

**Проект SAMCO  
Итоговый отчет 2006**

---

**F08a  
РУКОВОДСТВО  
ПО ОЦЕНКЕ  
СУЩЕСТВУЮЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

**Русский перевод**

---

SAMCO Final Report 2006

F08a Guideline for the Assessment  
of Existing Structures

ООО «Грачёв и Партнёры»

Переводчики:

Патрушева Н.А.

Сермягина Н.Б.

Слепушкин В.А.

Топорков А.С.

Редактор:

Грачёв В.Ю.

Перевод от 03.04.2013

Перевод для редактирования перед представлением на регистрацию во ФГУП «СТАНДАРТИН-ФОРМ» и Технический Комитет 456 «Строительство».

# СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение .....	4
2 Общие положения .....	4
2.1 Область применения .....	4
3 Принципы конструктивной оценки .....	5
3.1 Цели.....	5
3.2 Методология .....	6
3.3 Методы сбора данных .....	7
3.4 Методы расчета конструкции .....	10
3.5 Методы проверки надежности.....	11
4 Методы оценки конструкций .....	13
4.1 Оценка эксплуатационных характеристик (уровень 1) .....	13
4.2 Методы оценки на основе частных коэффициентов (уровни 2, 3, 4) .....	13
4.3 Методы вероятностной оценки (уровень 5).....	15
4.4 Особые случаи оценки .....	20
Список литературы.....	21
Приложение А. Классификация и структура .....	22
А.1 Краткий обзор уровней оценки .....	23
Приложение В. Методы расчета вероятности разрушения .....	28
В.1 Методы моделирования (методы уровня 3).....	28
В.2 Методы приближения (методы уровня 2).....	29
Приложение С. Целевые уровни надежности .....	30
Приложение D. Методы уточнения измеряемых величин .....	31
D.1 Оценка вероятностных показателей .....	31
D.2 Оценка характеристических и расчетных значений .....	31

## 1 ВВЕДЕНИЕ

По мере старения сооружений необходимость в оценке зданий, мостов, тоннелей, плотин и промышленных сооружений приобретает все большее значение. Ранее разработанные строительные нормы по проектированию новых конструкций зачастую не могут применяться для их оценки ввиду существенных различий между проектированием и оценкой. В результате прогнозирования показателей нагрузки и прочности новых конструкций возникают неопределенности параметров проектирования. Данные неопределенности отображают различия между большим количеством конструкций, обусловленные неравнозначными свойствами материалов, различными методами строительства и различиями во временной нагрузке, зависящей от местоположения конструкции. Кроме того, консервативный подход к проектированию не приводит к значительному увеличению стоимости конструкции, в то время как консервативный подход к оценке конструкции может привести к неоправданно высоким затратам на ремонт или замену конструкции.

Следовательно, существует явная необходимость формулирования технических правил оценки существующих конструкций. Некоторые страны, являющиеся участниками проекта SAMCO (Structural Assessment Monitoring and Control, «Конструктивная оценка, мониторинг и контроль», проект Европейской комиссии в рамках «Программы стабильного экономического роста, основанного на конкуренции»), особенно Великобритания, располагают нормами и рекомендациями по выполнению оценки, однако в большинстве европейских стран лишь отдельные методы оценки обсуждаются в научных кругах, и при этом редко используются практикующими инженерами. Настоящее руководство разработано в рамках пакета документов № 3 «Нормы и рекомендации» и предлагает методологическую основу для выполнения оценки, предполагающую поэтапную методику, начинающуюся с применения простых методов, и затем, при необходимости, переходящую к более сложным методам.

В первой главе определены общие положения и область применения руководства. Во второй главе подробно описаны основные принципы выполнения конструктивной оценки. Представлена структура методики выполнения оценки и отдельные методы сбора данных, расчету конструкции и проверке безопасности. В третьей главе дается пояснение уровней оценки (от уровня 0 до уровня 5) и связанных с ними методов.

## 2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1 Область применения

Процедуры по выполнению конструктивной оценки могут быть предприняты в случае изменения параметров несущей способности конструкции, таких как, например, износ конструкции под воздействием процессов, изменяющихся со временем (например, коррозии, усталости конструкции) или повреждения конструкции при случайных воздействиях, а также когда предполагается изменение нагрузки (например, при увеличении нагрузки от транспортных средств), или увеличение расчетного срока эксплуатации.

Оценка может выполняться с целью расчета текущей надежности конструкции (например, в случаях воздействия опасных факторов окружающей среды, таких как землетрясение или ураганный ветер и/или высокие волны).

Настоящее руководство предлагает методологическую основу для выполнения оценки существующих конструкций, а также обзор разнообразных методов конструктивной оценки, разработанных в последнее время. Руководство включает в себя описание связей и отличий между этими методами и призвано помочь практикующим инженерам сформировать правильное понимание процесса и избрать приемлемые методы оценки в зависимости от целей ее выполнения и наличия разных граничных условий.

В целях управления группами конструкций необходимо унифицировать метод выполнения оценки таким образом, чтобы различные конструкции оценивались одинаковым образом, а результаты, полученные разными органами, в разных регионах или странах, можно было сравнивать. Руководство составлено таким образом, чтобы обеспечивать основу для выполнения данной задачи.

Еще одной целью руководства является пояснение принципов конструктивной оценки и определение нескольких ее уровней, начиная с простых и экономичных методов и постепенно переходя к более сложным и, вместе с тем, дорогостоящим методам.

Настоящее руководство может применяться ко всем типам существующих конструкций (например, мостам и тоннелям, зданиям, промышленным сооружениям, находящимся как на суше, так и в море), состоящих из любого типа строительных материалов (бетона, стали, дерева, камня или композитных материалов).

Конструкции, подлежащие оценке, могут быть спроектированы на основе общепринятых инженерных принципов или норм проектирования, а также высокого качества строительства, исторического опыта и допустимой профессиональной практики.

Поскольку для оценки огнестойкости конструкции необходимы данные о свойствах, отличных от свойств, отвечающих за безопасность и целостность конструкции, оценка огнестойкости не рассматривается в настоящем руководстве.

## 3 ПРИНЦИПЫ КОНСТРУКТИВНОЙ ОЦЕНКИ

### 3.1 Цели

Как правило, конструктивная оценка представляет собой процесс определения степени надежности существующего сооружения с точки зрения ее способности выдерживать текущие и будущие нагрузки и функционировать в течение заданного периода времени.

Первым этапом процесса оценки всегда должно быть четкое формулирование целей оценки. Это необходимо для идентификации наиболее значимых предельных состояний. В методике оценки используются предельные состояния, которые, в свою очередь, связаны с конструктивными переменными, подлежащими расчету.

Существует широкий спектр различных методов оценки, характеризующихся разным уровнем сложности, и выбор соответствующего порядка действий в высшей степени зависит от поставленных требований к оценке.

Выделяют две основные цели выполнения оценки существующих конструкций: обеспечение безопасности и эксплуатационной пригодности конструкции и минимизация затрат.

#### 3.1.1 Безопасность и эксплуатационная пригодность конструкции

Основной задачей оценки является обеспечение устойчивости конструкции и ее элементов при нагружении. Оценка выполняется для критических предельных состояний, к которым относятся [1]:

- потеря равновесия в конструкции или ее элементах, как в твердом теле (например, опрокидывание);
- достижение максимального уровня прочности;
- преобразование конструкции или ее элемента в механизм;
- потеря устойчивости конструкции или ее элемента;
- внезапный переход предполагаемой конструктивной системы в новую систему (например, потеря устойчивости);

Снижение уровня эксплуатационной пригодности может привести к эксплуатационным ограничениям, и, следовательно, необходимости выполнения оценки эксплуатационной пригодности. Предельные состояния эксплуатационной пригодности включают в себя [1]:

- локальное повреждение, которое может привести к уменьшению срока эксплуатации конструкции;
- неприемлемый уровень деформаций, оказывающих влияние на эффективность использования конструкции;
- чрезмерная вибрация, вызывающая у людей дискомфорт.

Безопасность и эксплуатационная пригодность могут оцениваться по ряду причин, среди которых изменения направления эксплуатации здания или увеличение нагрузок, влияние износа, повреждения в результате чрезмерного нагружения, а также вопросы, связанные с ошибками проектирования и строительства, качеством материалов, использовавшихся при строительстве, и качеством выполнения строительных работ.

Увеличение максимального уровня предельно допустимой временной нагрузки и изменения направления эксплуатации здания, вероятно, являются основными причинами для выполнения конструктивной оценки. В случае зданий подобные изменения могут привести к необходимости обеспечения средств поддержания нагрузки на более высоких этажах. Что касается мостов, во всем мире существует необходимость поднятия предельно допустимого уровня нагрузки от транспортных средств.

Любая конструкция в той или иной степени подвержена износу. Характер этих воздействий зависит от типа конструкции и ее местоположения. Главными причинами ухудшения характеристик в случае прочности конструкции являются коррозия и усталость. Скалывание, образование трещин и ухудшение состояния поверхности являются типичными показателями износа.

Воздействие, оказываемое землетрясениями и ураганами, может привести к повреждению конструкции. После возникновения подобных событий следует произвести расчет остаточной несущей способности конструкции.

В случае возникновения замечаний по поводу правильности проектирования и проведения строительных работ, включая низкое качество строительства и использованных материалов [6], может потребоваться оценка существующей конструкции.

#### 3.1.2 Минимизация затрат

За последние десятилетия были разработаны методы регулирования отдельных конструкций, таких как мосты, или целых групп конструкций, с целью минимизации общих затрат путем оптимизации освидетельствования, технического обслуживания и ремонтных работ. Главной задачей в рамках процесса принятия решений является выполнение оценки условий, характеризующих конструкцию, для того, чтобы определить текущее состояние конструкции и сделать предположение о ее функционировании в будущем.

Цель оценки в рамках системы управления конструкциями заключается в обеспечении данных о состоянии конструкции с целью оптимального выбора времени и объема работ по освидетельствованию, техническому обслуживанию и ремонту (с максимальной эффективностью при минимальных затратах), а также расстановке приоритетов технического обслуживания и ремонта группы конструкций или элементов отдельной конструкции. В дальнейшем необходимо добиваться минимизации затрат вследствие прерывания функционирования конструкции.

Результаты оценки должны предоставляться в удобной форме для персонала, управляющего сооружением. Это означает, что входные данные, вычисления и результаты оценки должны быть заархивированы для дальнейшего использования и проведения повторной оценки. Порядок выполнения оценки в пределах группы сооружений также должен быть унифицирован, для того, чтобы результаты можно было сравнивать и осущест-

влять проверки и работы по техническому обслуживанию в надлежащем режиме, а также принимать правильные решения в отношении ремонтных работ.

### **3.2 Методология**

Оценка существующих конструкций может выполняться с помощью методов различной степени сложности и затрат. Как было сказано выше, главными задачами является расчет текущей несущей способности и прогнозирование функционирования конструкции в будущем при максимальной точности и минимальных затратах. Следует избегать чрезмерно завышенных критериев, но и не устанавливать слишком заниженные ограничения.

В большинстве случаев рекомендуется начинать с простых консервативных методов и переходить к более сложным методам только в тех случаях, когда полученное значение несущей способности является недостаточным.

Конструктивная оценка, как правило, должна выполняться согласно принципам предельных состояний, с использованием характеристических значений и частных коэффициентов надежности. При необходимости применения более сложных методов, следует использовать вероятностный подход, если использование такого экономического оправдано.

В случае если оценка несущей способности конструкции неудовлетворительна, инженер может дать соответствующие рекомендации, однако заключительное решение, как правило, принимается техническим органом, который несет полную ответственность за обеспечение общественной безопасности. Конструкция, результаты оценки которой неудовлетворительны, может находиться в эксплуатации, при условии низкой степени риска и осуществления мониторинга.

#### **3.2.1 Классификация**

Методика оценки, как правило, делится на три группы: оценка, на основе измерений, оценка на основе моделирования и неформальная оценка.

##### Оценка эксплуатационной пригодности на основе измерений

К данной категории относятся методики оценки, при которых воздействие нагрузки определяется не с помощью расчета конструкции, а путем прямых измерений (например, мониторинга функционирования, испытания проверочной нагрузкой). Поскольку напрямую могут быть определены только измерения эксплуатационной пригодности, данный метод позволяет контролировать соответствие конструкции в отношении предельного состояния эксплуатационной пригодности. Данная методика состоит из двух этапов:

- (1) измерение воздействия нагрузки;
- (2) проверка эксплуатационной пригодности.

Методы проведения оценки на основе измерений в целом не являются сложными. Показательным примером ее применения является оценка измерения эксплуатационной пригодности, в частности, смещения или динамического поведения после использования конструкции по новому типу назначения. Также данный метод может использоваться в качестве основы для оценки практически несоответствующих требованиям и подлежащих мониторингу конструкций. Оценка на основе измерений не является значимой и поэтому не будет подробно рассмотрена в рамках настоящего документа.

##### Оценка безопасности и эксплуатационной пригодности на основе моделирования

К данной категории относятся все методики оценки, при которых воздействие нагрузки определяется при помощи расчета конструкции на основе модели. Используя данный метод можно смоделировать и, следовательно, провести оценку критического предельного состояния и предельного состояния эксплуатационной пригодности. Данная методика состоит из трех этапов:

- (1) сбор данных о нагрузке и прочности;
- (2) расчет воздействия нагрузки на модели конструкций;
- (3) проверка безопасности и эксплуатационной пригодности.

В большинстве случаев характер оценки основывается на конструктивной модели, исключение составляет лишь вышеупомянутая оценка эксплуатационной пригодности на основе измерений. Настоящее руководство, главным образом, будет ориентировано на представленные методы оценки. Подробная характеристика специальных элементов и выбор методологии в рамках каждого элемента представлены ниже:

##### Неформальная оценка:

К данной категории относятся методики оценки, основанные на опыте и заключении инженера, производящего оценку. Они являются в той или иной степени субъективными и применяются в исключительных случаях.

В большинстве случаев неформальная оценка проводится в рамках управления конструкцией, при котором ее состояние оценивается на основе визуального освидетельствования.

#### **3.2.2 Уровни оценки**

Как упомянуто ранее, методы оценки варьируются по степени сложности. Рекомендуется начинать оценку с простых, но заниженных методов нижнего уровня и, в случае неудачного результата, переходить на более точные верхние уровни. Данная классификация относится к специальным методам всех трех элементов (Приложение А).

Как правило, в рамках одного применяемого метода оценки сложность отдельных компонентов должна быть приблизительно одного уровня. Например, не имеет смысла измерять прочность и параметры нагрузки с помощью простых, но неточных методов, и использовать методы, основанные на полной вероятности в целях проверки.

Следует признать, что бывают случаи, когда рекомендуется применять сочетание методов с низкой и высокой степенью сложности. Например, в случае если первый этап оценки с низкой степенью сложности не

дает результата, а на втором этапе удастся определить прочность или параметры нагрузки с помощью более точных методов, таких, как метод неразрушающих испытаний, то расчет конструкции и проверка могут выполняться с помощью тех же простых методов, которые использовались на первом этапе, и оценка на этот раз может быть проведена успешно.

Рассматриваемые уровни оценки устанавливаются для структурирования процесса оценки. Они не являются обязательными, к тому же их границы достаточно подвижны. Данные уровни придерживаются тех, что установлены в Великобритании для оценки автодорожных мостов [7].

Ниже представлены предлагаемые уровни оценки, а их краткое описание приведено на рис. 1.

Уровень 0: Неформальная качественная оценка.

Оценка на основе инженерного опыта специалиста в основном применяется для предварительной оценки конструкции. Специалист в данном случае способен визуально оценить признаки износа, такие как коррозия стальных элементов или видимые признаки повреждений (трещины, отслаивания).

Уровень 1: Определение воздействия нагрузки на основе измерений.

Оценка эксплуатационной пригодности посредством измерения функциональных значений и их сравнения с пороговыми значениями. На данном уровне расчет конструкции не проводится. Пороговые значения могут быть приведены в нормах или указаны отдельно. Более подробно см. в п. 3.1.

Уровень 2: Метод частных коэффициентов на основе обзора документации.

Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности с использованием информации, взятой из проектной, строительной и контрольной документации. Расчет конструкции, как правило, проводится с использованием простых методов. Проверка безопасности и эксплуатационной пригодности основана на частных коэффициентах. Более подробно см. в п. 3.2.1.1.

Уровень 3: Метод частных коэффициентов на основе дополнительного исследования.

Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности с использованием информации, взятой из подробных неразрушающих исследований, относящихся к определенной конструкции. Расчет конструкции проводится с использованием точных методов и подробных моделей. Проверка безопасности и эксплуатационной пригодности основана на частных коэффициентах. Более подробно см. в п. 3.2.1.2.

Уровень 4: Измененная целевая надежность, изменение частных коэффициентов.

Проверка несущей способности с помощью измененных частных коэффициентов надежности в зависимости от местоположения конструкции. Свойства конструкции наряду с внешними условиями могут воздействовать на меры безопасности. На практике изменение частных коэффициентов выполняется для групп конструкций, характеризующихся аналогичным поведением или воздействием нагрузок. Более подробно см. в п. 3.2.2..

Уровень 5: Полная вероятностная оценка.

Оценка, принимающая во внимание все основные переменные с их статистическими свойствами. Вместо частных коэффициентов применяется непосредственно расчет надежности конструкций. Подробности описаны в п. 3.3.

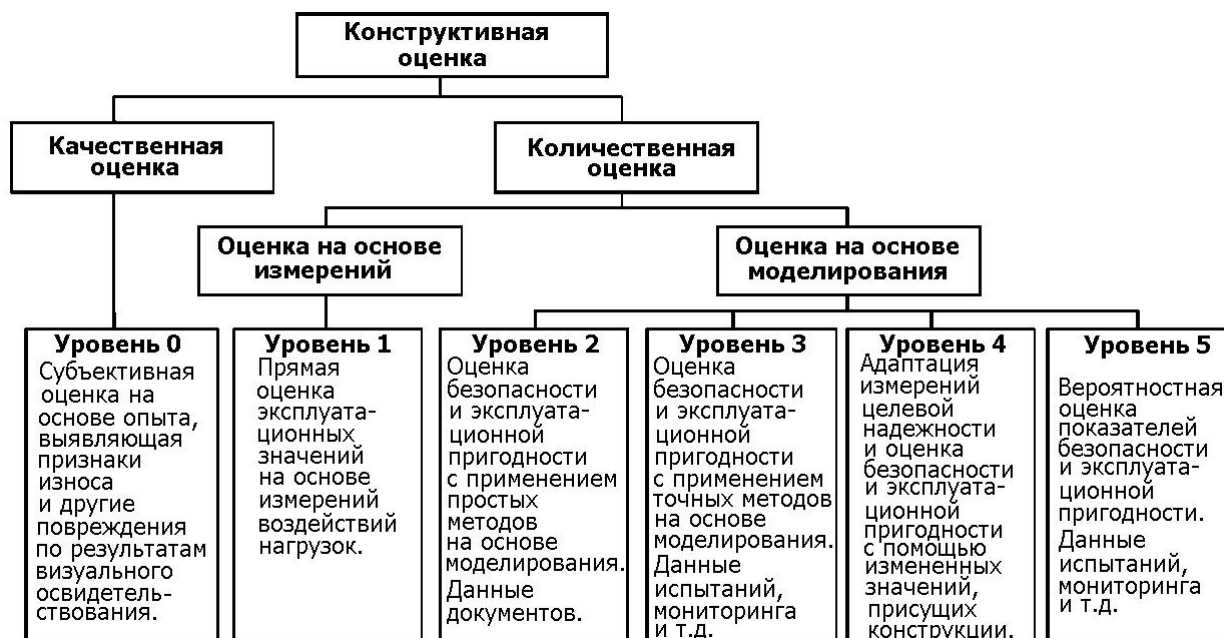


Рис. 1. Уровни конструктивной оценки

### 3.3 Методы сбора данных

Для определения воздействий нагрузки, в большинстве случаев, необходимо проводить сбор информации о свойствах материалов, свойствах конструкции, ее размерах, а также о предыдущих, текущих и/или ожидаемых нагрузках на конструкцию. На свойства материалов могут воздействовать условия окружающей среды физического, химического или биологического характера.

Основное различие между проектированием и оценкой заключается в том, что количество неопределенностей в оценке может быть существенно снижено благодаря данным, полученным на существующей конструкции.

Существует широкий спектр методов с различной степенью затрат и точностью результатов. Выбор метода сбора данных во многом зависит от цели проведения оценки, а также от порядка проведения оценки. Как правило, простые методы такие, как изучение документации применяются на начальном этапе. С целью сокращения количества неопределенностей в рамках более высоких уровней оценки должны применяться более сложные методы испытаний. Неразрушающие методы должны, по возможности, использоваться вместо разрушающих методов.

Кроме того, необходимо предоставить данные, характеризующие текущее состояние конструкции, а также информацию о процессах, изменяющихся со временем, таких как разрушение. Эти данные могут быть собраны путем проведения периодических или постоянных измерений (иными словами, путем мониторинга технического состояния конструкции).

Результаты сбора данных должны предоставляться в единой форме, чтобы обеспечить возможность сопоставления данных, полученных различными методами и использовать их проведения оценки в будущем.

### **3.3.1 Изучение документации**

Наиболее простым способом сбора данных о конструкции, подлежащей оценке, чаще всего, является изучение проектной и строительной документации и отчетов освидетельствования и технического обслуживания. Необходимо убедиться в правильности рассматриваемых документов.

Нагрузки, как правило, могут быть определены в соответствии с действующими нормами о нагрузках, а условия окружающей среды могут быть получены из отчетов освидетельствования.

Характеристики прочности, такие как свойства и размеры материалов и конструкции могут быть взяты из норм, чертежей и прочей проектной технической документации (например, статических расчетов, отчетов о состоянии подстилающего слоя) и отчетов о ранее проводимых освидетельствованиях и техническом обслуживании.

### **3.3.2 Освидетельствования и испытание материалов**

С целью сокращения количества неопределенностей при расчете нагрузок и прочности в процессе оценки необходимо использовать данные конкретной площадки. Наиболее эффективными методами являются проведение проверок на строительной площадке и испытание материалов.

Под проверкой подразумевается локальное исследование параметров нагрузки и прочности. Существует широкий круг методик проведения проверки, начиная от простого визуального осмотра и заканчивая рядом передовых неразрушающих методов.

Проверки в первую очередь предназначены для выявления и исследования процессов разрушения, таких как коррозия и усталость, и выявления изменений в системах конструкции. Следовательно, необходимо регулярно проводить проверки.

Испытания материалов выполняются с целью выявления прочностных характеристик используемого строительного материала. Испытания делятся на разрушающие и неразрушающие. Они могут проводиться как на площадке, так и в лабораторных условиях.

Параметры, подлежащие исследованию, и соответствующие методы исследования включают:

- изменения (повреждения) формы поперечного сечения и продольной формы в результате перегрузок (например, трещин, разрывов), а также вследствие разрушающих процессов (например, коррозии, отслаивания, усталостных трещин) с помощью лазерных, ультразвуковых установок, штангенциркуля, электронных приборов и т.д.;
- конструктивная целостность (например, в случае наличия скрытого повреждения или неоднородности), например, с помощью эхо-импульсного метода испытаний;
- прочность материалов, с помощью испытания образцов на разрыв и сжатие, испытание материалов методом царапания (склерометрии), испытания на выдерживающее усилие, испытания на прочность покрытия и т.д.;
- параметр, влияющий на собственный вес конструкции и длительно действующую нагрузку (например, плотность материалов, стационарное оборудование);
- параметры, определяющие продолжительность жизни конструкции (например, условия окружающей среды, карбонизация и содержание хлоридов в бетоне) с помощью испытаний на кислотность и щелочность, испытаний фенолфталеином, количественный анализ образцов с помощью хлорида, и т.д.;
- оценка эксплуатационной пригодности (например, ширины трещин, состояния дорожного покрытия).

### **3.3.3 Испытание и мониторинг функционирования**

В случае если поведение конструкции не является достаточно ясным, или сбор данных с помощью приведенных выше методов не приводит к ожидаемым результатам, необходимо проводить испытание функционирования конструкции. Оно предполагает единичное, периодическое или постоянное измерение статического или динамического поведения конструкции с целью получения информации о необходимых свойствах конструкции.

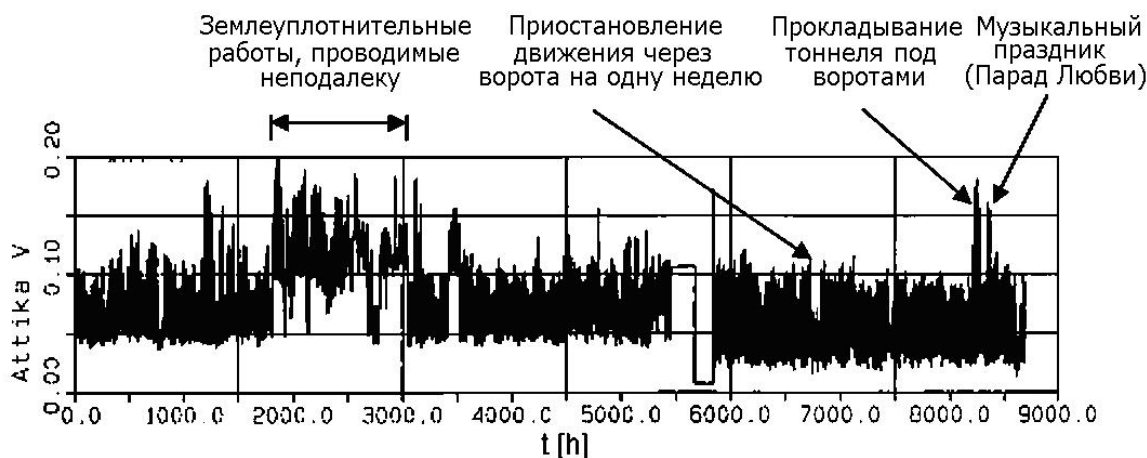
Важно знать, что результаты измерений не обязательно будут достоверными. Поэтому в ходе измерения и в ходе интерпретации данных следует проявлять внимательность и осторожность при установке датчиков. По мере возможности результаты измерений должны быть избыточными.

#### **Мониторинг технического состояния конструкции**

На сегодняшний день долгосрочный мониторинг сооружений или их элементов является основным инструментом для постоянного наблюдения за целостностью конструкции и становится более доступным для ответственных органов или владельцев зданий.



Под мониторингом технического состояния конструкции понимается постоянное или периодическое изменение таких изменяющихся со временем параметров, как смещение, напряжение и деформация, оценка повреждения (например, ширины трещины) и характеристик вибрации с целью обнаружения изменений в свойствах конструкции, а в некоторых случаях, оповещение об этих изменениях, если достигается или превышает предельное состояние.



**Рис. 2. Мониторинг воздействий нагрузки (в данном случае, динамических воздействий) на Бранденбургских воротах в Берлине. Различные периоды нагрузки и единичные мероприятия легко распознаваемы.**

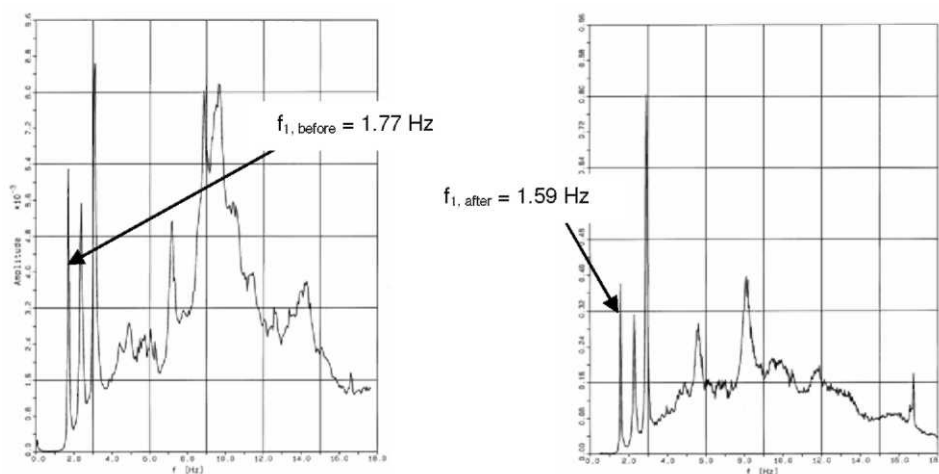
Мониторинг технического состояния конструкций может применяться в случаях, когда состояние старых или поврежденных конструкций оценивается как «едва удовлетворительное» или «едва не удовлетворительное», и данные конструкции не подлежат сносу или перемещению, но должны находиться под пристальным наблюдением.

Мониторинг технического состояния также может применяться в отношении новых конструкций (что означает мониторинг на протяжении всего срока эксплуатации). Преимущество в данном случае заключается в том, что свойства конструкции будут известны в неповрежденном состоянии, и последующие данные прямых наблюдений за изменениями ее свойств позволят прогнозировать дальнейшее функционирование конструкции.

#### Идентификация системы посредством статических и динамических измерений

В случае если размеры реальной конструкции и свойства ее материалов невозможно получить посредством измерений и испытаний (например, по причине их недоступности, наличия скрытых повреждений), тогда такие свойства, как жесткость элементов конструкции и соединений, гибкость узлов или состояние несущей способности могут быть получены путем идентификации системы. Данный метод также является эффективным инструментом обнаружения повреждений и мониторинга оценки ущерба.

С помощью данного метода в реальной конструкции измеряются такие статические свойства, как смещения под воздействием определенных нагрузок (например, прогибы и наклоны), а также динамические свойства, такие, как собственные колебания и их формы. Модель системы конструкции, становится более точной и, таким образом, отображает характерное поведение реальной конструкции.



**Рис. 3. Идентификация системы: Изменения в первых собственных колебаниях Бранденбургских ворот в Берлине до и после изменений в условиях фундамента показаны посредством энергетических спектров.**

В случае, когда идентификация системы применяется периодически или даже на постоянной основе, тогда становится возможным определение и мониторинг изменений свойств конструкции со временем или других

событий, вызывающих повреждения. Модель конструкции в таком случае будет уточнена в соответствии с новыми полученными результатами измерений.

Следует упомянуть, что условия окружающей среды, особенно температурные, могут оказывать большое влияние на статические и динамические измерения. Это следует учитывать при оценке свойств конструкции.

#### Испытания проверочной нагрузкой

Испытание конструкции определенной нагрузкой с целью проверки ее несущей способности является эффективным средством оценки существующих конструкций.

В зависимости от исследуемого предельного состояния используются различные типы испытаний проверочной нагрузкой. В рамках предельного состояния по пригодности к эксплуатации воздействие нагрузки может быть измерено после приложения проверочной нагрузки, а затем последует проверка того, превысит ли измеренная величина предельное состояние или нет. В рамках критического предельного состояния тот факт, что конструкция или ее элементы не разрушаются в ходе испытания, подтверждает отсутствие превышения предельного состояния.

Кроме того, обычной практикой является увеличение проверочной нагрузки до появления признаков пластической деформации, например, с помощью датчика шумового воздействия на железобетонные конструкции. Разумеется, необходимо удостовериться, что поведение при разрушении будет носить пластичный, а не ломкий характер.

Разница между испытанием проверочной нагрузкой и методами идентификации системы с определенными нагрузками заключается в том, что в первом случае результаты будут использованы непосредственно для подтверждения несущей способности или эксплуатационной пригодности, в то время как во втором случае результаты применяются для корректировки модели конструкции в сторону реальности.

#### **3.3.4 Мониторинг временной нагрузки и состояния окружающей среды**

Нагрузки, обусловленные особенностями назначения сооружений (например, нагрузки на перекрытие в зданиях и в случае мостов – нагрузки от транспортных средств), также как и нагрузки, обусловленные воздействием факторов окружающей среды (например, ветра, волн, температуры, землетрясений) главным образом зависят от конкретного места расположения сооружений.

При помощи данных, полученных в ходе проведения мониторинга, могут быть построены модели нагрузки, характерной для определенного местоположения конструкции, которые могут впоследствии использоваться для выполнения конструктивной оценки вместо моделей нагрузки, предлагаемых в строительных нормах.

Могут быть выявлены и проведена оценка воздействий на конструкцию в условиях критической нагрузки, как в случае особых транспортных условий, ураганного ветра и землетрясения.

Мониторинг условий окружающей среды (включая физические, химические и биологические воздействия) позволяет спрогнозировать износ конструкции или ее элементов в будущем.

### **3.4 Методы расчета конструкции**

Расчет функционирования конструкции следует выполнять, используя модели, которые с большой долей достоверности описывают нагрузку на конструкцию, ее поведение и прочность ее элементов. Аналитическая модель должна отражать фактическое состояние существующей конструкции [2].

#### **3.4.1 Простые методы расчета**

На начальном уровне оценки зачастую эффективен расчет воздействия нагрузки основными консервативными методами, использующими простые структурные модели, при условии, что предположительно большая неопределенность рассматривается с соответствующим запасом надежности.

Стандартные простые методы расчета, кроме прочих, включают расчет пространственной конструкции и ригидная в сочетании с простым распределением нагрузки и линейно-упругим поведением материалов, что приводит к равновесному решению нижнего предела.

#### **3.4.2 Комплексные методы расчета**

В случае если оценка, выполненная на начальном уровне, себя не оправдала, необходимо применение сложных методов расчета воздействия нагрузки.

Главным образом, комплексные методы включают в себя расчет методом конечных элементов и нелинейные методы, такие как расчет площадки текучести, при использовании которых можно получить более высокие значения допустимой нагрузки. В частности, специальное моделирование поведения материала, такое как моделирование изменяющегося со временем поведения (например, усадки и ползучести бетона в железобетонных конструкциях), и изучение взаимодействий между компонентами материала (например, сцепления, ужесточения при растяжении железобетона) помогут обнаружить запас допустимой нагрузки и уменьшить консервативность оценки.

При проведении полной вероятностной проверки безопасности, для моделирования конструкции могут использоваться вероятностные конечные элементы. Отличие от стандартных моделей метода конечных элементов состоит в том, что вероятностные элементы учитывают пространственную корреляцию случайных переменных.

#### **3.4.3 Адаптивные модели**

Для того, чтобы в ходе оценки воспользоваться новой информацией о поведении конструкции, полученной, например, при выполнении долгосрочного мониторинга, модели должны уточняться с учетом новой информации.

Адаптивные модели способны автоматически уточнять конструктивные параметры (например, параметры жесткости конструкции), используя данные измерений, такие как изменения параметров сдвига, деформации или повреждений (например, значение ширины трещины).

### 3.5 Методы проверки надежности

В то время как сбор данных и расчет конструкции выполняются для получения информации о состоянии конструкции, третий этап процесса оценки связан с фактической оценкой границы безопасности и эксплуатационной пригодности, которая может быть представлена как отдаленность фактического состояния конструкции от ее предельного состояния.

Проверка существующего конструкции, при нормальных обстоятельствах, должна выполняться с целью обеспечения того целевого уровня надежности, который соответствует требуемому уровню эксплуатационных характеристик конструкции. Могут применяться используемые в настоящее время нормы, или нормы, эквивалентные требованиям стандарта ISO 2394, которые обеспечивают поддержание требуемого уровня надежности уже в течение длительного периода времени. Нормы, действовавшие при строительстве существующей конструкции, следует применять в качестве справочной документации [2].

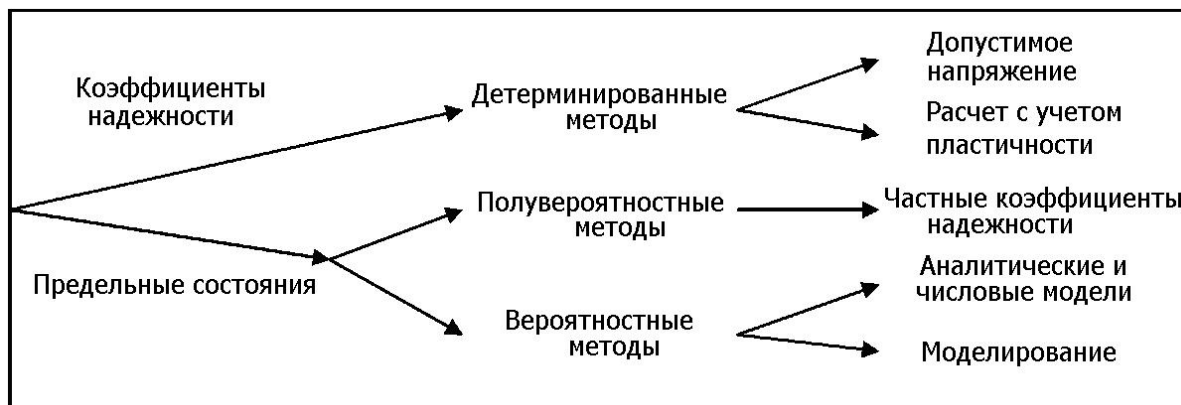


Рис. 4. Методы проверки надежности [3]

#### 3.5.1 Детерминированная проверка с использованием общих коэффициентов надежности

Детерминированный метод является традиционным способом определения уровня надежности. Он полностью основан на опыте, и показатели безопасности, соответственно, также имеют эмпирический характер. Отличительным признаком детерминированной проверки являются упрощения, и, связанные с ними, заниженные показатели надежности.

Наиболее известным детерминированным показателем надежности является «общий коэффициент запаса прочности». Он представляет собой соотношение прочности и воздействия нагрузки и применяется в большинстве случаев по отношению к прочности. Основные переменные представлены нормативными значениями, заданными детерминированным образом. Концепция допускаемых напряжений является типичным детерминированным методом проверки, который предполагает наступление разрушения конструкции, когда любой из нагружаемых элементов конструкции достигает максимально допустимого уровня напряжения. Точность метода зависит от того, насколько достоверно нормативное значение допускаемого напряжения соответствует разрушающему напряжению использованного материала и насколько достоверно полученное значение напряжения описывает фактическое напряжение реальной конструкции.

Другой концепцией является метод запаса прочности, по которому показатель надежности представлен «коэффициентом запаса прочности», который является соотношением предела прочности элемента и его допустимой нагрузки.

Методы детерминированной проверки с использованием одного общего коэффициента надежности не достаточно полно отображают действительное положение вещей, и содержат существенную долю неопределенности, и, следовательно, должны использоваться исключительно лишь как часть процедуры оценки существующих сооружений. Например, разброс значений переменной нагрузки намного шире разброса значений постоянной нагрузки. Применение общего коэффициента надежности приводит к получению совершенно разных значений уровня безопасности тяжелых конструкций, таких, как бетонные конструкции, по сравнению с легкими конструкциями, например, стальными.

#### 3.5.2 Частные коэффициенты надежности

Полувероятностный подход основан на принципе предельных состояний. Основная задача состоит в том, чтобы избежать разрушения элемента конструкции или самой конструкции, что называется критическим предельным состоянием. При конструктивной оценке, возможно, также важно производить расчет показателей эксплуатационной пригодности, в случаях, когда воздействия нагрузки на конструкцию могут привести к потере ее эксплуатационной пригодности, что также характеризуется как критическое предельное состояние.

В качестве меры безопасности устанавливаются частные коэффициенты надежности. Данные коэффициенты разработаны в ходе расчета надежности для определенного целевого уровня надежности и применяются по отношению к соответствующим расчетным параметрам. Частные коэффициенты надежности предотвращают чрезмерное варьирование расчетных параметров, которое может иметь место при их использовании в отношении прочности и нагрузки.

В рамках классификации вероятностных методов для расчета и оценки конструкции полувероятностные методы классифицируются как методы уровня 1, в которых основные переменные указываются с одним характеристическим значением.

При помощи полувероятностного метода проверки можно получить намного более точную характеристику реальной ситуации, поскольку в этом случае могут учитываться неопределенности тех расчетных параметров,

для которых они характерны. С тех пор как методы проверки на основе частных коэффициентов надежности были разработаны для целей проектирования, они используются в большинстве проектных норм. Для упрощения процедур проверки частные коэффициенты надежности используются по отношению к широкому спектру конструкций и типов разрушения. При проектировании конструкций более важным показателем является надежность конструкции по сравнению с реальной ситуацией, а экономичное проектирование подразумевает упрощение процесса строительства вместо обеспечения эффективности работы конструкции. Поэтому полув вероятностные методы являются скорее консервативными в отношении большей части конструкций, и уровень их консервативности варьируется в зависимости от конструкции.

### 3.5.3 Вероятностная проверка

Метод вероятностной проверки также основан на принципе предельных состояний, как упоминалось выше.

В рамках оценки будет предпринята попытка определения фактических значений расчетных параметров посредством выполнения проверки, испытаний, мониторинга или при помощи других методов, и тем самым, уменьшения неопределенностей. Процесс проверки предполагает использование данных в качестве основы для моделирования всех неопределенностей, присущих переменным, и расчета фактической вероятности разрушения.

Вероятность разрушения и надежность конструкции напрямую связаны между собой. Показателем достаточного или недостаточного уровня надежности конструкции является вероятность разрушения и соответствующий индекс надежности.

На сегодняшний день методы вероятностной проверки хорошо развиты и все чаще используются при проектировании и оценке зданий, мостов и промышленных сооружений. Тем не менее, данные методы крайне чувствительны к выбранным распределениям вероятности, в которых участвуют базисные случайные переменные, а также к методам расчета и моделям вычисления воздействий нагрузки (например, расчета ростверка, расчета методом конечных элементов). Поэтому, при их использовании, особенно в качестве эффективного средства конструктивной оценки, необходимо проявлять осторожность и иметь соответствующее экспертное заключение о переменных, чувствительных к результату.

### 3.5.4 Целевая надежность

При вероятностном подходе к оценке принятие конструктивного риска соответствует принятию требуемого минимума конструктивной надежности, определяемого как целевой уровень надежности. Требования конструктивной надежности, следовательно, формулируются с точки зрения принимаемого минимального индекса надежности  $\beta$  или принятого максимального уровня вероятности разрушения  $P_f$ .

Целевой уровень надежности, используемый для проверки существующей конструкции, может быть определен посредством его классификации в сравнении с данными общепринятой практики (т.е. используемой нормативной документации), при условии, что существующая практика является оптимальной. При использовании концепции минимальных ожидаемых общих затрат и/или посредством сравнения с другими социальными рисками (см. Приложение С) можно добиться дальнейшей оптимизации необходимого уровня надежности.

Требования к эксплуатационным характеристикам должны также формулироваться в зависимости от типа и значения конструкции, возможных последствий разрушения и социально-экономических критериев, которые должны учитываться при определении целевого уровня надежности [2, 8].

Существуют фундаментальные различия между процессами оценки существующих сооружений и расчета новых сооружений. От этих различий зависят требования в отношении эксплуатационных характеристик сооружений, и, следовательно, могут зависеть используемые в отдельных случаях целевые уровни надежности. Различиями проявляются в следующих моментах (стандарт ISO 13822):

- экономический фактор: разница затрат на приемочные работы и работы по улучшению конструкции может быть значительной, в то время как разница затрат на повышение безопасности при проектировании конструкции, как правило, незначительна, и, таким образом, при проектировании используются общие заниженные критерии, которые не должны использоваться в ходе выполнения оценки,
- социальный фактор: включает в себя перерыв в эксплуатации (или даже выселение пользователей) и в деятельности, а также культурно-историческую ценность, и вопросы, не влияющие на проектирование конструкций, кроме оценки,
- экологический фактор: снижение количества отходов и переработка мусора, и другие, менее важные вопросы представляющие меньшую важность при проектировании новых конструкций, однако, являющиеся важными при оценке существующих конструкций.

Значения целевой надежности указаны в нескольких нормативных документах и руководствах. В Приложении С приведен пример корректировки значений целевой надежности для полного срока эксплуатации сооружений, в зависимости от последствий разрушения, а также сравнительная стоимость обеспечения мер безопасности из стандарта ISO 2394.

## 4 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНСТРУКЦИЙ

### 4.1 Оценка эксплуатационных характеристик (Уровень 1)

Наиболее простым формальным методом оценки является непосредственное сравнение измеряемых эксплуатационных значений  $X_m$  с определенными пороговыми значениями  $X_t$ :

$$X_m \leq X_t$$

Оценка может проводиться при рабочей нагрузке или при определенной проверочной нагрузке.

Наиболее распространенные области применения:

- *Испытания на эксплуатационную пригодность после завершения строительства.*

Измерение статических и динамических параметров (например, смещения настила мостов, ускорения и собственной частоты колебаний пешеходных мостов).

- *Испытания на эксплуатационную пригодность и транспортную безопасность, предшествующие изменению условий использования.*

Измерение статических и динамических параметров (например, прогибов перекрытий в зданиях; смещения, наклонов, ускорения и собственной частоты колебаний настилов железнодорожных мостов при повышенной скорости движения поездов).

- *Мониторинг динамической нагрузки.*

Измерение статических и динамических параметров (например, увеличения амплитуды колебаний при плохом состоянии поверхности автодорожных мостов).

- *Мониторинг функционирования конструкций, находящихся в состоянии, близком к неудовлетворительному.*

Измерение статических и динамических параметров (например, смещения и трещинообразования).

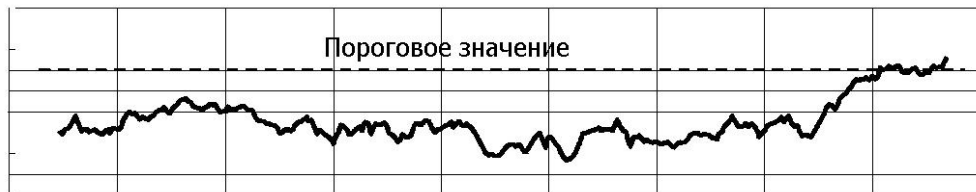


Рис. 5. Непосредственное измеренное эксплуатационное значение по времени и расстоянию до порогового значения

### 4.2 Методы оценки на основе частных коэффициентов (Уровни 2, 3, 4)

В рамках подхода, основывающегося на частных коэффициентах надежности, безопасность и эксплуатационная надежность конструкции или ее элемента проверяется посредством сравнения характеристических значений воздействия  $S_k$  и прочности  $R_k$

$$\gamma_S \cdot S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_R}$$

Где  $\gamma_S$  и  $\gamma_R$  являются частными коэффициентами надежности для результатов воздействий и значений прочности соответственно.

В то время как характеристические значения основываются на статистических параметрах, частные коэффициенты надежности определяются посредством калибровки. Совсем недавно это основывалось на инженерной оценке, сейчас же существуют вероятностные инструменты для калибровки.

#### 4.2.1 Зашифрованные частные коэффициенты надежности (Уровни 2, 3)

Частные коэффициенты надежности, как правило, содержатся в нормах и руководствах. В случае отсутствия специальных норм и руководств для оценки с адаптированными частными коэффициентами, следует использовать коэффициенты, откалиброванные для проектирования из соответствующих проектных норм и руководств (например, ЕС 1 для нагрузки; ЕС 2 – ЕС 7 для прочности).

##### 4.2.1.1 Оценка на основе документации и визуального освидетельствования (Уровень 2)

Данные о нагрузке и прочности берутся из проектной документации и норм за исключением некоторых значений, позволяющих провести итоговую оценку (повреждения, чрезмерной нагрузки). Информация о состоянии конструкции, полученная на основании визуального осмотра также может быть частью оценки.

В рамках данного метода расчет конструкции основан на тех принципах, которые используются в процессе проектирования. В случае необходимости могут использоваться более точные методы расчета (например, расчет методом конечных элементов).

Наиболее распространенные области применения:

- контроль безопасности и эксплуатационной пригодности после повреждений, вызванных предельной нагрузкой (повреждения могут быть следствием предельной нагрузки от транспортного потока или временной нагрузки на перекрытия, землетрясения, урагана и т. д.),
- контроль безопасности и эксплуатационной пригодности после повреждений вследствие износа (повреждения в результате усталости, коррозии или других процессов изнашивания),
- определение безопасности и эксплуатационной пригодности при изменении условий эксплуатации

(изменение условий эксплуатации может включать смену назначения здания (например, его переоборудование в склад) или обеспечение прохода большегрузного транспорта через мост, не предназначенный для данной нагрузки).

#### **4.2.1.2 Оценка на основе дополнительных исследований (Уровень 3)**

##### Подробное исследование свойств и размеров материалов

В случае если конструкция или ее элементы не могут быть признаны соответствующими методам второго уровня, то для успешного подтверждения безопасности и эксплуатационной пригодности могут использоваться более точные данные полевых и лабораторных испытаний.

Типовые параметры, подлежащие расчету:

- геометрические параметры,
- механические и химические свойства материалов,
- скрытые повреждения или неоднородности.

Методы исследования приведены и рассмотрены в п. 2.3.1.2.

Для того чтобы сделать удовлетворительное заключение о свойствах материала, испытания следует проводить с достаточным количеством образцов. Статистика результатов испытаний впоследствии может использоваться для определения характеристических значений исследуемых объектов. Геометрические величины, как правило, используются с их номинальными значениями.

##### Идентификация системы на основе измерений

В случае необходимости использования более точных методов и моделей расчета (например, модели расчета методом конечных элементов), конструкционные свойства модели следует адаптировать к реальности. Для этого рекомендуется определить показатели функционирования и сравнить их с показателями модели. Затем необходимо адаптировать параметры конструкции для модели, чтобы она надлежащим образом отображала реальную конструкцию.

Показатели функционирования и метод сбора данных:

- смещения (например, прогиб середины пролета);
- значения напряжения / деформации;
- собственная частота колебаний и их формы.

Методы сбора данных подробно представлены в п. 2.3.1.3.

В рамках адаптации модели выделяются следующие параметры конструкции:

- жесткость поперечного сечения (модуль упругости, размеры, жесткость пролетных строений и соединений);
- гибкость петель и подшипников;
- распределение массы и особенности демпфирования;
- ограничения, влияющие на функционирование конструкций (например, внешнее предварительное напряжение).

##### Модели динамических нагрузок, характерные для конкретного объекта эксплуатации

Как правило, в данном случае оценка проводится с соблюдением требований к нагрузкам для всех мостов, взятых из стандартов. Данные модели нагрузок рассчитаны на худший случайный сценарий из возможных. В случае с мостами это может, например, включать сценарии с максимальным динамическим воздействием, критическими перегрузками транспортными средствами, максимально возможным односторонним затормаживанием на мосту. Более того, данные модели рассчитаны на будущее увеличение динамической нагрузки на мосту и не предназначены для оценки безопасности на коротких промежутках времени.

В случае с мостами, учет различных условий движения транспорта по различным типам дорог, учет различных типов воздействий, а также низкая вероятность максимальных эффектов воздействия, происходящая одновременно с односторонним затормаживанием, ведет к созданию специальных моделей с заниженными значениями [7].

Для разработки модели динамической нагрузки для конкретного объекта следует провести сбор статистических данных ряда конструкций одного типа. На основании собранных данных следует сгенерировать вероятностные модели нагрузок. Наряду с расчетом надежности модель нагрузки будет откалибрована для определенных типов конструкций. Данную работу необходимо проводить на предварительных этапах оценки с привлечением технических органов.

#### **4.2.1.3 Уточнение измеряемых величин:**

Исследования существующих конструкций или их элементов направлено на уточнение информации о прочности конструкции.

Дополнительную информацию о прочности конструкции можно получить:

- из исследований и испытаний элементов конструкции;
- из проверки функционирования конструкции в целом.

На основании таких новых данных могут уточняться результаты оценки предшествующих («предыдущих») функций распределения, а с ними – характеристические и/или расчетные значения.

Различные подходы в рамках формата частного коэффициента представлены в приложении D.

#### **4.2.2 Измененные частные коэффициенты надежности (Уровень 4)**

Целевая надежность, основанная на характеристиках безопасности отдельно взятой конструкции и выступающая в качестве критерия оценки, может быть изменена. В рамках формата частного коэффициента, указанные факторы необходимо изменить для того, чтобы представлять скорректированный предел безопасности. Что касается параметров прочности и нагрузки, реальная оценка до сих пор основана на исключительно детерминированном подходе, поскольку для каждого базисного параметра используются одни и те же фиксированные номинальные или характеристические значения.

Среди конкретных характеристик безопасности выделяются предшествующие нагрузки, последствия разрушения, запас прочности и избыточности, предупреждение разрушения в ходе проверки и мониторинга.

#### Предшествующие нагрузки:

При рассмотрении изменений, основанных на предшествующих нагрузках, основным допущением является тот факт, что, если мост находился в эксплуатации довольно долгое время, то можно предположить, что он подвергался некоторым предельным нагрузкам.

#### Последствия разрушения:

При рассмотрении изменений, основанных на последствиях разрушения, сооружения в случае наступления разрушения можно разделить согласно типам последствий (например, низкая, средняя, высокая, очень высокая степень угрозы для жизни и экономических последствий). Данная классификация основана на коэффициенте  $\rho$ , который представляет собой отношение между общими затратами (затратами на строительство с прямыми затратами при разрушении) и затратами на строительство.

#### Запас прочности и избыточности:

При рассмотрении изменений, основанных на запасе прочности и избыточности, сооружения в случае наступления разрушения можно разделить согласно типам разрушения (например, пластичное и избыточное с высоким запасом прочности, хрупкое разрушение).

#### Предупреждение о разрушении:

При рассмотрении изменений, основанных на предупреждении разрушения и при планируемом регулярном ранее проводимом мониторинге, величина целевой надежности может быть уменьшена.

Изменение частных коэффициентов надежности на основе уточненной целевой надежности является вероятностным методом, который должен проводиться для ряда конструкций и их элементов техническим органом.

### **4.3 Методы вероятностной оценки (Уровень 5)**

Основным результатом метода вероятностной оценки является вычисленная вероятность разрушения или равнозначный индекс надежности конструкции или ее элемента. В отличие от понятия частного коэффициента надежности, в котором расчетные параметры являются определенными, а неопределенности контролируются коэффициентами надежности, вероятность разрушения напрямую зависит от неопределенностей в нагрузке и параметрах прочности (и от других факторов, таких как суммарная погрешность и т.д.).

Неопределенности моделируются с помощью соответствующих функций распределения вероятностей для каждой основной переменной, а для определенных предельных состояний вероятность разрушения или равнозначный индекс надежности рассчитывается для всей конструкции в целом или для ее элементов.

Согласно международному стандарту ISO 2394, выделяются три типа неопределенностей:

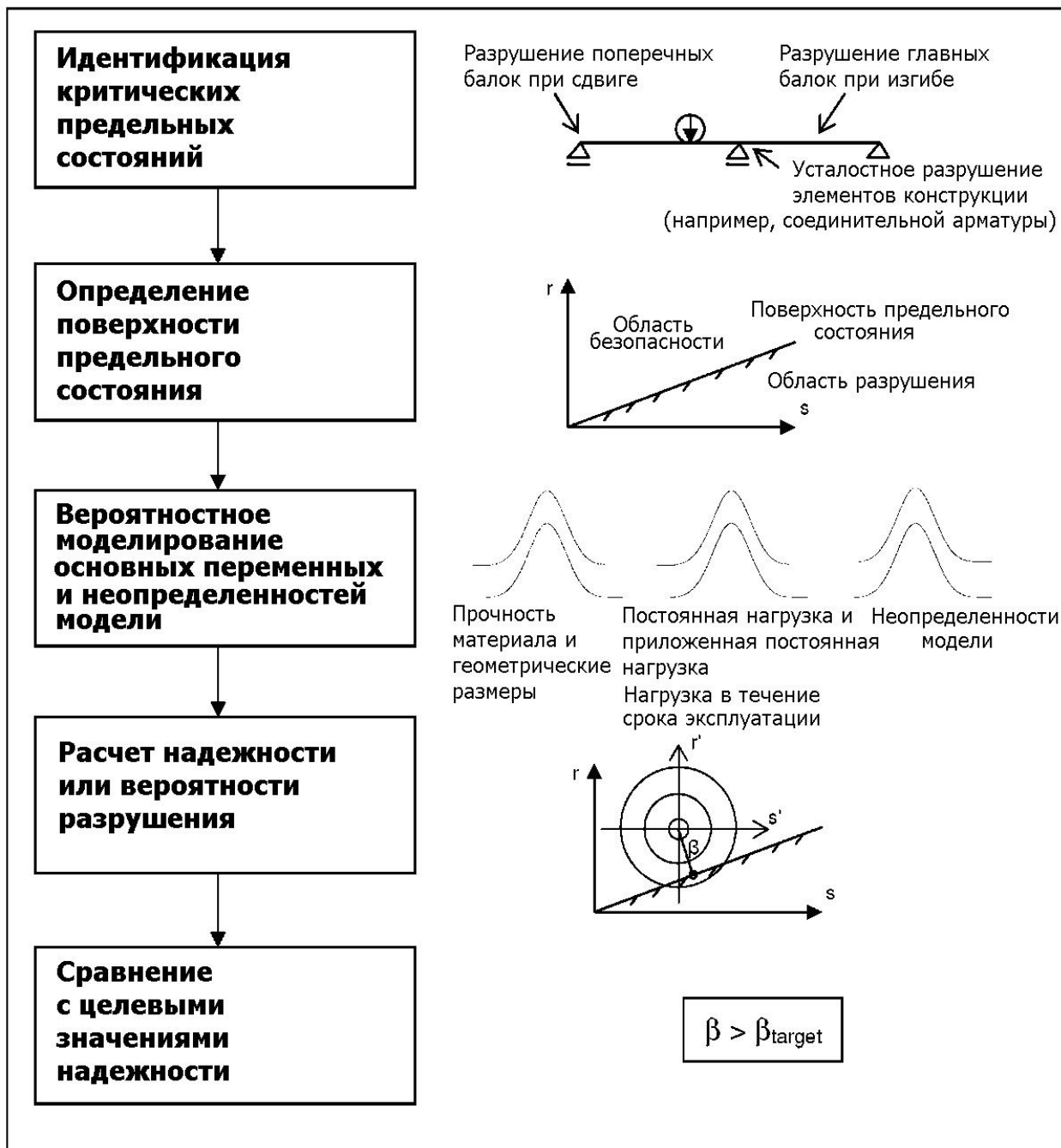
- неотъемлемая случайная изменчивость или неопределенность, подразделяемая на 2 типа: неопределенность, которая может и не может быть подвергнута деятельности человека;
- неопределенность как следствие недостаточных знаний, подразделяемая на 2 типа: неопределенность, которая может и не может быть уменьшена в ходе исследовательской деятельности;
- статистическая неопределенность.

Крайне важно, чтобы инженер, производящий оценку осознал, что выявленная надежность конструкции или равнозначная вероятность разрушения являются условными показателями, а не абсолютной мерой безопасности и эксплуатационной пригодности. Не следует это понимать как величину частоты разрушений, которую можно ожидать в ходе эксплуатации. Напротив, вычисленную вероятность разрушения следует использовать для сравнения с критериями допустимости для оценки уровня безопасности и эксплуатационной пригодности.

В данной главе представлен ряд методов оценки на основе расчета надежности конструкции. Подробная информация приведена в пп. [6], [9-11].

#### **4.3.1 Принципы оценки на основе вероятностного подхода**

Общий метод оценки на основе вероятностного подхода может быть продемонстрирован при помощи следующей схемы (рис. 6):



**Рис. 6. Метод оценки на основе вероятностного подхода**

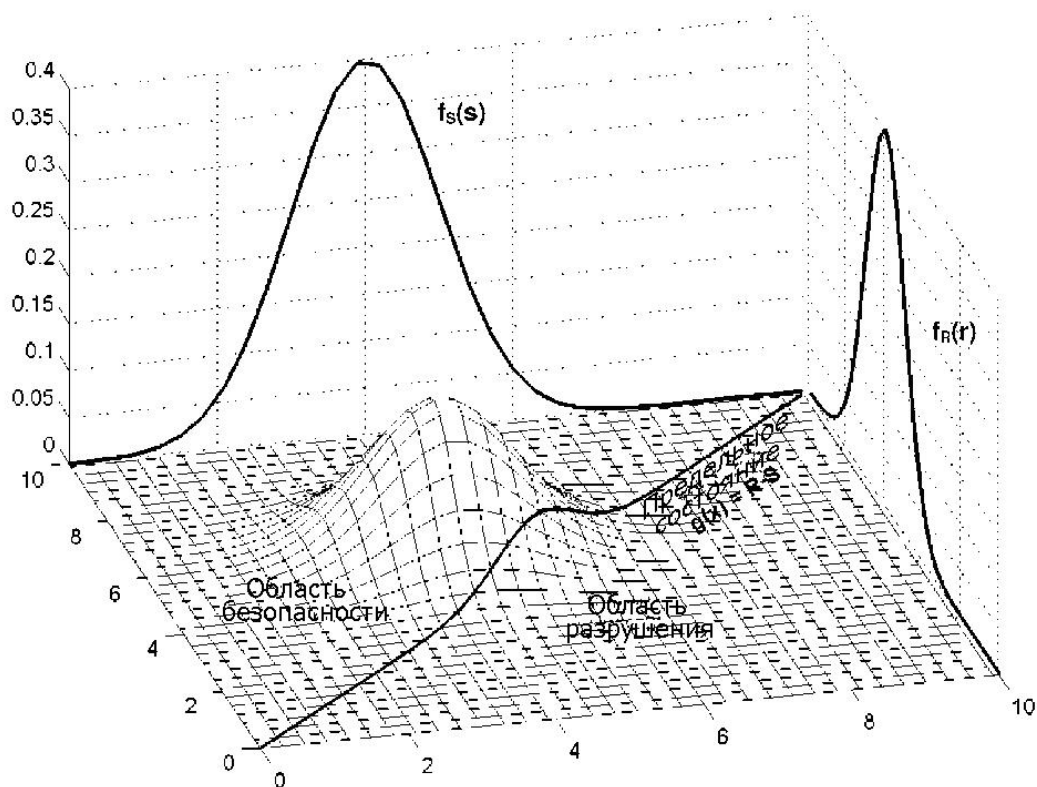
На начальном этапе работы, предшествующем самому процессу оценки, при помощи традиционного детерминированного метода расчета должно быть сформулировано понятие критических отказов конструкции. Информация о местоположении и степени износа или механического повреждения может быть получена в ходе проведения проверок и мониторинга. С помощью расчета чувствительности можно определить является ли устойчивым заключение об установленных критических отказах, вследствие вариаций в данных и моделировании.

Поверхность критического предельного состояния (или поверхность разрушения) может быть описана при помощи уравнения предельного состояния в  $n$ - мерном пространстве основной переменной:

$$g(x) = 0$$

где  $x$  – это вектор числа  $n$  основных переменных. Он описывает функциональную связь всех основных переменных в пределах одного типа отказа и делит пространство основных переменных на область безопасности  $g(x) > 0$  и область разрушения:  $g(x) < 0$  (Рис. 7).





**Рис. 7. Схематическое изображение функций плотности распределения вероятности основных переменных R и S, совместных функций плотности распределения вероятностей и предельного состояния  $g(x)=R-S=0$  [14].**

Все основные переменные в интервале значений, соответствующих критическому предельному состоянию, относящиеся к нагрузке, прочности и моделированию, предполагающие наличие неопределенности, моделируются в виде стохастических переменных с соответствующими статистическими распределениями, согласно информации о переменных, представленной в нормативных документах, включая строительные нормы, а также полученных в ходе проведения проверок, испытаний и мониторинга. Особенно удобно таким образом моделировать временные нагрузки от веса людей, в зависимости от рассматриваемого сооружения, в котором статистическое распределение нагрузки сильно зависит от назначения здания.

В общем случае, вероятность разрушения  $P_f$  определяется предельным состоянием  $g(x) < 0$ :

$$P_f = P(g(x) < 0)$$

Для расчета параметра  $P_f$  разработано несколько методов (см. Приложение В):

- точные аналитические методы;
- метод численного интегрирования;
- приближенные аналитические методы;
- методы моделирования.

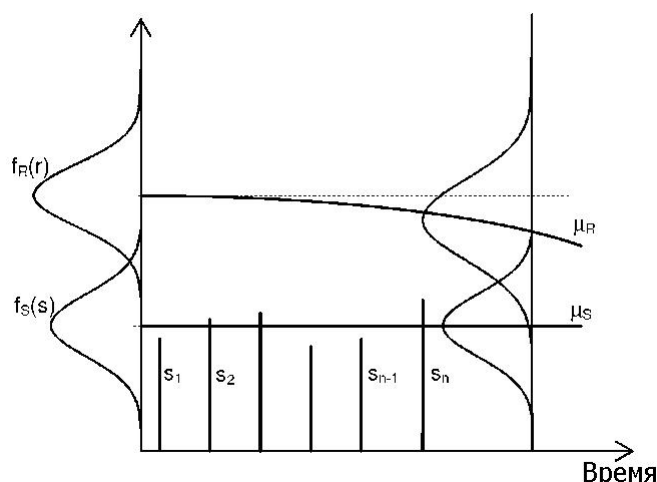
Соотношение между вероятностью разрушения  $P_f$  и индексом надежности  $\beta$  может быть описано при помощи следующего выражения:

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f)$$

На заключительном этапе полученное значение конструктивной надежности сравнивается со значениями, предписываемыми требованиями обеспечения безопасности, которые представляют собой целевые значения вероятности разрушения или показателя надежности.

#### **4.3.2 Оценка надежности, изменяющаяся со временем**

Временная нагрузка и прочность конструкции изменяются со временем, особенно если сооружение подвергается прогрессирующим процессам износа, как в случае воздействия окружающей среды или химического воздействия, или пульсирующей нагрузки. Поэтому в расчете надежности необходимо учитывать изменение со временем базисных переменных, описывающих нагрузку и/или прочность как процессы.



**Рис. 8. Схематическое изображение процессов нагружения и снижения прочности [2]**

В случае изменяющихся со временем случайных переменных (т.е. случайных процессов) функция предельного состояния должна рассматриваться с учетом времени:

$$g(x(t)) < 0 \text{ для } t \in [0, T]$$

где  $[0, T]$  обозначает базисный период времени, который может являться сроком эксплуатации сооружения или другим представляющим интерес периодом времени.

В этом случае вероятность разрушения может быть описана следующим образом:

$$P_f(t) = P(g(x(t)) < 0)$$

Данную величину называют «вероятностью первого достижения», поскольку она определяет «пересечение» предельного состояния в первый раз в течение базисного периода времени  $[0, T]$ . В зависимости от поставленной задачи может быть выбран тот или иной из нескольких существующих методов определения вероятности разрушения в определенные моменты времени, с учетом временной зависимости воздействия на грузки и/или прочности (см., например, [6]):

- метод в реальном масштабе времени, при котором рассматривается общий срок эксплуатации сооружения;
- дискретный метод, при котором рассматриваются более короткие промежутки времени (например, периоды воздействия ураганного ветра).

Кроме того, задачи, меняющиеся со временем, могут быть также преобразованы в неизменные задачи, в которых, например, процесс нагрузки заменяется случайной переменной со средним значением, равным ее ожидаемому максимальному значению для выбранного базисного периода времени. Этот метод может применяться в случае разрушения конструкции при перегрузке и общем отказе (например, в случае усталости, коррозии).

#### **4.3.3 Использование дополнительной информации**

Знания, полученные при сборе дополнительной информации о существующей конструкции или ее элементах, могут использоваться для уточнения результатов любой предшествующей («априорной») оценки надежности данной конструкции или ее элемента [6].

Дополнительная информация о конструктивной надежности и нагрузках может быть получена при выполнении проверки или испытаний на месте расположения объекта, при осуществлении мониторинга, проведении испытаний проверочной нагрузкой, а также из наблюдений, показавших удовлетворительное функционирование сооружения в прошлом.

С учетом дополнительной информации уточненное значение вероятности разрушения  $P_f$  может быть описано при помощи теоремы Байеса. В Приложении D представлено несколько широко используемых методов уточнения значения вероятности разрушения.

В целом, существует два дополнительных метода уточнения значений:

- рассмотрение отдельных конструктивных свойств с учетом новой информации, полученной при проведении проверок, испытаний (например, испытаний прочности материала, проверки конструктивных размеров, жесткости, несущей способности и т.д.);
- рассмотрение эксплуатационных характеристик целых сооружений или отдельных конструктивных элементов с учетом новой информации, полученной при проведении испытаний нагрузки, а также данных об удовлетворительном функционировании сооружения в прошлом.

##### **4.3.3.1 Дополнительная информация из освидетельствований, испытаний и мониторинга**

Целью проведения проверок, испытаний и мониторинга является получение новых данных об отдельных параметрах, оказывающих влияние на функционирование конструкции, и уточнение функций распределения параметров Байесовским методом, а также корректировка имеющегося значения вероятности разрушения при помощи уточненных распределений.

##### **4.3.3.2 Дополнительная информация из испытаний проверочной нагрузкой**

Испытания проверочной нагрузкой, как правило, используются для верификации значения прочности существующей конструкции или ее элементов. Результаты испытаний проверочной нагрузкой могут быть рас-

считаны с помощью вероятностного метода. В случае если сооружение выдерживает известную проверочную нагрузку функция распределения, описывающая прочность конструкции, может быть усечена на отрезке, описывающем известное значение нагрузки, как показано на рис. 9 [12].

#### 4.3.3.3 Дополнительная информация, полученная из данных о рабочей нагрузке

Успешное функционирование конструкции в течение периода эксплуатации  $T$  означает, что значение прочности конструкции превосходит значение воздействия максимальной нагрузки в течение данного периода времени. Функция распределения прочности конструкции в период времени  $T$  может уточняться исходя из данных об успешном испытании используемого сооружения, и, при отсутствии повреждений, и по многим показателям является лучше нового сооружения. Этот подход не учитывает износ, но может применяться по отношению ко многим сооружениям на раннем этапе эксплуатации и в течение назначенного срока эксплуатации (т.е. когда процесс износа контролируется или степень износа еще не является значительной). Значению рабочей нагрузки зачастую присуща неопределенность, но на основе данных о текущей нагрузке или нагрузке в прошлом, полученных при выполнении проверки или мониторинга, можно оценить дисперсию нагрузки [12].



**Рис. 9. Воздействие проверочной нагрузки на распределение прочности конструкции**

#### 4.3.4 Надежность конструктивных систем

Как правило, конструкция как система представляет собой более чем один элемент, для которого характерен один тип отказа. Следует изучить поведение конструкции, поскольку отказ систем, как правило, является наиболее серьезным последствием разрушения конструкции. Поэтому, при первичном возникновении отказа одного из элементов конструкции имеет смысл выполнить оценку вероятности отказа системы. Особенно необходимо определить характеристики системы на предмет ее устойчивости к разрушению или способности к сохранению целостности с точки зрения возникновения случайных событий. Поэтому, можно выполнить оценку системы, для того, чтобы определить степень избыточности, состояние и сложность конструкции (множественные отказы) [1].

Необходимо создать модель реального сооружения при помощи аналогичной системы таким образом, чтобы рассматривались все типы отказа. Фундаментальными системами являются системы с последовательным и параллельным соединением элементов. На практике, как правило, встречаются системы смешанного типа.

##### Системы с последовательным соединением элементов:

В системе с последовательным соединением элементов отдельные элементы соединяются последовательно, в соответствии с их функциональным назначением. Отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (модель «слабейшего звена»). Статистически определяемые системы являются системами с последовательным соединением элементов. Если элементы являются непрочными, отказ системы происходит из-за разрушения элемента; при пластичности элементов отказ системы происходит по причине чрезмерной пластической деформации. Вероятность отказа может быть рассчитана при помощи сочетания предельных состояний всех элементов системы.

##### Системы с параллельным соединением элементов:

В системе с параллельным соединением элементов элементы соединяются параллельным образом относительно их функции. Отказ системы происходит только в случае отказа всех ее элементов. Статистически неопределимые системы являются системами с параллельным соединением элементов из-за их избыточности, если элементы достаточно пластичны. В случае если система включает в себя непрочные элементы, которые не находятся в идеальном состоянии, может произойти отказ системы по аналогии с отказом системы с после-

довательным соединением элементов. Вероятность отказа может быть рассчитана при помощи «пересечения» предельных состояний всех элементов системы.

#### **4.3.5 Характеристики надежности отдельно взятой конструкции**

Во избежание излишнего усиления конструкции вследствие чрезмерно консервативной оценки, необходимо обеспечить надлежащий уровень надежности в соответствии с особенностями конструкции для всех рассматриваемых предельных состояний. Целевая надежность рассматривается как контрольный параметр, основанный на оптимизации.

Значения целевой надежности зависят от типа рассматриваемого предельного состояния (критическое, состояние усталости, эксплуатационной пригодности) и базового периода времени. Параметры, влияющие на целевую надежность, включают: изменение нагрузки во времени, последствия разрушения, запас прочности и избыточности, а также предупреждение о разрушении, полученные в ходе освидетельствования и мониторинга. Более подробно см. п. 3.2.2.

Рекомендуемые значения целевой надежности для оценки существующих конструкций даны в Приложении В.

#### **4.4 Особые случаи оценки**

##### Оценка на основе норм проектирования, использовавшихся в прошлом

При выполнении оценки старых зданий или конструктивных деталей, возможно, будет необходимо обратиться к нормам проектирования, использовавшимся ранее. Результаты оценки должны приниматься безоговорочно. Напротив, их следует повторно проанализировать, с использованием современных методов и актуальных данных [4].

##### Оценка, основанная на данных об удовлетворительном функционировании конструкции в прошлом

Конструкции, спроектированные и построенные на основе ранее действовавших норм, или спроектированные и построенные в соответствии с правильными методами строительства без применения нормативных документов, могут рассматриваться как безопасные конструкции, способные противостоять нагрузкам, кроме чрезвычайных нагрузок (включая землетрясения) в соответствии со стандартом ISO 13822, при выполнении следующих условий:

- тщательное освидетельствование не выявляет признаков значительных повреждений, аварийности или износа;
- проведен обзор конструктивной системы, включая исследование критических деталей и их проверку на передачу напряжения;
- заранее прогнозируемый износ с учетом текущего состояния и планового технического обслуживания обеспечит достаточную долговечность;
- на протяжении длительного периода времени не наблюдалось никаких изменений, которые могут усилить воздействия на конструкцию или повлиять на ее долговечность, и такие изменения не предвидятся.

Такие конструкции могут также рассматриваться как пригодные к эксплуатации в будущем согласно стандарту ISO 13822 при выполнении следующих условий:

- тщательное освидетельствование не выявляет признаков значительных повреждений, аварийности, износа или деформации;
- наблюдается допустимое функционирование конструкции на протяжении достаточно длительного периода времени в случае возникновения повреждений, аварий, износа, деформаций или вибраций;
- в конструкции или ее целевом назначении предвидятся изменения, которые могут существенно изменить воздействия, включая воздействия окружающей среды, на конструкцию или ее элементы;
- заранее прогнозируемый износ с учетом текущего состояния и планового технического обслуживания обеспечит достаточную долговечность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 2394 "General principles on reliability for structures", 1998
2. ISO 13822 "Bases for design of structures - Assessment of existing structures", 2001
3. BRIME - Bridge Management in Europe, Deliverable D1 "Review of current procedures for assessing load carrying capacity"
4. BRIME - Bridge Management in Europe, Deliverable D6 "Experimental assessment methods and use of reliability techniques"
5. BRIME - Bridge Management in Europe, Deliverable D10 "Guidelines for assessing load carrying capacity", 2001
6. Melchers, R.E. "Structural Reliability; Analysis and Prediction", John Wiley & Sons, 1999
7. Das, P.C. "Safety of Bridges", Tomas Telford, 1997
8. Schneider, J. "Introduction to Safety and Reliability of Structures", IABSE, 1997
9. Frangopol D. M., Maute K. "Life-cycle reliability based optimisation of civil and aerospace structures", Computers & Structures 81, 2002
10. "SARA - Structural Analysis and Reliability Assessment - State of Knowledge", Technical Background, Publication Nr. 56 of Universitat fur Bodenkultur Wien, Institut fur Konstruktiven Ingenieurbau, 2003
11. Enevoldsen I., Jensen, F. "Safety-based Bridge Maintenance Management", [http://smart.ramboll.dk/smart\\_eu/publications/](http://smart.ramboll.dk/smart_eu/publications/)
12. Val D.V., Stewart M.G., "Safety Factors for Assessment of Existing Structures"
13. Holicky M. "Advanced Methods of Structural Assessment", 6th International workshop on material properties and design, present and future of health monitoring , Bauhaus University, 2002
14. Graubner C. A., Six M. "Reliability of slim columns under pressure - Analysis of non-linear verification concepts" (in German), Massivbau 2002, TU-Munchen, 2002
15. SAFERELNET - Safety and Reliability of Industrial Products, Systems and Structures, Framework Document on "Assessment and Life Extension of Existing Structures and Industrial Plants", Final Report, 2006

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРА

Оценка существующих конструкций может классифицироваться согласно процедурам с возрастающей сложностью. В таблице А-1 представлена структура трех основных категорий. Нужно подчеркнуть, что необязательно строго следовать порядку действий в пределах одной группы методов. Также нет необходимости в применении методов одинаковой сложности.

Классы оценки	Задачи	Методика		
<b>НЕФОРМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА</b> (Уровень 0)	оценка качественного состояния	Визуальный осмотр Калибровка, основанная на практическом опыте		
<b>ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ</b> (Уровень 1)	количественная проверка и оценка эксплуатационной пригодности	Определение воздействий нагрузки		Проверка
		Измерение эксплуатационных характеристик в условиях рабочей нагрузки		Сравнение с предельными значениями
<b>ОЦЕНКА, ОСНОВАННАЯ НА МОДЕЛИ</b>	количественная оценка техники безопасности и эксплуатационной пригодности	Определение воздействий нагрузки		Проверка
		Сбор данных	Расчет конструкции	
		Исследование документации Проверки	Базовые модели конструкций	Детерминированная (допустимая нагрузка) – только исключительно –
		Мониторинг воздействий статической нагрузки и повреждений (деформаций, напряжений, трещин, коррозии и т.д.) Мониторинг непостоянной нагрузки и воздействий окружающей среды	Утонченные модели (расчет методом конечных элементов, нелинейный расчет)	Полувероятностная (частный коэффициент надежности)
		Испытание и измерение свойств и размеров материалов	Адаптивные конечноэлементные модели	Вероятностные методы приближения (методы надежности первого и второго порядка (FORM, SORM))
Мониторинг воздействий динамической нагрузки и повреждений (частота собственных колебаний, форма колебаний)	Вероятностные конечноэлементные модели	Вероятностные методы моделирования (метод Монте-Карло (MCS), метод латинского гиперкуба (LHC))		

Таблица А.1: Классификация и структура процесса оценки

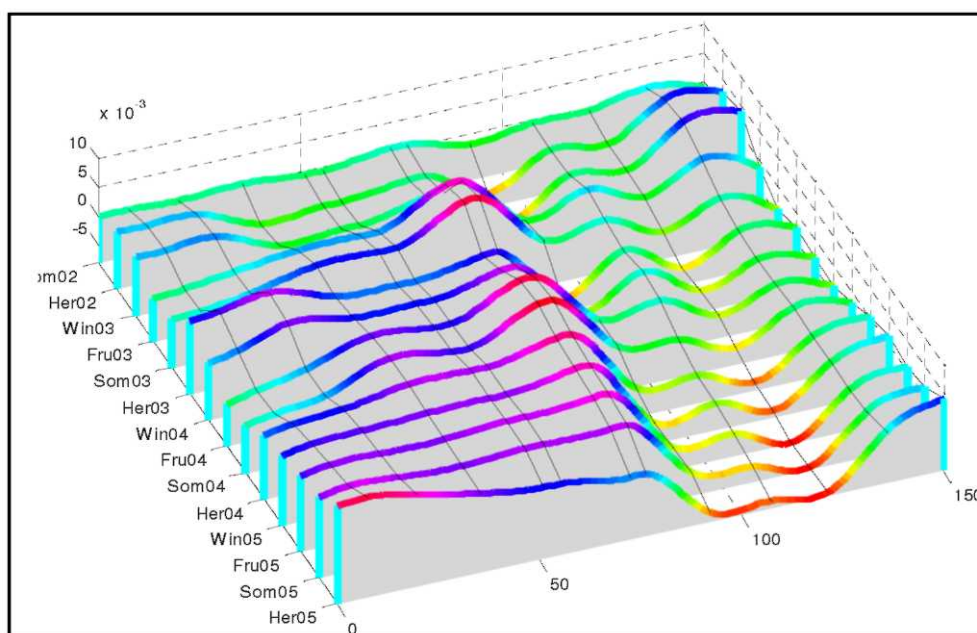
## А.1 Краткий обзор уровней оценки

### А.1.1 Уровень 1: Оценка, на основе измерений

<b>ЗАДАЧИ</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>– Контроль над функционированием сооружения за определенный период времени</li><li>– Контроль над соблюдением значений эксплуатационной пригодности и предельных значений усталости (деформации, напряжений, диапазона напряжений)</li><li>– Контроль над переменными нагрузками и воздействиями</li></ul>

<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ НАГРУЗКИ</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>– Измерение рабочих характеристик, таких как деформации, напряжения и динамические характеристики</li></ul>

<b>ПРОВЕРКА НАДЕЖНОСТИ</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>– Сравнение измеренных данных с предельными значениями</li><li>– Анализ тенденций и взаимосвязей с внешними воздействиями</li></ul>



**Рис. А1. Прямая оценка наблюдаемых вертикальных смещений платформы железнодорожного моста во время строительства прилегающего здания вокзала Лертер Банхоф в Берлине**

### А.1.23 Уровень 2: Базовая оценка, основанная на модели

<b>ЗАДАЧИ</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>– Подтверждение безопасности и эксплуатационной пригодности после повреждения вследствие предельной нагрузки или после повреждения вследствие износа</li><li>– Определение безопасности и эксплуатационной пригодности при изменении условий эксплуатации</li></ul>

<b>СБОР ДАННЫХ</b>
--------------------

- Данные нагрузки и прочности, полученные из проектных документов и норм
- Проверки

### РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ

- Методы и модели, используемые в процессе проектирования
- Утонченные модели

### ПРОВЕРКА НАДЕЖНОСТИ

- Детерминированная
- Полувероятностная

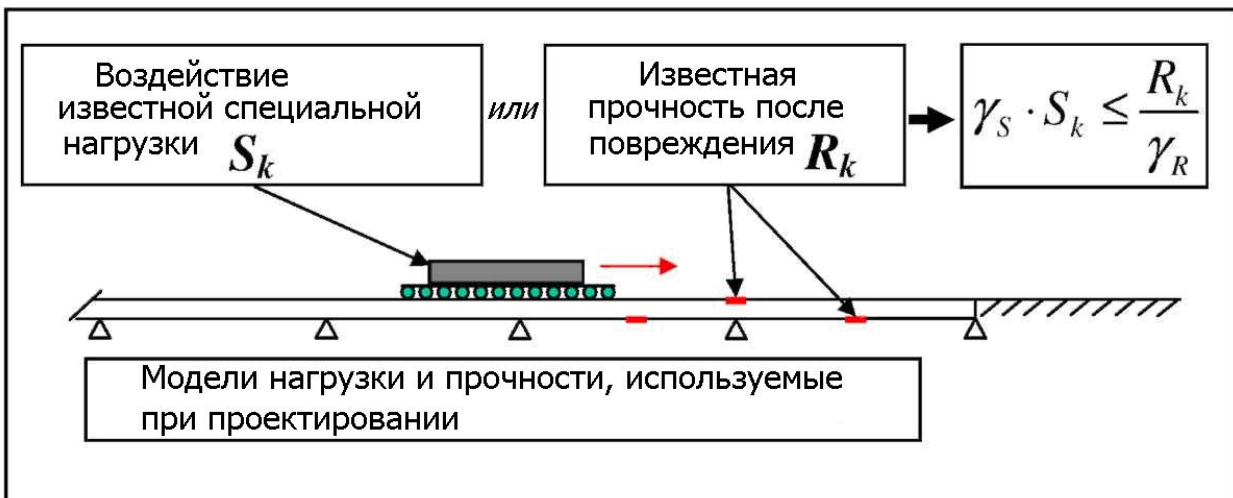


Рис. А2. Упрощенный пример для оценки уровня 2

#### А.1.3 уровень 3: оценка на основе модернизированной модели

### ЗАДАЧИ

- Определение допустимой нагрузки и остаточного срока службы поврежденных сооружений

### СБОР ДАННЫХ

- Исследование свойств и размеров материалов (неразрушающие испытания)
- Идентификация систем на основе мониторинга
- Мониторинг нагрузки
- Испытания проверочной нагрузкой

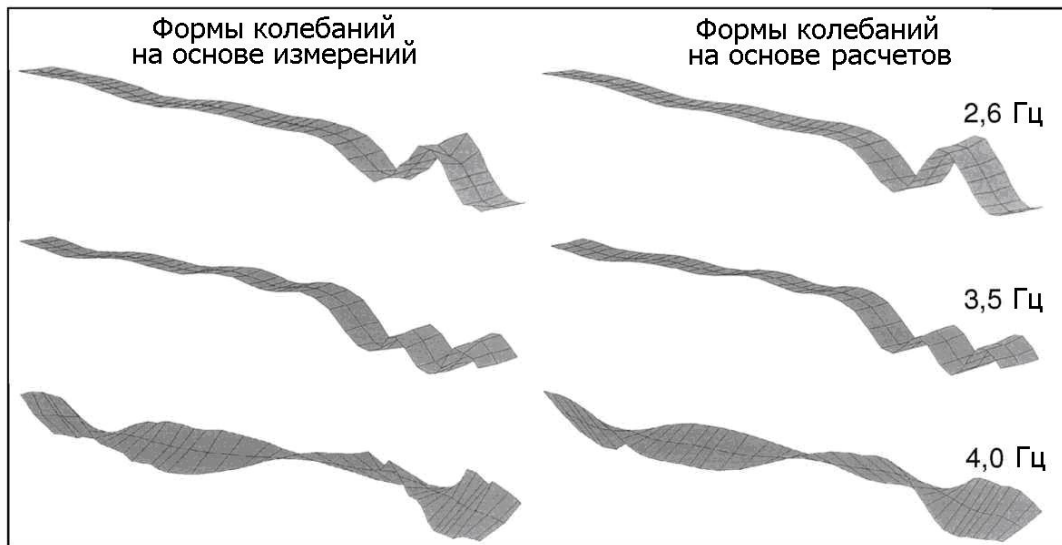
### РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ

- Утонченные методы и модели (расчет методом конечных элементов, нелинейный расчет)
- Адаптивные модели

### ПРОВЕРКА НАДЕЖНОСТИ



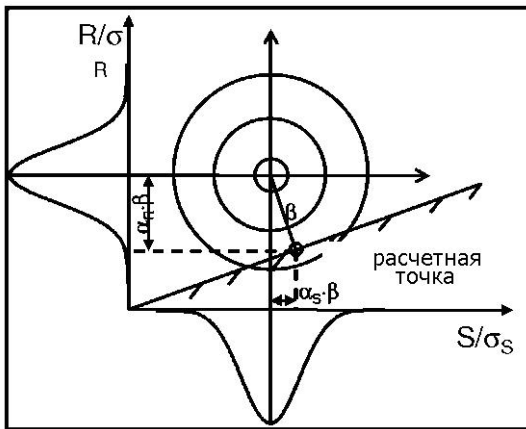
- Полувероятностная



**Рис. А3. Идентификация систем и усовершенствование модели на платформе западного моста в Берлине**

#### **А.1.4 Уровень 4: Оценка с измененными значениями целевой надежности**

<b>ЗАДАЧИ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Применение целевого уровня безопасности в зависимости от последствий разрушения конструкции, которое в свою очередь зависит от назначения конструкции, избыточности и характера разрушения.</li> </ul>
<b>СБОР ДАННЫХ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Исследование свойств и размеров материала (неразрушающие испытания)</li> <li>– Идентификация системы на основе мониторинга</li> <li>– Мониторинг нагрузки</li> <li>– Испытания проверочной нагрузкой</li> </ul>
<b>РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Утонченные методы и модели (расчет методом конечных элементов, нелинейный расчет)</li> <li>– Адаптивные модели</li> </ul>
<b>ПРОВЕРКА НАДЕЖНОСТИ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Полувероятностная</li> </ul>



$$\gamma_S = \frac{S_d}{S_k} = \frac{1 + \beta \cdot \alpha_S \cdot v_S}{1 + k_S \cdot v_S}$$

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d} = \frac{1 - k_R \cdot v_R}{1 - \beta \cdot \alpha_R \cdot v_R}$$

**Рис. А4. Изображение показателя безопасности  $\beta$  в нормированном пространстве и описание частных коэффициентов надежности как функции  $\beta$  для нормально распределенных значений**

#### А.1.26 Уровень 26: Полная вероятностная оценка

##### ЗАДАЧИ

- Определение допустимой нагрузки и остаточного срока службы поврежденных сооружений с учетом существующих неопределенностей

##### СБОР ДАННЫХ

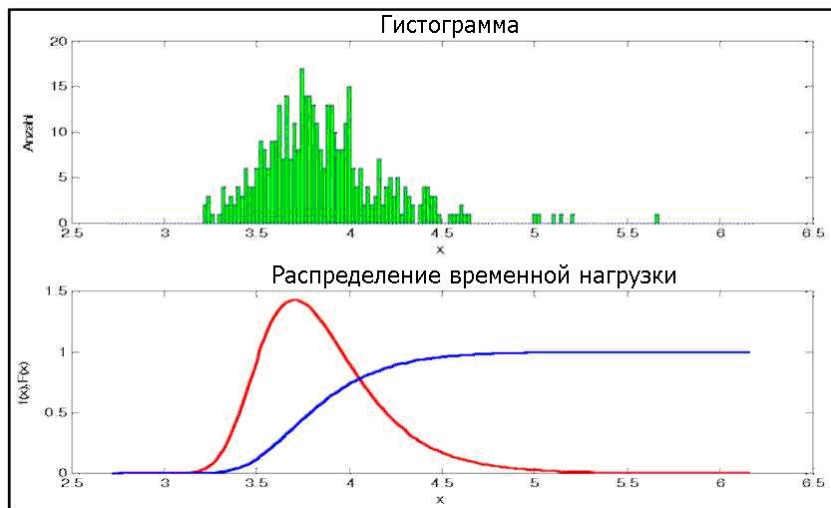
- Исследование свойств и размеров материала (неразрушающие испытания)
- Идентификация системы на основе мониторинга
- Мониторинг нагрузки
- Испытания проверочной нагрузкой
- Статистическая характеристика данных

##### РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ

- Простые модели и методы
- Модернизированные модели и методы

##### ПРОВЕРКА НАДЕЖНОСТИ

- Вероятностные методы приближения (методы надежности первого и второго порядка (FORM, SORM))
- Методы моделирования (метод Монте-Карло (MCS))



**Рис. А5. Гистограмма и распределение временной нагрузки (моделирование)**

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

В ходе вероятностной проверки необходимо рассчитать интеграл свертки, который принимает следующий вид:

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx$$

где  $f_x(x)$  – функция плотности совместного распределения числа  $n$  случайных переменных.

Для расчета значения  $P_f$  разработано несколько методов, например, точные аналитические методы, методы численного интегрирования, приближенные аналитические методы и методы моделирования или сочетание этих методов. В большинстве случаев значение  $P_f$  нельзя рассчитать при помощи точных аналитических методов и для этого необходимо использовать другие методы, такие как приближенные методы (методы уровня 2) и методы моделирования (методы уровня 3), описание которых представлено в настоящем Приложении.

### В.1 Методы моделирования (методы уровня 3)

Методам моделирования присуща некоторая универсальность, упрощенность подхода и эффективность решения задач, в которых уравнения предельного состояния имеют высокую степень нелинейности. Самым серьезным недостатком метода является необходимость выполнения большого объема вычислений, особенно при необходимости получения результатов высокой степени надежности [9].

#### Моделирование методом Монте-Карло:

При моделировании методом Монте-Карло задают функции плотности распределения вероятностей и связанные с ними статистические параметры, описывающие все переменные, и, затем, для получения конечного результата случайного вектора используется случайная выборка, образуемая генератором случайных чисел. Затем выполняется проверка этого набора значений, которая показывает, находится их реализация в границах области разрушения или области безопасного набора значений. Данная процедура выполняется многократно, и значение вероятности разрушения  $P_f$  определяется напрямую при помощи следующего выражения:

$$P_f = \frac{N_{g(x) \leq 0}}{N}$$

где  $N_{g(x) < 0}$  обозначает долю реализаций, приводящих к разрушению, а  $N$  – общее число реализаций. Поскольку для определения малых вероятностей разрушения требуется большое количество статистических выборок, маловероятно, что данное выражение будет использоваться при практической оценке существующих конструкций [5].

#### Выборка по значимости:

При помощи методов выборки по значимости можно добиться уменьшения числа выборок, требуемых для моделирования на основе вероятностного расчета.

Широко используемые методы выборки по значимости предназначены для перемещения центра выборки из исходного местоположения в гауссовом пространстве в расчетную точку на поверхности предельного состояния (наиболее вероятную точку разрушения). Около половины выборки может быть локализовано в области разрушения. Вероятность разрушения рассчитывается из суммы весовых коэффициентов всех реализаций, для которых наступает разрушение:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W(\tilde{x}_i) g(\tilde{x}_i) \leq 0)$$

где  $N$  – число реализаций,  $x_i$  – реализация для распределения выборки по значимости,  $g(x_i) < 0$  обозначает разрушения для реализации  $i$ , а  $W(x_i)$  – соответствующий весовой коэффициент, который рассчитывается следующим образом:

$$W(\tilde{x}_i) = \frac{\Phi_u(x_i)}{h_v(\tilde{x}_i)}$$

где  $\Phi_u$  – совместная функция плотности распределения вероятностей данного набора  $u$  случайных переменных  $u_j$  в стандартном гауссовом пространстве, а  $h_v$  – используемая функция плотности дискретизации выборки по значимости.

Наиболее прямой формой плотности дискретизации является многомерное распределение Гаусса со стандартным отклонением, равным единице, но другие распределения выборки и другие центры выборки, возможно, могут быть еще более эффективными. По методу адаптивной выборки по значимости центр выборки смещают согласно данным из результатов предыдущей выборки. Этот метод является менее эффективным, чем градиентные методы, но он не требует выполнения преобразования в стандартизированное гауссово пространство. Другими методами, описание которых в настоящем Приложении не представлено, являются метод радиальной выборки по значимости, метод выборки по значимости с использованием ортогональной системы координат, и метод прямой выборки по значимости.

#### Выборка по латинскому гиперкубу

Метод моделирования Монте-Карло, связанный с ограничениями, называется методом выборки по латинскому гиперкубу и является настоятельно рекомендуемым способом моделирования, который позволяет достичь приемлемого уровня точности результатов при выполнении небольшого числа процедур моделирования.

Метод выборки по латинскому гиперкубу представляет собой особый тип моделирования по методу Монте-Карло, при котором используется стратификация (расслоение) данных теоретической оценки вероятности первых двух или трех статистических моментов отклика конструкции. Данный метод требует выполнения относительно небольшого количества процедур моделирования – повторяющиеся расчеты, описывающие отклик конструкции, получаемые при помощи используемой вычислительной модели (десятки или сотни). Применение метода выборки по латинскому гиперкубу для расчета надежности может иметь достаточно широкие рамки, и оно не ограничивается лишь оценкой статистических параметров отклика конструкции [10].

В методе выборки по латинскому гиперкубу диапазон значений от 0 до 1 равномерно делится на число  $N$  непересекающихся интервалов для каждой случайной переменной; где  $N$  – количество случайных чисел, которые должны быть произведены для каждой случайной переменной, т.е. количества циклов моделирования. Кумулятивная функция распределения вероятностей для каждой из случайных переменных делится на число  $N$  равновеликих интервалов ( $N$  = число процедур моделирования). Затем в процессе моделирования используются центроиды или выбранные случайным образом значения в пределах каждого интервала. Это означает, что диапазон функции распределения вероятностей  $\Phi(x_i)$  для каждой переменной  $x$  делится на число  $N$  интервалов равной степени вероятности  $1/N$ . Представляющие параметры переменных выбираются случайным образом на основе случайной перестановки целых чисел  $1, 2, \dots, N$ . Каждый интервал каждой из переменных должен использоваться во время моделирования только один раз. При помощи повторяющихся вычислений значений функции отклика появляется набор переменных отклика, который оценивается при помощи простого статистического анализа. В случае моделирования по приближенному методу Монте-Карло для выполнения такого процесса может потребоваться достаточно много времени, поскольку для получения приемлемых результатов оценки понадобятся тысячи процедур моделирования. При использовании меньшего количества процедур моделирования метод выборки латинского гиперкуба приводит к получению удовлетворительных результатов оценки основных статистических параметров отклика. Это утверждение справедливо только для первого и второго статистических моментов, но для третьего момента (асимметрии) также могут быть получены достаточно хорошие результаты [10].

## В.2 Методы приближения (методы уровня 2)

Поскольку для использования методов уровня 3 может потребоваться слишком большое количество времени в случае сложных механизмов разрушения с большим количеством случайных переменных, при помощи методов уровня 2 можно попытаться быстро получить достоверные приближенные значения.

Наиболее известными подобными методами являются методы оценки надежности первого и второго порядка (FORM и SORM).

Первым этапом является преобразование задачи в стандартное гауссово пространство. Это означает, что все исходные переменные преобразовываются в набор независимых нормальных случайных переменных со средним значением равным нулю и стандартным отклонением равным единице.

В стандартизованном пространстве ближайшая точка от исходной точки до преобразованной поверхности предельного состояния  $g_u(u) \leq 0$  называется расчетной, а расстояние от расчетной точки до исходной обозначают как индекс надежности  $\beta$ . Главной задачей является нахождение расчетной точки при помощи использования соответствующего алгоритма поиска. Например, она может быть определена методом последовательных приближений.

Аппроксимация поверхности предельного состояния в расчетной точке может выполняться линейным методом (метод приближения FORM) или методом членов второго порядка (SORM). По методу FORM поверхность разрушения  $g_u(u) \leq 0$  аппроксимируется касательной гиперплоскостью в расчетной точке. Вероятность разрушения в таком случае аппроксимируется следующим образом:

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

где  $\Phi$  – вероятностная функция стандартной нормальной переменной. По методу SORM поверхность разрушения аппроксимируется гиперпараболоидом, который пересекает расчетную точку и характеризуется такой же кривизной.

Вероятность разрушения описывается следующим образом:

$$P_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^n (1 - \kappa_i \beta)^{-1/2}$$

где  $\kappa$  – различные индивидуальные значения кривизны в расчетной точке.

## ПРИЛОЖЕНИЕ С. ЦЕЛЕВЫЕ УРОВНИ НАДЕЖНОСТИ

Требуемый уровень функционирования сооружения, целевой уровень надежности в критическом предельном состоянии, а также в состоянии усталости и предельном состоянии эксплуатационной пригодности составляет целевую вероятность разрушения и целевой показатель надежности.

Остаточный срок службы, определяемый в ходе оценки, рассматривается как базисный период эксплуатационной пригодности и усталости для существующей конструкции, в то время как общий расчетный срок службы часто рассматривается как базисный период для нового сооружения. В случае критического предельного состояния может применяться более короткий базовый период. Показатели целевой надежности могут быть выбраны в соответствии с действующими нормами, если таковые доступны, в противном случае в качестве иллюстраций для оценки существующих конструкций будут использоваться значения, представленные в таблице С.1 [2].

Предельные состояния	$\beta$	Базисный период
<b>Эксплуатационная пригодность</b>		
Обратимая	0,0	Остаточный срок службы
Необратимая	1,5	Остаточный срок службы
<b>Усталость конструкции</b>		
Подлежит освидетельствованию	2,3	Остаточный срок службы
Не подлежит освидетельствованию	3,1	Остаточный срок службы
<b>Критические</b>		
Крайне низкий уровень последствий разрушения	2,3	Расчетный срок службы (например, 50 лет)
Низкий уровень последствий разрушения	3,1	Расчетный срок службы (например, 50 лет)
Средний уровень последствий разрушения	3,8	Расчетный срок службы (например, 50 лет)
Высокий уровень последствий разрушения	4,3	Расчетный срок службы (например, 50 лет)

**Таблица С.1: Показатели целевой надежности для оценки существующих конструкций (ISO 13822)**

Данные числовые значения были получены с допущением логнормальных моделей или моделей Вейбулла для прочности, гауссовых моделей для постоянных нагрузок и моделей предельного значения Гумбеля для динамических нагрузок. Важно отметить, что такие же (или близкие) допущения используются в случаях, когда значения, представленные в таблице С.1, применяются для вероятностных расчетов [1].

Отношение между показателем надежности  $\beta$  и вероятностью разрушения  $P_f$  определяется так  $\beta = \Phi^{-1}(P_f)$  и представлено в таблице С.2.

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1,3	2,3	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2

**Таблица С.2: Соотношение  $\beta$  и  $P_f$**

В заключение, следует подчеркнуть, что значение  $\beta$  и соответствующая вероятность разрушения являются формальными или условными числовыми значениями, преимущественно выступающими в качестве основы для разработки согласованных норм проектирования, нежели для характеристики частоты разрушения конструкции.

## ПРИЛОЖЕНИЕ D. МЕТОДЫ УТОЧНЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Методы уточнения могут использоваться для получения уточненных значений вероятности разрушения или характеристик и репрезентативных значений основных переменных, которые должны применяться в ходе оценки при использовании методов, использующих частные коэффициенты, или для непосредственного сравнения эффектов воздействия с предельными величинами (трещины, смещения).

### D.1 Оценка вероятностных показателей

Учитывая результаты исследования необходимо уточнить данные о свойствах и показатели надежности сооружения. Можно выделить два следующих метода:

1. Прямое уточнение значений вероятности разрушения конструкции.
2. Уточнение частного или многомерного распределения вероятностей.

#### D.1.1 Прямое уточнение значений вероятности разрушения

Прямое уточнение показателей надежности конструкции формально может быть выполнено при помощи теоремы Байеса:

$$P_f'' = P(F|I) = \frac{P(F \cap I)}{P(I)} \quad (D.1)$$

где:

- F – местное или общее разрушение конструкции;
- I – данные, собранные при проведении исследования;
- $\cap$  – пересечение двух событий;
- I – «при условии, что».

Функция предельного состояния представлена  $g(x)$ , где  $x$  является вектором основных переменных, и разрушение F описано неравенством  $g(x) < 0$ . Если результат исследования I является событием, описанным неравенством  $H > 0$ , тогда уточненное значение вероятности разрушения может быть записано следующим образом:

$$P_f'' = P(g(x) < 0 | H > 0) = \frac{P(g(x) < 0 \cap H > 0)}{P(H > 0)} \quad (D.2)$$

#### D.1.2 Уточнение параметров распределения вероятности

Метод уточнения частных или многомерных распределений вероятности формально представлен следующим выражением:

$$f_x = (X|I) = C \cdot P(I|x) \cdot f_x(X) \quad (D.3)$$

где:

$f_x = (X|I)$  является уточненной функцией плотности распределения вероятностей параметра X после уточнения данными I;

X – основная переменная или статистический параметр;  $f_x = (X)$  – априорная функция плотности распределения вероятностей параметра x;

$P(I|x)$  – т.н. функция правдоподобия (вероятность нахождения информации I для заданного значения x параметра X), которая также может быть записана как  $L(x|I)$ ;

C – нормализующий коэффициент.

После получения уточненного распределения основных переменных  $f_x = (X|I)$  при помощи вероятностной оценки с использованием общих методов определения конструктивной надежности новых сооружений может быть определено уточненное значение вероятности разрушения  $P(F|I)$ :

$$P(F|I) = \int_{g(x) \leq 0} f_x(X|I) dx \quad (D.4)$$

### D.2 Оценка характеристических и расчетных значений

Практическим методом обработки новой информации о нагрузке и прочности, полученной при проверках, испытаниях проверочной нагрузкой или мониторинге технического состояния конструкции, является уточнение характеристических или расчетных значений. Для уточнения переменных, описывающих прочность, могут использоваться два общих метода [1]:

1. Оценка на основе уточненных распределений вероятности.
2. Непосредственная оценка результатов испытания.

#### D.2.1 Оценка на основе уточненных распределений вероятности

После уточнения распределения вероятности рассматриваемой основной переменной согласно п. D.1.2, характеристические и расчетные значения могут быть определены следующим образом (ISO 13822):

Характеристические значения:

Для переменных, описывающих параметры прочности и распределенных по нормальному закону, значение может быть определено следующим образом:

$$x_k = \mu - k\sigma \quad (D.5)$$

и для переменных, описывающих параметры прочности и распределенных по логарифмически нормальному закону, значение может быть определено следующим образом:

$$x_k = \mu \cdot \exp(-k\sigma - 0,5k\sigma^2) \quad (D.6)$$

где:

$x_k$  – уточненное характеристическое значение;

$\mu$  – уточненное среднее значение;

$\sigma$  – уточненное значение стандартного отклонения;

$k$  – коэффициент, как правило, равный 1,64.

Расчетные значения:

Расчетное значение может быть определено следующим образом:

а) при помощи частного коэффициента надежности  $y_M$  :

$$X_d = x_k / y_M \quad (D.7)$$

или

б) при помощи значения целевой надежности  $\beta$ :

$$X_d = \mu - \alpha\beta\sigma \quad (\text{для случайной переменной, распределенной по нормальному закону}) \quad (D.8)$$

$X_d = \mu \cdot \exp(-\alpha\beta\sigma - 0,5\alpha\beta\sigma^2)$  (для случайной переменной, распределенной по логарифмически нормальному закону) (D.9)

где:

$x_d$  – уточненное расчетное значение;

$\alpha$  – вероятностный коэффициент влияния, как правило, равный 0,8 для доминирующего параметра прочности, и  $0,8 \cdot 0,4 = 0,32$  для других параметров прочности;

$\sigma$  – величина выборочного стандартного отклонения.

Возможно, следует рассмотреть оба метода и использовать значения с наибольшим запасом. Данный подход можно использовать по отношению к нагрузкам и геомеханическим свойствам, но, как правило, более подходящими являются другие типы распределения.

## D.2.2 Непосредственная оценка результатов испытания

Уровень прочности конструктивного элемента или прочности материала может быть определен напрямую, исходя из данных испытаний и связанных с ними результатов проверки безопасности, выполняемой на основе метода частных коэффициентов; характеристические или расчетные значения могут быть получены при помощи двух методов:

1. Классического метода;
2. Байесовского метода.

### D.2.2.1 Классический метод получения характеристических и расчетных значений

Характеристическое значение  $x_k$  определяется по результатам испытаний, принимая во внимание доверительный уровень, равный не менее 0,75. В отсутствие другой информации характеристическое значение принимается равным 0,05 квантиля нормального распределения.

Для переменных, описывающих параметры прочности и распределенных по нормальному закону, значение может быть определено по следующему выражению:

$$x_k = m - ks \quad (D.10)$$

$x_k$  – уточненное характеристическое значение;

$m$  – выборочное среднее значение,

$s$  – величина выборочного стандартного отклонения.

$k$  – коэффициент, зависящий от объема выборки, доверительного уровня, величины вероятности (квантили) и наличия или отсутствия данных о величине априорного стандартного отклонения (следует использовать значения  $k$  из таблицы D1 или стандарта ISO 12491).

Вероятность $P$	Количество испытаний, $n$								
	3	4	6	8	10	20	30	100	$\infty$
0,10	2,50	2,13	1,86	1,74	1,67	1,53	1,47	1,38	1,28
0,05	3,15	2,68	2,34	2,19	2,10	1,93	1,87	1,76	1,64
0,01	4,40	3,73	3,24	3,04	2,93	2,70	2,61	2,46	2,33

**Таблица D1. Значения  $k$  для нормального распределения, при неизвестной величине  $\sigma$  и для доверительного уровня, равного 0,75**



Вероятность $P$	Количество испытаний, $n$								
	3	4	6	8	10	20	30	100	$\infty$
0,10	1,67	1,62	1,56	1,52	1,50	1,43	1,40	1,35	1,28
0,05	2,03	1,98	1,92	1,88	1,86	1,79	1,77	1,71	1,64
0,01	2,72	2,66	2,60	2,56	2,54	2,48	2,45	2,39	2,33

**Таблица D2. Значения  $k$  для нормального распределения, при известной величине  $\sigma$  и для доверительного уровня, равного 0,75**

**D.2.2.2 Байесовский метод**

Согласно Байесовскому методу, характеристическое значение может быть установлено для нормально распределенных параметров прочности непосредственно из данных испытаний.

$$x_k = m - t_{vd} \cdot s \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} \quad (D.11)$$

где:

$n$  – количество выборок;

$m$  – среднее значение;

$s$  – стандартное отклонение;

$t_{vd}$  – коэффициент распределения Стьюдента, значение которого зависит от формы распределения, вероятности возникновения события и наличия или отсутствия априорного стандартного отклонения (следует использовать значения  $t_{vd}$  из таблицы D3).

Вероятность $\Phi(-\beta)$	Степени свободы, $v = n - 1$								
	1	2	3	5	7	10	20	30	$\infty$
0,10	3,08	1,89	1,64	1,48	1,42	1,37	1,33	1,31	1,28
0,05	6,31	2,92	2,35	2,02	1,89	1,81	1,72	1,70	1,64
0,01	31,8	6,97	4,54	3,37	3,00	2,76	2,53	2,46	2,33
0,005	63,7	9,93	5,84	4,03	2,50	3,17	2,84	2,75	2,58
0,001	318	22,33	10,21	5,89	4,78	4,14	3,55	3,38	3,09

**Таблица D3. Значения  $t_v$**

В случае, если значение  $\sigma$  известно (например, в результате ранее выполненных испытаний), то  $v = \infty$  и  $s$  должны заменяться на  $\sigma$ .

**Пример 1 [13]:**

В качестве примера рассмотрим следующие показатели: прочность бетона  $n = 6$ , среднее значение размеров  $m = 37,5$  Н/мм<sup>2</sup> и стандартное отклонение  $s = 4,7$  Н/мм<sup>2</sup>, которые должны использоваться для определения характеристического значения прочности бетона  $f_{ck} = x_k$  с  $p = 0,005$ . При отсутствии априорной информации  $n' = v' = 0$  значения уточненной характеристики  $m'', n'', s'', v''$  равны значениям выборочной характеристики  $m, n, s, v$ . Прогнозируемое значение параметра  $x_k$  может быть определено по следующему выражению (D.11):

$$x_k = 37,5 - 2,02 \cdot 4,7 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{1}{6}\right)} = 27,5 \text{ Н / мм}^2$$

где: значение  $t_p = 2,02$  взято из таблицы D.3 для  $p = 0,05$  и  $v = n - 1 = 6 - 1 = 5$ .

Использование априорной информации:

В случае, если имеется априорная информация о значениях основных переменных (например, полученная в ходе ранее выполненной серии испытаний) априорное (нормальное) распределение может быть представлено следующим образом:

$$f'(\mu, \sigma) = k \sigma^{-(v'+\delta\{n'\}+1)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(v'(s)^2 + n'(\mu - m')^2\right)\right) \quad (D.12)$$

где:

$$\delta(n') = 0 \text{ для } n' = 0 \quad (D.13)$$

$$\delta(n') = 1 \text{ для } n' > 0 \quad (D.14)$$

$$E(\sigma) = s' \quad (D.15)$$

$$V(\sigma) = 1\sqrt{2v'} \quad (D.16)$$

$$E(\mu) = m' \quad (D.17)$$

$$V(\mu) = s' / (m' \sqrt{n'}) \quad (D.18)$$

Уравнение (D.11) для определения характеристического значения тогда принимает следующий вид:

$$x_k = m'' - t_{v''} \cdot s'' \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n''}\right)} \quad (D.19)$$

с

$$n'' = n' + n \quad (D.20)$$

$$v'' = v' + v + \delta(n') \quad (D.21)$$

$$n'' m'' = n' m' + n m \quad (D.22)$$

$$\left[ v'' (s'')^2 + n'' (m'')^2 \right] = \left[ v' (s')^2 + n' (m')^2 \right] \left[ v s^2 + n m^2 \right] \quad (D.23)$$

**Пример 2 [13]:**

Рассмотрим еще раз пример 1, но при условии, что ранее выполненная серия испытаний показала, что:

$$m' = 40,1 \text{ H / мм}^2, \quad V(m') = 0,5, \quad s' = 4,4 \text{ H / мм}^2 \quad \text{и} \quad V(s) = 0,28$$

Из уравнений (D.16) и (D.18) следует, что:

$$n' = \left( \frac{4,4}{40,1} \frac{1}{0,5} \right) < 1 \quad v' = \left( \frac{1}{2} \frac{1}{0,28} \right) \approx 6$$

Поэтому, считается что  $n' = 0$  и  $v = 6$ . Учитывая, что  $t v = n - 1 = 5$ ,

уравнение (D.20) приводит к  $n'' = 6$ ;

уравнение (D.21) – к  $v'' = 11$ ;

уравнение (D.22) – к  $m'' = 37,5 \text{ H / мм}^2$ ;

уравнение (D.23) – к  $11(s'')^2 + 6(37,5)^2 = 6(4,4)^2 + 0(40,1)^2 + 5(4,7)^2 + 6(37,5)^2$

$$\rightarrow s'' = 4,5 \text{ H / мм}^2$$

В конечном итоге, из уравнения (D.19) следует, что:

$$x_k = 37,5 - 1,80 \cdot 4,5 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{6}\right)} = 28,8 \text{ H / мм}^2$$

В приведенном выше примере результирующее значение прочности бетона выше (приблизительно на 5%), чем значение, полученное методом прогнозирования без использования априорной информации. Таким образом, в случае доступности априорной информации, при помощи Байесовского метода можно определить квантиль с большей точностью, особенно в случае большой дисперсии рассматриваемой переменной. Однако, происхождение априорной информации всегда должно подвергаться тщательной проверке для подтверждения идентичности полученных ранее данных и результатов наблюдений [13].