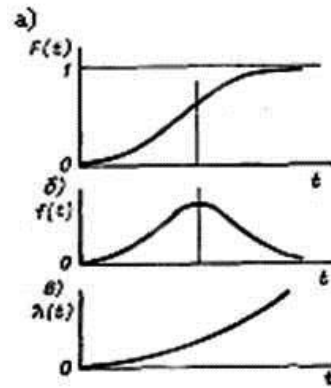


Рис. 13.

**Нормальный закон распределения случайной величины:** *a* – интегральный; *б* – дифференциальный; *в* – интенсивность

Равенство  $\sigma(t) = T_i$  – характерный признак экспоненциального распределения. Статистические материалы об отказах типовых элементов конструкций свидетельствуют о том, что в основном время работы этих элементов для нормального периода эксплуатации, т. е. до возникновения износных отказов, подчиняется экспоненциальному закону. Признаком экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки конструкции закончился, а период износа и старения еще не начался. Также постоянной становится интенсивность отказов объекта, если вызываются они отказами большого числа составляющих элементов, отказ каждого из которых приводит к отказу объекта. Этими обстоятельствами, а также тем, что предположение об экспоненциальном распределении времени до отказа изделия существенно упрощает расчеты надежности, не вызывая существенных погрешностей, объясняется широкое распространение экспоненциального закона в инженерной практике.

Биномиальный закон распределения, закон Пуассона, экспоненциальный и нормальный законы принадлежат к наиболее распространенным в прикладной теории надежности. Экспоненциальный закон и нормальный образуют своеобразные крайние положения: первый (экспоненциальный) имеет резко выраженный асимметричный характер  $f(t)$  и постоянное значение  $\lambda$ ; второй (нормальный) – строго симметричный характер  $f(t)$  и монотонное возрастание  $\lambda(t)$ . Инженерная практика встречается со значительно большим числом случаев, чем перечисленные два крайних случая. Укажем лишь некоторые из таких промежуточных распределений.

**Закон  $\gamma$  – распределения случайной величины.** Это распределение возникает тогда, когда имеет место своеобразное группирование числа случайных событий. Например, в случае, если отказ изделия наступает когда в нем произойдет  $k$  отказов элементов, а отказы элементов распределяются по экспоненциальному закону с интенсивностью  $\lambda_0$ . Такая ситуация, например, возникает при резервировании изделий. Здесь время до отказа изделия

подчиняется закону  $\gamma$  – распределения. Плотность вероятности времени до отказа равна:

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t}, \quad (2.66)$$

где  $\lambda_0$  и  $k$  – соответственно интенсивность и число отказов элементов.

Это уравнение может быть получено из предположения о том, что имеет место пуассоновский закон распределения отказов. Тогда вероятность того, что число отказов  $n$  больше или равно  $k$  за время  $t$ , равна:

$$P_{n \geq k}(t) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t}; \quad f(t) = \frac{d}{dt} [P_{n \geq k}(t)] = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t}. \quad (2.67)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\lambda_0}{(k-1)!} \times \frac{\lambda_0(t)^{k-1}}{\sum 1/i}. \quad (2.68)$$

Средняя наработка до отказа:  $T_1 = kT_0$ . Вероятность безотказной работы изделия за время  $t$  равна:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} 1/i! (\lambda_0 t)^i. \quad (2.69)$$

При  $k = 1$   $\gamma$  – распределение совпадает с экспоненциальным распределением. При увеличении  $k$  характер  $\gamma$  – распределения приближается к нормальному распределению.  $\gamma$  – распределение является частным случаем  $\chi^2$  – распределения. Оно возникает при некоторых условиях формирования случайной величины.

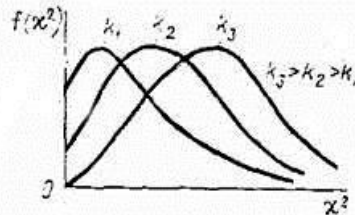
Например, если случайная величина  $t$  распределена по нормальному закону с параметрами  $T = 0$ ,  $\sigma = 1$ , то  $\sum_1^n t_i^2$  будет случайной величиной, распределенной по закону  $\chi^2$  – распределения, с параметром распределения  $k = n$ . Параметр  $k$  в данном случае равен числу слагаемых. Отношение удвоенного значения наработки на отказ к средней наработке, т. е. удвоенное число отказов, также подчиняется закону  $\chi^2$  – распределения. Формула для  $f(x)/\chi^2$  – распределения имеет сложный вид. Для фактического использования  $\chi^2$  – распределения разработаны специальные таблицы. Некоторые извлечения из них даны в табл.3 приложений.

**Пример 17.** Определить  $\chi_1^2$  для  $T_n$  и  $\chi_2^2$  для  $T_v$  при доверительной вероятности  $\gamma = 0,8$  и чисел отказов 21:  $\chi_1^2 (k = 44; \alpha = 0,1) = 56,4$ ;  $\chi_2^2 (k = 42; \alpha = 0,9) = 30,8$ . 5.

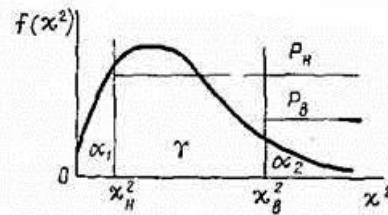
Вид кривых  $\chi^2$  – распределения показан на рис.2.14. Из рисунка видно, что форма кривых зависит от значения параметра  $k$  – числа степеней свободы. Чем меньше  $k$ , тем более  $\chi^2$  – распределение становится асимметричным и совпадает при некоторых значениях  $k$  с экспоненциальным: чем больше  $k$ , тем больше оно приближается к нормальному распределению. При  $k = 30$  его можно считать практически совпадающим с нормальным. Чтобы определить значение  $\chi^2$ , пользуясь таблицей  $\chi^2$  – распределения, необходимо знать число степеней свободы  $k$  и  $p$  – вероятность того, что  $\chi^2$  будет больше найденного значения. Например, при  $k = 3$  и  $p = 0,9$  значение  $\chi^2 = 0,584$ . Значения  $k$  определяются по определенным правилам. Например, если в качестве  $\chi^2$  используется сумма

квадратов  $\sum_1^n t_i^2$ , тогда для плотности распределения  $\chi^2$  числом степеней свободы  $k$  будет число слагаемых  $n$

Если в качестве  $\chi^2$  используется  $2t_p/T_0 = 2n$  (где  $t_p$  – суммарная наработка изделия;  $n$  – суммарное число отказов), тогда числом степеней свободы для  $f(\chi^2)$  будет удвоенное число отказов ( $k = 2n$ ). Значение  $P$  также выбирается по определенным правилам в каждом конкретном случае использования таблицы. Для случая, представленного на рис.2.15, значение  $P$  для нижнего значения  $P_H$  определяется по формуле  $P_H = (1 + \gamma)/2$ ; для верхнего – по формуле  $P_B = (1 - \gamma)/2$ , где  $\gamma$  – заданная доверительная вероятность.



**Рис.2.14.**  
Графическое представление  $\chi^2$  – распределения ( $k$  – число степеней свободы)



**Рис.2.15.** Графическое представление доверительного интервала случайной величины (по закону  $\chi^2$  – распределения:  $\gamma$  – доверительная вероятность;  $P_H, P_B$  – вероятности, определяющие границы доверительного интервала)

**Таблица 2.3. Сводный перечень сведений о законах распределения случайных величин**

Определение	Законы распределения			Параметр
	$f(t)$	$Q(t)$	$P(t)$	
Экспоненциальный	$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ 	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 	$P(t) = e^{-\lambda t}$ 	$\lambda(t)$ 
$\gamma$ - распределение	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$ 
распределение Вейбулла	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$ 
Нормальное распределение	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$ 

**Распределение Вейбулла** – распределение, промежуточное между нормальным и экспоненциальным. Оно удобно для подбора наиболее подходящего выражения для опытного распределения. Плотность вероятности

времени до отказа по этому распределению равна:  $f(t) = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1} e^{-\lambda_0 t^\alpha}$ , где  $\lambda_0, \alpha$  – параметры закона распределения.

Вероятность отсутствия отказа за время  $t$  равна:  $P(t) = e^{-\lambda_0 t^\alpha}$ .

Интенсивность отказов равна:  $\lambda = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1}$ .

Если  $\alpha = 1$ , то  $f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$ , т. е. распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением, у которого  $\lambda = \lambda_0$ .

Если  $\alpha < 1$ , то интенсивность отказов является монотонно убывающей функцией. Если  $\alpha > 1$ , то интенсивность отказов – это монотонно возрастающая функция.

Распределение Вейбулла для времени до отказа изделия возникает обычно тогда, когда имеют место отказы различной физической природы (износ, старение, механические перегрузки и т. п.). Сводный перечень сведений о законах распределения случайных величин дан в табл.2.3.

### Рекомендуемая литература

1. Авиром Л. С. Надежность конструкций сборных зданий и сооружений. Л.: Стройиздат, 1971. – 215 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 567 с.
3. Винниченко Ю. С., Паншин С. Д. Введение в проектирование сложных технических систем. – М.: Изд. МГТУ, 1993. – 82 с.
4. Голинкевич Т. А. Прикладная теория надежности. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.
5. Гнеденко В. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М., Наука, 1965.
6. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов.–М.: Науч. – изд. центр «Инженер», 1999, – 295 с.
7. Лужин О. В. Вероятностные методы расчета сооружений. – М.: Стройиздат, 1983. – 94 с.
8. Ржаницин А.Р.Теория расчета строительных конструкций на надежность.–М.Стройиздат, 1978, 239 с.
9. Ройтман А. Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 175 с.
10. Чирков В. П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций, – М.: Транспорт, 1980. – 128с.
11. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – ГОСТ 27.002 – 89.

### Приложения

**Таблица 1 значений функций  $y = e^{-x}$**

х	у	х	у	х	у	х	у
0,0	1,000	0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050
0,1	990	41	664	81	445	10	045
02	980	42	657	82	440	20	041
03	970	43	650	83	436	30	037
04	961	44	644	84	432	40	033
05	951	45	638	85	427	50	030
06	942	46	631	86	423	60	027
07	932	47	625	87	419	70	025

08	923	48	619	88	415	80	022
09	914	49	613	89	411	90	020
10	905	50	606	90	407	4,00	0183
15	861	55	577	95	387	50	0111
16	852	56	571	96	383	60	0101
17	844	57	565	97	379	70	0091
18	835	58	560	98	375	80	0082
19	827	59	554	99	372	90	0074
20	819	60	549	1,00	368	5,00	0067
21	811	61	543	10	333	10	0061
22	803	62	538	20	302	20	0055
23	795	63	533	30	273	30	0050
24	787	64	527	40	247	40	0045
25	779	65	522	50	223	50	0041
26	771	66	517	60	202	60	0037
27	763	67	512	70	183	70	0033
28	756	68	507	80	165	80	0030
29	748	69	502	90	150	90	0027
30	741	70	497	2,00	135	6,00	0025
31	733	71	492	10	122	10	0022
32	726	72	487	20	11	20	0020
33	719	73	482	30	100	30	0018
34	712	74	477	40	091	40	0017
35	705	75	472	50	082	50	0015
36	698	76	468	60	074	60	0014
37	692	77	463	70	067	70	0012
38	684	78	458	80	061	80	0011
39	677	79	454	90	055	90	0010
40	670	80	449	3,00	050	7,00	0009

**Таблица 2. Значения нормальной функции распределения**

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u); \quad \Phi(u) = 1/\sqrt{2\pi} \int_0^u \exp(-u^2/2) du$$

u	F(t)	u	F(t)	u	F(t)
–	0,500	–	0,055	0,80	0,788
0,00		1,60			
–	0,460	–	0,44	0,90	0,816
0,10		1,70			
–	0,420	–	0,36	1,00	0,841
0,20		1,80			
–	0,382	–	0,023	1,20	0,885
0,30		2,00			
–	0,344	–	0,014	1,30	0,903
0,40		2,20			
–	0,308	–	0,008	1,40	0,919
0,50		2,40			
–	0,242	–	0,003	1,60	0,945
0,70		2,80			
–	0,184	0,10	0,540	1,80	0,964
0,90					
–	0,159	0,20	0,579	2,00	0,977
1,00					
–	0,136	0,30	0,618	2,20	0,986
1,10					

– 1,20	0,115	0,40	0,655	2,40	0,9918
– 1,30	0,097	0,50	0,691	2,60	0,995
– 1,40	0,080	0,60	0,726	2,80	0,997
– 1,50	0,067	0,70	0,758	3,00	0,999

**Таблица 3. Значения  $\chi^2$  в зависимости от  $k$  и  $\alpha$**

$k$	$\alpha$								
	0,99	0,95	0,90	0,80	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05
1	0,000	0,004	0,016	0,064	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84
2	0,020	0,103	0,211	0,446	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99
3	0,115	0,352	0,584	1,005	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82
4	0,297	0,711	1,064	1,649	2,36	4,88	5,99	7,78	9,49
5	0,554	1,145	1,610	2,34	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07
6	0,872	1,635	2,20	3,07	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59
7	1,239	2,17	2,83	3,82	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07
8	1,646	2,73	3,49	4,59	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51
9	2,09	3,32	4,17	5,38	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92
10	2,56	3,94	7,86	6,16	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31
15	5,23	7,26	8,55	10,3	14,3	17,3	19,3	22,3	25,0
20	8,26	10,9	12,4	14,6	19,3	22,8	25,0	28,4	31,4
30	15,0	18,5	20,6	23,4	29,3	33,5	36,3	40,3	43,8
40	22,2	26,5	29,1	32,3	39,3	44,2	47,3	52,0	55,8
50	29,7	34,8	37,7	41,4	49,3	54,7	58,2	63,2	67,5

**Примечание.**  $k$  – число степеней свободы,  $\alpha$  – вероятность того, что  $\chi^2$  принимает значение больше указанного в таблице.

### Содержание

Наименование разделов	Стр.
Глава I. Общие определения теории надежности строительных систем	3
1.1. Общие положения	3
1.2. Основные терминологические понятия теории надежности строительных систем	6
1.3. Понятия и классификация отказов и дефектов в конструкциях сооружений	10
1.4. Факторы, определяющие надежность сооружений	17
1.5. Количественные показатели надежности	23
Глава II. Математические аспекты теории надежности строительных систем	30
2.1. Понятие вероятности события	30
2.2. Характеристики случайных событий и величин	32
2.3. Системы случайных величин	61
2.4. Законы распределения случайных величин	68
Рекомендуемая литература	79
Приложение	80



**АШРАБОВ А. А., ИШАНХОДЖАЕВ А.А.,  
РАДЖАБОВ Т. Ю.**

**ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ  
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Редактор:

Разрешено в печать \_\_\_\_\_ Объем печ. л. 6,94  
Формат бумаги 60x84 1/16, заказ № \_\_\_\_\_ Тираж \_\_\_\_\_ экз.

Тиражировано в типографии ТАДИ.

Ташкентский автомобильно дорожный институт

Адрес: ТАДИ.