

**Проект SAMCO
Итоговый отчет 2006**

**F08b
РУКОВОДСТВО ПО
МОНИТОРИНГУ
СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ**

Русский перевод

SAMCO Final Report 2006

F08b Guideline for
Structural Health Monitoring

ООО «Грачёв и Партнёры»

Переводчики:

Патрушева Н.А.

Сермягина Н.Б.

Слепушкин В.А.

Топорков А.С.

Редактор:

Грачёв В.Ю.

Перевод от 15.05.2013

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

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Цели и содержание руководства	4
3 Расчет воздействий	4
3.1 Классификация воздействий	4
3.2 Задачи и подход к анализу воздействий	5
3.3 Определение воздействий с точки зрения их величины, продолжительности и локального эффекта.....	6
4 Диагностика конструкций.....	9
4.1 Введение.....	9
4.2 Анализ состояния конструкции.....	10
4.3 Мониторинг конструкций.....	14
4.4 Числовой расчет	19
5 Определение повреждений	20
5.1 Цели и методики определения повреждений	20
5.2 Определение повреждения	20
5.3 Классификация и механизмы повреждений.....	20
5.4 Принципы определения повреждений.....	21
5.5 Переменные и критерии определения повреждений	21
5.6 Определение признаков повреждения посредством измерений	24
5.7 Оценка повреждений с точки зрения характеристики состояния конструкции	24
5.8 Оценка повреждений с использованием пороговых значений.....	24
6 Квалификация специалистов по проведению испытаний.....	25
7 Список литературы.....	25
Приложение А. Классификация датчиков, их использование и полученный опыт	26
Приложение В. Определение нагрузки от транспортных средств на мостах.....	28
Приложение С. Мониторинг состояния объектов культурного наследия.....	32
Приложение D. Определение локальных повреждений и их воздействие на конструкции	35
Приложение Е. Определение повреждений стального моста по динамическим параметрам	38

1 ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы обеспечить безопасность и надежность гражданских сооружений необходимо выполнять постоянную оценку состояния конструкций в течение всего срока эксплуатации сооружений в сочетании с мероприятиями по их техническому обслуживанию. В ходе оценки должна учитываться фактическая нагрузка, а также состояние конструкции. Наиболее важной предпосылкой для оценки является наличие текущей информации.

Кроме используемых методов визуального освидетельствования за последние 20 лет были разработаны экспериментальные методики, при помощи которых можно получить обширную информацию. Эти методики используют вычислительный анализ, выполняемый при помощи определенных измерений, связанных с фактическим нагружением и ожидаемой продолжительностью срока эксплуатации. Была продемонстрирована практическая пригодность этих методик для многих приложений. Развитие сенсорных технологий, наряду с приложениями, использующими информационные технологии и анализ данных, внесли свой вклад в разработку этих методик. Таким образом, инженеры-строители получают доступ к комплексным инструментам, при помощи которых в течение всего срока эксплуатации конструкции можно получать подробную информацию. Жизненный цикл конструкции начинается с этапа строительства, затем следует этап эксплуатации, применения специфических мер по техническому обслуживанию конструкции, и, заключительным этапом является ее снос.

2 ЦЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ РУКОВОДСТВА

Целью настоящего Руководства является представление информации о существующих методиках и технологиях, а также рекомендаций по их применению, описание которых систематизировано в соответствии со степенью необходимости получения подробной информации для выполнения конструктивной оценки.

Внимание сосредоточено на описании систематического подхода к диагностике зданий, начинающейся с изучения существующей документации и вплоть до применения технологии измерений. Таким образом, представлены различные зарекомендовавшие себя методы оценки состояния конструкции и осуществления мониторинга. Представлены примеры использования этих методик, а также мнения относительно их применения.

Второй важной предпосылкой для оценки является полный анализ всех действий. Выполнение оценки деформации конструкции как основы для диагностики сооружения возможно только при наличии информации о типе, величине и продолжительности нагружения. Вслед за классификацией воздействий, оказываемых на конструкцию, обсуждаются потенциальные возможности мониторинга нагрузки, который может быть различного типа, объема и характера.

К третьему типу рекомендаций относится анализ повреждений конструкции. Данные о повреждениях и их развитии, т.е. изменении размеров и сложности повреждений, позволяют выполнять оценку, выполняемую с точки зрения технического обслуживания конструкции в будущем. Кроме описания повреждений, представлены методики идентификации и оценки повреждений. В настоящем разделе обсуждаются потенциальные возможности, а также трудности, возникающие при использовании данных измерений, связанные с математическими методами анализа повреждений. В приложении к настоящему Руководству приведены практические примеры использования упомянутых выше методик и приемов.

В рамках логически выстроенной концепции представлены новые, но уже применяемые методы получения информации о существующих сооружениях, при помощи которых ответственный инженер может понять, каким образом используются эти методы, и, вместе с коллегами, принять решение об их применении. Имеющиеся в настоящее время методы, а также их усовершенствованные в будущем версии могут внести важный вклад в осуществление действий по техническому обслуживанию зданий, ориентированных на обеспечение экономичности и безопасности.

3 РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЙ

3.1 Классификация воздействий

3.1.1 Тип воздействий

Воздействия заключаются в нагрузках и деформациях, зависящих от типа конструкции и характера ее использования, и являются результатом взаимодействия конструкции со средой. Воздействия являются причиной создания напряжений в материалах и, следовательно, образования деформаций в элементах конструкции. При проектировании учитывается максимальное количество вероятных воздействий. Случаи экстремального воздействия рассматриваются в ходе оценки риска и могут затем учитываться в процессе проектирования. Предположения, сделанные о масштабе, направлении и продолжительности воздействий в процессе проектирования, основываются на прогнозах и ранее полученных данных. Поэтому, они не всегда соответствуют реально оказываемым на конструкцию воздействиям.

Воздействия на конструкцию могут быть подразделены на следующие классы: механические воздействия, термические и физико-химические воздействия. Эти воздействия выражаются во влиянии внешних нагрузок или возникновении внутренних процессов, например, коррозии. Внешние воздействия различаются в соответствии с причиной их возникновения в процессе взаимодействия конструкции со средой, техническими услови-

ями и характером использования конструкции. Как правило, воздействия варьируются во времени и пространстве, и, следовательно, поддаются лишь статистическим прогнозам и описаниям.

Воздействия могут привести к возникновению воздействий статической и динамической нагрузки. Статические эффекты не являются причиной пренебрежимо малых объемных сил. Динамические эффекты создаются не только вследствие быстрых изменений нагрузки, но также по причине внезапных изменений конструкции (повреждений).

Описание наиболее важных эффектов, приводящих к деформации конструкции, распределенных в соответствии с причиной их возникновения, представлено в следующем ниже разделе.

3.1.1.1 Статические нагрузки

- Нагрузки, зависящие от типа конструкции

Собственный вес конструкции, а также ее элементов и инженерного оборудования, опорные реакции, предварительное напряжение, изменения опоры, усадка, ползучесть, нагрузки от строительных материалов и оборудования, связи.

- Нагрузки, зависящие от характера использования конструкции

Нагрузка от транспортных средств и объема перевозок, строительный материал, нагрузка силовых, нагрузка кранов, нагрузка от трубопровода.

- Естественные нагрузки от воздействия факторов окружающей среды

Землетрясение и давление горных пород, статическое давление текучей среды, давление в водопроводе, давление грунтовых вод, поровое давление воды, нагрузка от снега и льда, ветровая нагрузка, осадка подстилающего слоя, термическая нагрузка, влажность, коррозия, карбонизация.

3.1.1.2 Динамические нагрузки

- Нагрузки, зависящие от характера использования конструкции

Нагрузки от воздействия транспортных средств, нагрузка машин, сила торможения и центробежная сила, нагрузки, создаваемые людьми.

- Нагрузки от воздействия естественной среды

Нагрузки от воздействия ветра, волн, землетрясений, лавин, воды.

- Нагрузки от воздействия технических условий

Нагрузки от воздействия вибрации, при столкновениях (транспортные средства, самолеты, судна), нагрузки при взрывах.

3.1.2 Характер воздействий

Что касается регистрации данных, вычислительных операций с использованием данных и моделирования нагрузок, то воздействия, характерные для постоянной и временной нагрузок, различаются.

3.1.2.1 Постоянные нагрузки

Постоянные нагрузки – это стационарные воздействия, которые медленно изменяются по отношению к собственному среднему значению (например, собственный вес, усадка колонн, предварительное напряжение, давление грунта, коррозия).

3.1.2.2 Временные нагрузки

Воздействия, которые носят временный характер, и изменение во времени и пространстве которых является постоянным и частым, при условии, что их характер и масштаб относится к данной категории. Это относится ко многим воздействиям, возникающим в процессе эксплуатации конструкций, а также при воздействии ветра, температуры, снега и др.

3.1.3 Нагрузки и воздействия нагрузок

С точки зрения распределения во времени и пространстве воздействия представляют собой стохастические величины. Отсюда следует необходимость описания характера и степени нагрузок при помощи соответствующих статистических моделей и характеристик.

Во многих случаях непосредственный интерес представляет степень воздействия нагрузки S , а не нагрузка L . Связь между S и L определяется поверхностью влияния I :

$$S_j(A, t) = \int_A I_j \cdot L dA$$

в то время как A является характеристикой зоны контакта между нагрузкой и поверхностью.

Зачастую, нагрузка L представляет интерес только в том случае, если имеет значение воздействие локальной нагрузки (примеры нагрузки L – бициклические нагрузки на непосредственно используемые элементы, такие, как ортотропные пластинки или давление ветра на небольшие элементы фасада). Примером для параметра S являются компоненты динамической нагрузки, оказываемой транспортными средствами на мост.

3.2 Задачи и подход к анализу воздействий

Точные знания о воздействующих нагрузках составляют основу для приближенной к реальности оценки несущей способности конструкции. В дальнейшем, их точное определение позволяет образовывать реальные модели нагрузок, которые затем могут использоваться для реальных показаний усталостной прочности и остаточного срока службы элементов конструкции, находящихся под угрозой разрушения. Наконец, это позволяет сформировать административные структуры для ограничения временных нагрузок.

Задача определения внешних воздействий (наблюдения за нагрузками) заключается в последовательном сборе данных о нагрузках, воздействующих на конструкцию. Выполнение этой задачи требует знания поведения системы конструкции, поскольку данные могут быть получены путем исследования моделей конструкции или с помощью экспериментальных методов. Реакции или рассчитанные нагрузки могут затем использоваться для следующих задач:

- Основанное на измерениях постоянное наблюдение за нагрузкой от транспортных средств (например, плотностью интенсивности движения и весом транспортных средств); данные исследования могут также использоваться для проверки существующих моделей нагрузки или для разработки альтернативных моделей нагрузки.
- Статистические данные долговременной тенденции увеличения или снижения нагрузок от транспортных средств.
- Определение совокупностей нагрузок и динамических коэффициентов путем считывания показаний о действующих нагрузках в зависимости от типа, местоположения, амплитуды, продолжительности и частоты. Таким образом, учитываются ветровые и температурные воздействия. Такие качественные модели нагрузок также допускают показания усталостной прочности и остаточного срока службы слабых элементов конструкции.
- Уточнение моделей нагрузок, которые в процессе проектирования могли оцениваться только приблизительно (например, динамические ветровые нагрузки на фиксирующие тросы, подвесной кронштейн или ветровые связи мостов).
- Выводы о воздействиях факторов окружающей среды, таких как аэродинамические колебания, температурные воздействия и динамическая нагрузка.
- Планирование особых действий по снижению воздействий нагрузки путем изменения нагрузки или прочности конструкции.

Нагрузки, как правило, могут быть определены только косвенно с помощью моделей конструкции и моделей воздействия нагрузки. Измерительные параметры приведены в основной информации раздела 2.3. Часто интерес представляет не столько абсолютный объем воздействий, сколько их изменение со временем или в пространстве в связи с мониторингом состояния или мониторингом деформации. Это относится, в частности, к анализу повреждений. Причинно-следственные связи повреждений на основе данных мониторинга, часто могут быть установлены только благодаря дополнительным данным об одновременных воздействиях.

3.3 Определение воздействий с точки зрения их величины, продолжительности и локального эффекта

3.3.1 Измеряемые величины для определения воздействий

Измеряемые величины для определения воздействий нагрузки устанавливаются в соответствии с физическими условиями, в которых подобные воздействия имеют место, а также в соответствии с принятой моделью нагрузки, которая может быть адаптирована для целей проектирования конструкций или выполнения оценки.

Параметрами, характеризующими постоянную/ статическую нагрузку, являются, например, распределения собственной массы. Объемы и пространственное распределение конструктивных и не относящихся к конструкции элементов и постоянные нагрузки должны быть обязательно установлены, возможно, в рамках расчета конструкции, в соответствии с п.3.2. Пространственный разброс значений удельного веса строительного материала может быть определен при проведении испытаний материала. Колебания удельного веса устанавливаются при мониторинге параметров влияния (например, проникновения влаги) или характеризующих величин (уплотнения грунта и угла внутреннего трения грунтовых пород).

Для определения нагрузок на горизонтальные поверхности и боковые стены (нагрузка силосов, давление грунта и горных пород, и т.д.) используются широко известные модели давления грунта. Давление используется в качестве основной измеряемой величины.

Величина усилия предварительного напряжения в конструкциях с внешним преднапряжением, мачтах с растяжками и пилонах подвесных мостов может определяться лишь косвенно, посредством измерения силы натяжения тросов моста, с помощью данных о динамических свойствах (собственная частота).

Исходным условием для определения тепловых воздействий является информация о распределении измененных температур в конструкции. Величину воздействий нагрузки можно определить при помощи перекрестного распределения температуры и статистически соответствующей модели. В случае статистически неопределимых конструкций для прогнозирования поведения конструкции с точки зрения качества и количества необходима механическая модель.

Реакции связей как результат вынужденных смещений, обусловленных осадкой фундамента или изменениями состояния опор, как правило, являются результатом одновременно постоянной и переменной нагрузки. Для оценки реакции связей необходимо метрологическое исследование соответствующего смещения.

Воздух или вода, проходящие через конструкции, приводят к возникновению сил сопротивления и, следовательно, сил реакции конструкции. Величина таких нагрузок пропорциональна кинетической энергии движущихся сред и поверхности течения. Для определения этих нагрузок, обусловленных воздействием ветра, волн, которые могут привести к статическим и динамическим эффектам, необходимо посредством измерений получить распределение скорости потока.

Переменные нагрузки могут быть причиной возникновения воздействий статических и динамических нагрузок. Как правило, нагрузки от транспортных средств имеют статическую и динамическую составляющие, а их воздействие на конструкцию может быть измерено с помощью установленного соотношения. Как правило, сопутствующими измеренными величинами являются деформации (деформации, смещения) в конструкции в качестве шкалы сравнения или сравнительных величин. Кроме того, важна информация о транспортном потоке с указанием скорости и расстояния между транспортными средствами.

Вибрации, нагрузки при столкновениях, взрывах и стихийных бедствиях приводят к воздействиям динамической нагрузки, которые по величине и динамическим свойствам соотносятся с нагрузками, а также конструкцией. Измеряемыми величинами таких процессов являются вибрационная скорость и ускорение. Эти па-

раметры описывают объемную силу и/или деформации, что равным образом относится ко всем другим динамическим нагрузкам.

3.3.2 Определение воздействий

3.3.2.1 Структура мониторинга

Воздействия должны быть определены при помощи выполнения измерений в соответствии с их величиной и частотой возникновения, а также их распределением во времени и пространстве и характерными особенностями. Необходимое измерительное оборудование для проведения мониторинга нагрузки выбирается в соответствии с поставленной задачей.

Различают следующие типы мониторинга: непрерывный, циклический, мониторинг событий и нагрузки. Подробную информацию можно получить при проведении непрерывного мониторинга. Регистрируются все воздействия, и их распределение во времени. Если требуются данные только о превышении нагрузки, может использоваться метод пассивного мониторинга, при выполнении которого активируются запускающие сигналы, основанные на пороговых значениях. Для мониторинга медленно изменяющихся величин, таких как статическая нагрузка, зачастую достаточно выполнения краткого мониторинга через равные промежутки времени. Мониторинг событий также может использоваться в случаях, когда пассивный мониторинг определяется величинами, не зависящими от нагрузки.

Для определения максимальных деформаций подобные методы могут использоваться для сочетаний нагрузок (раздел 2.3.3).

3.3.2.2 Ветровые нагрузки

Важной прикладной областью на практике является мониторинг состояния конструкций, которые легко поддаются воздействию ветровых нагрузок вследствие особенностей своих системных характеристик. К таким конструкциям относятся пилоны, башни, дымовые трубы, краны и мосты с большими пролетами. Процессы, приводящие к активизации конструкции, могут иметь разную природу. Описание этих процессов представлено ниже.

- В сооружениях с повышенной степенью гибкости и пониженными значениями собственных частот при легком демпфировании порывы ветра могут приводить к возбуждению вибраций с большой амплитудой.
- В круглых поперечных сечениях циклические расслоения турбулентностей (по модели турбулентности Кармана) могут создавать в конструкции вибрации с большими значениями амплитуды.
- Аэродинамически нестабильные поперечные сечения, как, например, прямоугольные сечения, могут вызывать прогрессирующие вибрации. Таким же образом, круглые сечения, которые, как правило, не характеризуются прогрессирующими вибрациями, могут утратить аэродинамическую стабильность под влиянием таких внешних факторов, как, например, одностороннее обледенение. Недавние исследования показали, что даже дождевая вода, стекающая по подвесным элементам моста, может явиться причиной быстро прогрессирующих вибраций, которые могут привести к возникновению усталостных явлений в соединениях конструкции.
- Вибрации мостов с поперечным сечением, собственная частота кручения и поперечная реакция которых приблизительно одинаковы, могут возбуждаться в результате создания определенного набора условий.

Сложность процессов возбуждения вибраций и тот факт, что некоторые воздействия возникают только при определенных обстоятельствах, приводят к сложности прогнозирования результатов нагружения на этапе проектирования. При помощи оценки данных измерений, выполняемых на протяжении длительного периода времени, могут быть откалиброваны модели ветровой нагрузки согласно конкретным местам расположения объекта. Эти модели могут затем использоваться в качестве базы для более подробной оценки ожидаемого значения ветровой нагрузки. При этом необходимо одновременно осуществлять мониторинг погодных условий.

3.3.2.3 Нагрузка от волн и зыби

Нагрузки от волн и зыби оказывают воздействие на береговые здания, такие как гавани и морские сооружения. Подобные нагрузки, как правило, не могут быть количественно оценены в процессе выполнения прямых измерений. Они могут быть определены только косвенно, при помощи моделей нагрузки. Кроме геометрических характеристик, включенных в расчет конструктивных элементов, эти модели требуют знания кинематики движущихся частиц воды как арифметических величин. Исходными значениями для таких вычислений являются зависящие от места расположения обследуемого объекта параметры высоты и длины волны. В зависимости от типа конструкции, размера и типа волн, а также глубины водоема могут применяться линейные и нелинейные теории. Что касается воздействий нагрузки на сооружения всегда необходимо рассматривать статические и динамические составляющие.

3.3.2.4 Нагрузка от транспортных средств

Нагрузки на конструкции, оказываемые транспортными средствами, имеют статическую и динамическую составляющие. Нагрузки данного типа имеют место, например, в случае пересечения мостов транспортными средствами или перемещения груза по крановым рельсам. Нагрузки от транспортных средств оказывают местные и общие воздействия на процесс деформации конструктивных элементов (раздел 2.1.3). Они не могут быть измерены напрямую, но должны быть определены посредством вычислений с использованием проверенных моделей нагрузки. Существует множество целей для определения нагрузок от транспортных средств.

Это доказывает необходимость наличия информации о статистических параметрах воздействия транспортного потока, подтверждения реалистичных моделей нагрузки или определения предельных нагрузок.

Действующие нагрузки от транспортных средств, оказываемые на мосты, вычисляются на основе данных о непрерывно измеряемой деформации, наряду с калибровочными функциями, описывающими функционирова-

ние конструкции (например, линия влияния). Линия влияния может быть определена предварительно с использованием максимально допустимой нагрузки или числовых методов. Определенные значения общей нагрузки затем классифицируются в соответствии с весом проходящих транспортных средств на каждой полосе движения и, затем, для каждого класса нагружения вычисляется частота. Задачей в данном случае является получение репрезентативных данных о движении транспортных средств за достаточно длительный период времени.

Динамические нагрузки от транспортных средств определяются аналогичным образом. Необходимо отметить, что эти характеристики имеют составляющую, зависящую от конструкции, поскольку измеряемые динамические деформации являются результатом взаимодействия конструкции и каждого транспортного средства в отдельности. С другой стороны, измеряемые статические деформации имеют свои особенности для каждого отдельно взятого транспортного средства и соотносятся с весом.

Следует учитывать то, что деформации, измеренные в условиях нагрузки от транспортного потока, представляют собой соответствующую полную нагрузку конструкции, например, распределенную статическую нагрузку от всех транспортных средств на мост. Следовательно, для автоматического распознавания нагрузки от отдельных транспортных средств важно скорректировать результаты измерений для различных случаев движения транспорта, т.е. сочетания размещения нагрузки, линий влияния или смоделировать эти нагрузки путем вычислений. Затем может быть использован метод распознавания образов.

Осевые нагрузки и колесные формулы движущихся транспортных средств могут быть исследованы при помощи динамических систем весового контроля. Следует отметить, что на результаты измерения осевой нагрузки подобными методами при реальном движении транспорта накладываются динамические составляющие вследствие вибрации транспортных средств. Подобные результаты могут привести к искажению статистических данных о нагрузке от транспортных средств. Более точным является измерение нагрузки при плотном медленном движении транспортных средств, вплоть до движения с образованием затора при помощи динамических систем весового контроля, поскольку в этом случае определение веса отдельных транспортных средств не может использоваться по отношению к измерениям деформации.

3.3.2.5 Нагружение при смещениях

Подъем и осадка опор в результате изменений реакции грунта, очереди строительства и т.д. приводят к воздействиям нагрузок, которые всегда пропорциональны величине соответствующих деформаций. Эти нагрузки определяются путем вычислений на основе измеренных значений смещений.

3.3.2.6 Весовые нагрузки

Нагрузки от эффективной массы собственного веса, строительного материала, льда и снега определяются по объему и удельному весу. Изменения, которые оказывают эти нагрузки на здание, устанавливаются посредством выполнения измерения изменений объема (например, измерение высоты снега) и/или изменений удельного веса (например, при поглощении влаги). Изменения воздействий нагрузки могут также определяться посредством измерений соответствующих деформаций (прогибов, напряжений, и т.д.).

3.3.2.7 Нагрузки при ударе и столкновении; вибрации

При столкновениях кинетическая энергия заменяется энергией деформации. В исключительных случаях воздействие нагрузки является, главным образом, динамическим и нелинейным. Следовательно, в целом, нагрузка не рассматривается отдельно от отклика конструкции и для ее определения должны использоваться соответствующие модели. Отправной точкой являются модели, описывающие эффект упругопластического воздействия с измеряемыми динамическими величинами.

3.3.2.8 Температурные нагрузки

По сравнению с нагрузками от движения транспортных средств температурные нагрузки могут привести к большей деформации, это зависит от особенностей проектирования конструкции. При нелинейном распределении такие нагрузки вызывают реакцию связей и остаточное напряжение. Они также влекут за собой деформацию и могут привести к необратимым повреждениям (например, трещинам). Как правило, они протекают вместе с другими типами воздействия (п. 2.3.3) и представляют собой сочетание нагрузок. Вместе с динамическими нагрузками температурные нагрузки на бетонные конструкции приводят к повышенной усталостной деформации.

Деформацию, вызванную тепловым расширением, можно вычислить только тогда, когда известно температурное распределение. Таким образом, главной задачей измерения является определение температурных полей и их развития во времени с распределенными датчиками. В рамках исследований температурные поля на поверхностях элементов могут определяться при помощи термографических методик (п. 3.2.4).

Стационарные и переходные температурные поля в зданиях можно определить с помощью вычислительных методик, если известны тепловые параметры материалов и размеры термических границ (внешняя температура, условия излучения и конвекции). Исходные условия для временной прогрессии должны определяться путем измерения.

3.3.2.9 Воздействия, вызванные физико-химическими процессами

Помимо механических величин, существует множество других физических и химических процессов. Коррозия арматуры приводит к раннему износу бетонных конструкций и сокращает срок их службы. Коррозия приводит к сокращению поперечного сечения арматуры, к растрескиванию бетонного покрытия вследствие распространения продуктов коррозии и к потере связи между сталью и бетоном. Основой причиной коррозии железобетонных конструкций являются хлористые загрязнения и карбонизация. Скорость коррозии железобетонных конструкций существенно зависит от воздействий, в частности таких как, влажность бетона, электропроводность бетона, концентрация температуры и кислорода. Откалывание бетона в результате процессов карбонизации ускоряет процесс коррозии в целом. Для измерения этих величин устанавливаются датчики. Интерпретация результатов требует огромного опыта и знаний в данной области.

3.3.3 Комбинации нагрузок

При проектировании конструкций, как правило учитывается эффект комбинации нагрузок. На практике накладываемые компоненты нагрузки возникают из постоянных и переменных нагрузок, особых нагрузок и предварительного напряжения. Нагрузки на местах, как правило, определяются по измеряемым реакциям конструкции (деформации, отклонения, амплитуды колебаний), которые в свою очередь являются следствием воздействий нагрузки, вызванной комбинацией нагрузок. Для того, чтобы выделить один из компонентов нагрузки из данных результатов, нужно знать такие его характеристики как направление, распространение, продолжительность и временная прогрессия, а также другие типичные свойства. Применяя эти знания, посредством методик расчета данных можно выделить отдельные компоненты нагрузки.

Пример: при комбинации нагрузок, вызванных движением транспортных средств, температуры и осадки измеряемая деформация может быть разделена на 5 компонентов: статический и динамический компонент транспортной нагрузки, компонент изменения средней температуры и перепада температуры и компонент осадки. Все эти компоненты имеют характерную долговечность, с помощью которой компоненты отличаются друг от друга. Долговечность частичной нагрузки во временном интервале соответствует типичной частоте в частотном интервале. Если такая частота известна, общее измеряемое отклонение может быть разделено на специальные компоненты, зависящие от нагрузки с помощью функций фильтра, а затем обработано согласно п. 2.3.2.4, п. 2.3.2.5 и п. 2.3.2.8.

3.3.4 Использование и анализ данных измерений

При медленных переменных процессах данные измерений записываются циклически или непрерывно. При записи фиксируются такие статистические параметры как максимальные значения, средние скользящие и вариации; эти данные хранятся вместе с соответствующим временем измерения. Быстрые переменные процессы, например, воздействия нагрузок от движения транспортных средств, ветра, волн и ударов измеряются непрерывно с целью максимальной записи всех процессов. Далее данные должны быть обработаны согласно методикам, соответствующим их содержанию. В том случае, если сначала обрабатываются комбинации нагрузок, то перед этим необходимо провести разделение данных по нагрузкам (п. 2.3.3). Помимо интерпретации с помощью статистических характеристических значений эти данные дополнительно анализируются на предмет динамических характеристик. При этом особый интерес представляет информация о содержании частоты сигналов. В этих методиках преимущественно используются анализ Фурье и волновые преобразования.

Нагрузки от движения транспортных средств, ветровые нагрузки и волновые нагрузки подразделяются по их статистическим и динамическим компонентам и используются для дальнейшего определения статистических значений. После расчета средних и максимальных значений, а также вариаций эти данные используются для определения распределений частоты. При определении ветровых нагрузок происходит обработка специальных значений скорости ветра, основанных на базовых значениях для определенных периодов (например, 10 минут). Интенсивность турбулентности рассчитывается из вариаций этих средних значений и описывается в спектрах плотности мощности. При описании динамических нагрузок от движения транспортных средств максимальные динамические компоненты деформации применяются к одновременно измеряемой статической нагрузке от транспортных средств. Для статистики нагрузок определяются распределения частот, отмеченные в классах нагрузок. Они основаны на конкретном весе транспортных средств.

3.3.5 Модели нагрузок

Модели нагрузок необязательно отражают физическую природу воздействий нагрузок, но также содержат эффект фильтра в более или менее характерной форме, как описано в п. 2.1.3. Модели нагрузок описывают нагрузки таким образом, что их воздействие на конструкцию соответствует воздействию реальной нагрузки. Как правило, максимальное значение такого эквивалентного воздействия выбирается с фиксированной вероятностью и фиксированным периодом повторения.

В нормах проектирования при допущениях нагрузок ([13], [14]) выбранный уровень вероятности привязан к периоду повторения, который ассоциируется с усредненным действительным сроком службы конструкции. В случае, если значения нагрузок уточняются посредством постоянного наблюдения воздействий (мониторинг нагрузок), уровень безопасности также может быть обновлен до актуальных типичных значений соответствующих нагрузок. Кроме этого, следует отметить, что, учитывая п. 2.1.3, воздействие фильтра I_f определяет действительные нагрузки и таким образом воздействия нагрузок. В данном случае следует разрабатывать совместимые модели нагрузок, в зависимости от методов проектирования и строительства, а также в отношении дальнейшего использования данных (например, оценка несущих способностей или остаточный срок службы).

3.3.5.1 Калибровка моделей нагрузок

Калибровка моделей нагрузок должна проводиться с учетом результатов мониторинга нагрузок, как описано в п. 2.3.2. Этот пункт касается статистической базы данных (например, периоды повторения) и расчета нагрузок на основе измеряемых воздействий нагрузок (например, деформаций) и при помощи моделей напряженных конструкций.

4 ДИАГНОСТИКА КОНСТРУКЦИЙ

4.1 Введение

Основная задача данного раздела, включающего подразделы Анализ состояния конструкций, Мониторинг конструкций и Численный анализ, заключается в том, чтобы извлечь исчерпывающую информацию о конструкциях.

На основе собранной и оценочной информации, полученной посредством анализа состояния конструкций, приводятся методы метрологических изысканий, дополняющие и подтверждающие уже имеющуюся информацию. Это относится к процессам, которые используются преимущественно локально, как, например, неразрушающий процесс испытаний. Информация, дающая общую характеристику конструкций, может быть получена с помощью полевых испытаний. Несущая способность и общие свойства конструкции являются поверхностными показателями. Однако, особенностью данной информации заключается в том, что она действительна только на момент времени, когда она была получена.

Значения, изменяющиеся во времени, могут быть измерены с помощью методов мониторинга. Успех данных измерений обеспечивается проведением регулярных изысканий. Методы мониторинга применяются с нерегулярными или регулярными временными интервалами вплоть до наступления непрерывной эксплуатации, что позволяет выявить изменения и получить ограниченные данные прогнозов.

Помимо проведения метрологических изысканий, необходимы результаты вычислений. В настоящее время с помощью арифметических моделей могут быть получены всесторонние и наиболее точные показатели поведения конструкции под любыми воздействиями. Исходное условие для такого рода моделирования заключается в том, чтобы параметры модели применялись к реальности настолько точно, насколько это возможно. Информация для данного процесса может быть получена из результатов метрологических изысканий при проведении анализа состояния конструкций и мониторинга конструкций.

4.2 Анализ состояния конструкции

4.2.1 Описание проекта и конструкции сооружения

Задача данного обзора заключается в установлении размеров и конструктивных свойств сооружения, а также его состояния при подготовке к подробному исследованию конструкции. Полученные результаты служат, кроме прочего, в качестве основы для оценки несущей способности под воздействием текущей нагрузки, для внесения изменений в инженерные системы при увеличенном уровне нагрузки, для текущего ремонта и модернизации конструкции, а также для оценки существующих повреждений под воздействием статической и динамической нагрузки. Задача определения размеров заключается в точной регистрации всех геометрических значений, необходимых для описания конструкции и условий, в которых она находится. Определение размеров начинается с изучения имеющейся проектной документации и должно сопровождаться дополнениями из наиболее приближенных к реальным геометрическим измерениям существующего фонда сооружений. Для элементов конструкции, оценка которых вызывает затруднения, должны использоваться специальные приборы, такие, как лазерная установка или тахеометр. Реальные размеры элементов конструкции, включая размеры их поперечного сечения, должны быть определены с учетом потери материалов вследствие коррозии. Для измерения толщины, помимо традиционных методов, должны использоваться такие методы, как рентгеновский или ультразвуковой метод. Установление свойств конструкции служит для статического и динамического анализа конструкции с учетом всех элементов конструкции и условий, воздействующих на ее несущую способность. На первый план ставится фактическое описание системы и определение условий с учетом следующих аспектов:

- определение несущих и стабилизирующих элементов конструкции
- определение связующих и соединительных элементов и их механических свойств
- техническое описание характеристик конструкции (типа предварительного напряжения, соединений, анкеров и т.п.)
- определение свойств материалов (прочности, распределения массы, амортизирующих свойств, влажности, химических свойств и т.п.)
- техническое описание конструкции и конфигурации среды, в которой она находится (почва, системы заземления, заполняющие составы и т.п.)
- оценка работы несущих элементов и соединений
- техническое описание существующих нагрузок и их пространственно-временное воздействие
- регистрация возможных проблемных точек и отклонений
- техническое описание существующих повреждений и обстоятельств, приводящих к повреждениям.

Для сбора информации доступны следующие методы, приведенные в установленном порядке:

- визуальный осмотр
- неразрушающий метод испытаний
- метод испытаний с незначительными разрушениями
- разрушающий метод испытаний.

4.2.2 Определение пороговых значений устойчивости, эксплуатационной пригодности и несущей способности

Пороговые значения величин, описывающих состояние конструкции, представлены в используемых нормах и руководствах или определены при рассмотрении местных условий. Во втором случае должна быть обеспечена правильность предположений, и, в случае необходимости, ее следует подтверждать через определенные промежутки времени.

Устойчивость положения:

В общем случае, устойчивость положения должна обеспечиваться в границах критического предельного состояния. Далее, в рамках критического предельного состояния должны быть ограничены глобальные изменения положения, происходящие вследствие осадки и опрокидывания фундаментов конструкций. Для специфических типов сооружений, таких как железнодорожные мосты, пороговые значения представлены в нормах.

Как правило, пороговые значения устойчивости положения в условиях критического предельного состояния могут быть определены при помощи моделей конструкции. Пороговые значения устойчивости положения в условиях предельного состояния эксплуатационной пригодности должны определяться с учетом всех граничных условий, влияющих на неограниченное использование сооружения.

Эксплуатационная пригодность:

Предельные значения деформации и вибрации в условиях рабочей нагрузки зачастую представлены в нормах и руководствах. Они в особенности достоверны в случае конструкций, деформации которых, обусловленные воздействием нагрузок, снижают уровень эксплуатационной пригодности сооружений. В противном случае, предельные значения деформаций и динамических характеристик могут быть установлены произвольно. Для того чтобы учесть параметры долговечности и эксплуатационной пригодности конструкции следует использовать предельные значения деформации, напряжения и повреждений, таких как трещины. Соответственно пороговые значения зачастую представлены в строительных нормах, но могут также определяться специалистами.

Несущая способность:

В рамках критического предельного состояния в нормах и руководствах редко представлены значения измеряемых величин, описывающих состояние. Фактически, предельные значения параметров состояния определены, но в рамках критического предельного состояния они не могут использоваться в качестве пороговых значений для мониторинга состояния эксплуатационной пригодности. Параметры состояния, которые косвенно указывают на предельный уровень состояния, могут быть сформулированы при помощи моделей конструкции. Усталостное напряжение является исключением, поскольку в этом случае критическое предельное состояние может быть достигнуто в условиях рабочей нагрузки. В этих случаях величина амплитуд циклического напряжения ограничена из-за зависимости от числа циклов.

4.2.3 Определение конструкции

Определение конструкции позволяет получить наиболее надежный метод описания конструкции для выполнения анализа и принятия решений. Поэтому, принцип определения конструкции служит инженерам-строителям руководством для определения параметров оптимизированной измерительной системы. Посредством этого метода может быть представлено точное и полное описание конструкции для достоверного определения ее работоспособности в рамках критического предельного состояния и предельного состояния эксплуатационной пригодности. Для выполнения систематического определения конструкции необходимо придерживаться следующего порядка действий:

a) Сбор информации и априорное моделирование

Если для определения статической системы это необходимо, то для проверки геометрических величин и характеристических значений строительного материала следует обращаться ко всей документации по проектированию. Недостающие детали должны быть восполнены посредством выполнения измерений, а также неразрушающих испытаний конструкции и образцов. Модель, содержащая исходные данные о конструкции, зачастую является неполной и предварительной и поэтому должна быть доработана.

b) Оценка фактического состояния

Для оценки фактического состояния конструкции, необходимо изучить ее конструктивные особенности, существующую документацию, известные повреждения, результаты визуального освидетельствования, а также результаты неразрушающих и разрушающих испытаний.

c) Оценка актуальной несущей способности

Для текущего назначения здания или намеренного изменения этого назначения необходимо подтвердить несущую способность сооружения, исходя из всей существующей информации и допущения об использовании концепции обеспечения безопасности по нагрузкам и прочности конструкции.

d) Подготовка к экспериментам

При подготовке к проведению полномасштабных испытаний требуется при помощи априорной модели выполнить анализ чувствительности, который позволяет определить оптимальные воздействия и отклик на динамические испытания, а также выбрать приемлемые диапазоны измерений. На основе данных, полученных в ходе аналитических и предварительных исследований, должна быть оптимизирована конфигурация нагрузок для статических испытаний, а также тип, количество и расположение датчиков.

e) Полномасштабные испытания

Из-за недостатка информации о модели конструкции, взаимодействии элементов, влиянии известных повреждений и эффективности мер, направленных на восстановление объекта, следует проводить испытания статической нагрузкой. Для проверки поведения системы в целом и критических процессов, влияющих на моды глобальных колебаний, могут проводиться динамические испытания. Для проведения испытаний на усталость конструкции необходимо иметь данные о ее динамическом поведении.

f) Обработка экспериментальных данных

Обработка данных измерений, полученных при проведении полномасштабного испытания, и приведение этих данных в общепринятую форму представления, является важным этапом на пути к достижению более высокого уровня достоверности информации о конструкции.

g) Калибровка модели

Определяются механические свойства, граничные условия и условия непрерывности модели. Конфигурации модели совпадают с физическим пониманием процессов, получаемым в ходе проведения эксперимента, и рассматриваемым при обработке экспериментальных данных.

h) Применение калиброванных моделей

Откалиброванная в полевых условиях аналитическая модель служит в качестве лучшего средства измерения фактического состояния конструкции. Она может использоваться для оценки несущей способности кон-

струкции, расчете приемлемой нагрузки, оценке внутренних усилий, напряжений и деформаций в условиях эксплуатации.

4.2.4 Применение методов неразрушающих испытаний

Методы неразрушающих испытаний успешно применяются в процессе расчета самой конструкции, а также ее повреждений. Различные задачи по выполнению проверки могут быть решены с минимальными затратами при использовании сочетания упомянутых методов совместной обработки данных. Использование сканеров для контроля поверхности при выполнении неразрушающих испытаний позволяет автоматизировать этот процесс. Кроме того, отчетливо видна тенденция расширенного применения метода распознавания образов и томографических методов.

4.2.4.1 Стальные конструкции

Для обнаружения плоских дефектов (например, трещин) и определения толщины стального профиля конструкции успешно применяется метод высокочастотных ультразвуковых колебаний (как правило, частота составляет 2 и 4 МГц). Таким же образом для определения объемных дефектов (т.е. наличия пор, включения посторонних тел, пустот), а также для обнаружения трещин в соединительных листах ферм в старинных конструкциях используется метод рентгенографии. Для контроля временного и пространственного увеличения трещин в стальных конструкциях используется метод акустической эмиссии. Неразрушающими методами может быть определено не только физическое состояние материала, но и некоторые специфические характеристики материалов. Так, например, искровой эмиссионный спектральный анализ позволяет определить состав стали без взятия образцов.

4.2.4.2 Армированные и предварительно напряженные конструкции

Для армированных и предварительно напряженных конструкций, как правило, используется сочетание множества методов неразрушающих испытаний. В особенности, для обнаружения приповерхностного армирования используются процессы с применением магнитного статического поля и переменного поля, вплоть до максимальной удаленности элемента от поверхности, составляющей приблизительно 12 см. Место размещения арматурного пучка на значительной глубине внутри конструктивного элемента, главным образом, выполняется при помощи радиочастотного локатора. Кроме успешно проведенного исследования методами неразрушающего контроля для локализации разрывов пучка арматуры может быть применен метод остаточной магнитной индукции. Этот метод основан на процессе намагничивания пучка арматуры и последующего измерения напряженности магнитного поля. Показателем наличия разрыва в пучке арматуры является смена полярности. Проверить полученный результат можно, к примеру, посредством минимального вмешательства. При помощи сверла можно создать искусственное отверстие и выполнить эндоскопический осмотр. Альтернативным способом является рентгенографическое исследование рассматриваемого участка пучка арматуры. При осмотре обширного участка арматуры, подверженного коррозии, может использоваться метод потенциальных полей, основанный на электрохимическом принципе.

Для монолитных конструкций используются различные акустические методы. Вследствие рассеивающего эффекта зернистости породы используется ультразвук низкой частоты (как правило, от 50 до 100кГц). Этими методами может быть измерена толщина покрытий и обнаружены дефекты (гнезда зерен гравия, полости и пустоты и др.), а также могут быть исследованы односторонне доступные для осмотра и обслуживания элементы. Ультразвуковые методы могут использоваться для контроля прочности бетона на сжатие. Кроме того, для различных конструкций может применяться метод отклика на акустическое эхо. Этот метод используется для проверки целостности свай, а также определения толщины покрытия оболочек туннелей.

4.2.4.3 Конструкции с каменной и кирпичной кладкой

Использование радиочастотного локатора представляет собой важный метод неразрушающего испытания для случаев разнообразного повреждения каменной или кирпичной кладки. Целью метода является определение строения каменной/кирпичной кладки (толщины, центровки, полостей и пустот, металлических анкеров и др.), а также определение влажностных условий. В рамках широкого диапазона исследований влажности зачастую используется инфракрасная термография. Для исследования некоторых конструкций применяются методы эндоскопии, ультразвука и микросейсмические методы. При помощи этих методов можно выполнить оценку прочности на сжатие и однородности природного камня и глиняного кирпича. Для некоторых исследований влажности применяются различные электрические методы (метод с использованием резистора, емкостный метод и микроволновый методы), а также радиометрические методы (ядерный магнитный резонанс, метод отражения нейтронов, и рентгенографические методы).

4.2.5 Полевые испытания

Полевые испытания как часть определения конструкции, а также как часть мониторинга в циклическом или периодическом наблюдении, используются в качестве исследовательского подхода. Целью статических полевых испытаний преимущественно является проверка несущей способности конструкции. В ходе динамических испытаний в центре внимания - определение динамических свойств конструкции, взаимодействие между динамическими нагрузками, а также поведение конструкций.

Статические испытания

Статическими нагрузками считаются нагрузки, при которых воздействие на конструкцию оказывается очень медленно во избежание динамических воздействий. Статические полевые испытания могут быть подразделены на поведенческие испытания, диагностические испытания и пробные испытания.

Поведенческие испытания проводятся либо для изучения механики поведения конструкции, либо для проверки определенных методов расчета. Целью последнего является проверка надежности использования аналитических методов при проектировании и оценке конструкций. Поведенческое испытание дает информацию о распределении нагрузки между различными элементами конструкции. Результаты таких испытаний могут быть использованы для калибровки аналитических методов.

Диагностическое испытание представляет собой испытание, проводимое с целью диагностики воздействий при взаимодействии элементов конструкции. Например диагностическое испытание может проводиться для установления чередующихся условий наложения связей в конечной части колонны моста. Посредством многочисленных испытаний было подтверждено, что диагностические испытания могут иметь полезный эффект и использоваться для обнаружения источников повреждения, которые в свою очередь могут присутствовать в конструкции как следствие случайного взаимодействия элементов, а также для определения положительных эффектов такого взаимодействия. Диагностическое испытание имеет преимущество, так как оно объясняет почему конструкция ведет себя не так, как предполагалось.

Пробные испытания проводятся с целью установления безопасной несущей способности конструкции. В ходе такого испытания конструкция подвергается чрезмерно высоким статическим нагрузкам, которые вызывают более активный отклик конструкции, нежели отклики, полученные в ходе статически применяемых максимальных рабочих нагрузок. Вследствие слишком больших нагрузок, приложенных к конструкции во время таких испытаний, всегда существует вероятность ее необратимого повреждения. Хорошо спланированное пробное испытание проводится с постепенным увеличением нагрузок, гарантируя, что они не будут превышать предел линейной упругой реакции.

Динамические испытания

Динамические испытания конструкций могут быть разделены на следующие категории:

- испытания на изменение напряжений по времени
- испытания динамической нагрузкой
- испытания по определению частот и форм собственных колебаний конструкции

Динамические нагрузки в отношении их характеристического и их пространственного распределения часто оказываются сложными и неполными в плане вычислительного описания. В этом случае проводятся испытания на изменение напряжений по времени с целью определения данных экспериментальных напряжений в динамически сильнонапряженных точках конструкций (например, узловых соединениях), которые являются существенными с учетом усталостной нагрузки. После предварительных числовых исследований с целью определения "горячих точек" в конструкции, устанавливается большее количество датчиков, измеряющих напряжения в рабочих условиях. По результатам этих исследований определяются оптимальные конфигурации датчиков для длительного мониторинга усталости конструкции. Испытания на изменение напряжений по времени всегда проводятся до конца независимо от того, являются ли динамические воздействия в сочетании с исследуемой конструкцией слишком сложными, чтобы получить достаточно точные результаты на основе вычислений.

Испытания динамической нагрузкой служат для определения динамического прироста вследствие транспортных нагрузок. Для контроля приемки проекта после завершения необходима реалистичная информация. Кроме того, при одинаковой интенсивности движения, конструктивные изменения могут привести к измененным динамическим напряжениям в отдельных частях конструкции. Помимо этого, изменение целевого использования вследствие планируемого проезда транспортных средств с измененными динамическими характеристиками, ведет к предварительному измерению новых динамических нагрузок. Если в ходе проектирования воздействия динамических нагрузок рассматриваются как увеличение статического напряжения, то динамические испытания нагрузкой проводятся посредством замеров деформации в тех частях конструкции, которые являются существенными для проектирования.

Испытания по определению частот и форм собственных колебаний конструкции предназначены для определения модальных свойств конструкций. Знание модальных характеристик полезно для определения повреждений, для контроля качества конструкций после завершения строительства, для планирования и оценки ремонтных работ, для оценки безопасности конструкции после чрезмерных нагрузок, а также для калибровки моделей конструкций.

Методики определения собственных частот, типов колебаний и их демпфирования различаются в отношении к возбуждению конструкций в:

- испытаниям колебаниями окружающей среды
- испытаниям вынужденными колебаниями.

В первом случае испытания проводятся в рабочих условиях. Энергия возбуждения исходит от рабочей динамической нагрузки конструкций (ветер, погода, движение транспорта, колебания грунта). Соответственно, испытания колебаниями окружающей среды могут также проводиться с большими конструкциями, а также под нагрузками, при которых происходит изменение динамических характеристик. Допускается, что такой вид возбуждения имеет стохастический характер с широкополосным спектром. В противном случае полное определение завершить будет нельзя, поскольку возбуждению подвержены только те частоты, которые присутствуют в спектре. Испытания колебаниями окружающей среды, как правило, проводятся сравнительно быстро и не требуют больших затрат. Поскольку отклик систем при естественном возбуждении часто минимален, необходимо использовать высокочувствительные датчики.

При испытаниях вынужденными колебаниями используются такие методы возбуждения как импульс (импульсный молот, падающий груз и т.д.) и функция Хевисайда, а также регулируемые типы возбуждения (гармонические, периодические и стохастические), вызываемые электродинамическими и электрогидравлическими системами возбуждения. Выбор системы возбуждения зависит от динамических характеристик конструкций, а также от текущих условий на строительной площадке. При использовании функции Хевисайда входная энергия концентрируется в низкочастотном диапазоне. Импульсные возбуждения не подходят для больших зданий. В ходе регулируемых возбуждений возможны произвольные продолжительные периоды измерения, при которых возможно достичь более высокую частоту разрешения. Недостатком является то, что оборудование и работа таких систем возбуждения стоит значительно дороже и требует исключение обычных рабочих

условий (движение транспортных средств). Преимуществом же является почти полное определение модальных характеристик конструкций.

4.3 Мониторинг конструкций

4.3.1 Цели

Целью автоматического и постоянного мониторинга конструкций в рамках настоящего руководства является получение более подробной информации о текущем состоянии и поведении конструкции и конструктивных элементов в течение длительного периода времени, а также данных о приводящих к изменениям воздействиях и нагрузках. Предполагается, что эта информация поможет дополнить и улучшить результаты ранее примененных методик по осуществлению мониторинга конструкции. Постоянный мониторинг, как правило, заключается в непрерывном измерении соответствующих величин, т.е. без временного прерывания, при помощи постоянно используемых датчиков. Кроме того, результаты сравниваются с предварительно установленными исходными данными о нагружении и свойствах конструкции.

Мероприятия, описанные в настоящем разделе, могут использоваться для расчета повреждений конструкции. Например, при нагрузке, превышающей допустимую, превышении арифметического значения продолжительности срока эксплуатации конструкции или ранее полученных повреждениях, которые не позволяют осуществлять освидетельствование через обычные промежутки времени, выполнение постоянного мониторинга предоставляет возможность дальнейшей эксплуатации конструкции. В этом случае, для мониторинга надежности конструкции необходимо обеспечить достоверность результатов измерений и обработки данных при помощи избыточных технологий. Следует также выполнять непрерывную оценку результатов постоянного мониторинга или выполнять такую оценку через короткие промежутки времени.

4.3.2 Описание задачи по осуществлению мониторинга

4.3.2.1 Мониторинг воздействий нагрузки

Постоянное наблюдение и оценка текущего воздействия нагрузки приобретают важное значение в присутствии значительно изменяющихся и внешних нагрузений, которые не могут быть определены (например, ветер, движение транспорта) достаточно точно, а также в связи со сложным характером поведения конструкции, которое не поддается моделированию или может быть смоделировано только с большими усилиями (например, пространственные воздействия).

4.3.2.2 Мониторинг состояния

В процессе мониторинга состояния конструкций выполняется оценка их общих и локальных свойств, на основе непрерывно измеряемых величин. Целью является оценка текущего состояния и прогнозирование с достаточной точностью развития состояния конструкции в будущем. Другая цель заключается в установлении и документировании значительных изменений в поведении конструкции.

Локальные свойства конструкции подвергаются мониторингу при наличии ранее полученных повреждений или конструктивного элемента, подвергающегося особым условиям нагружения. Если превышаются пороговые значения, например, заданные в нормах, установленные на основе полученного опыта или при проведении числового анализа, то как правило, необходимо проведение дальнейших специальных исследований.

В большинстве случаев изменения в конструкции отдельного элемента, например, образование разрыва в преднапряженном пучке, приводят к возникновению лишь местных воздействий. Поэтому, эффективность осуществляемого мониторинга зависит от локального базиса точек измерения.

4.3.2.3 Определение рабочих параметров и пороговых значений для осуществления мониторинга

Определение предельной нагрузки и параметров прочности, после оценки нагрузок от транспортных средств (например, интенсивного транспортного потока, столкновения при автодорожном происшествии, и т.д.) или воздействия окружающей среды (например, ливней, наводнений, землетрясений) играет важную роль, поскольку подобные единичные события могут привести к возникновению значительных повреждений конструкции. Для регистрации подобных событий необходимо, основываясь на экспериментальных данных, результатах измерений или вычислений, определить соответствующие пороговые значения. Регистрация таких событий осуществляется согласно времени хранения, максимальным и другим заданным параметрам и, если это является приемлемым, данным об отклике всех используемых датчиков. Хранение общей временной характеристики может в таких случаях быть полезным, поскольку при помощи такой характеристики можно зачастую определить величину вероятных повреждений.

Определение динамических нагрузок наряду с определением статических нагрузок может иметь большое значение для получения реалистичной оценки несущей способности и остаточного срока эксплуатации конструкции, а также для определения периодичности технического обслуживания. Поэтому, необходимо установить коэффициент динамичности. Он рассчитывается в зависимости от заранее определенных категорий нагрузки, исходя из соотношения максимального значения сигнала деформации и статической части сигнала (определяемой при помощи фильтра нижних частот).

Для оценки риска возникновения усталости материала значимым параметром, наряду с параметрами материала, является местное напряжение. Совокупность напряжений определяется посредством выполнения постоянного анализа сигналов напряжения (деформации) и применения метода «дождевого потока». Это соответствует классическому сохранению гистерезиса, который включает в себя сигналы напряжения. Амплитуда и форма совокупности напряжений обозначают потенциальную величину усталостного напряжения. Средняя амплитуда напряжения должна быть частью оценки не сварных конструкций, в ходе которой эти конструкции сравниваются со сварными конструкциями.

Следующие задачи могут иметь практическое значение для рассмотрения текущих воздействий нагрузки:

- мониторинг воздействий допустимой статической и динамической нагрузки;

- определение воздействий динамической нагрузки (динамических коэффициентов);
- классификация воздействий нагрузки (например, постоянный расчет напряжений);
- определение значительных напряжений и частоты их возникновения.

На основе постоянного наблюдения за воздействиями нагрузки могут быть выполнены следующие задачи:

- оценка срока технического обслуживания;
- оценка фактического уровня надежности конструкции, например, в соответствии с ЕС 1.1, на основе индекса надежности β ;
- определение периодичности технического обслуживания в зависимости от нагружения и фактического состояния конструкции.

При мониторинге состояния конструкции согласно настоящему руководству фактическое состояние конструкции оценивается, помимо прочего, при помощи выполнения следующих операций:

- измерения деформации, прогиба, кривизны, уклона на отдельных строительных площадках; это может привести к выводам о наличии, например, осадки фундамента, общих изменений жесткости конструкции, потери эффекта неразрезной балки, и т.д.;
- наблюдения за выбранными резонансными частотами (выводы об изменениях общей жесткости);
- выборочный мониторинг изменений доминирующих мод колебаний.

Примерами мониторинга локальных параметров конструкции являются:

- измерение длины и ширины известных единичных трещин;
- наблюдение за элементами конструкции, подверженными повышенной опасности образования трещин;
- деформации в местах с повышенной концентрацией напряжений;
- прогиб от статической нагрузки и вибрации является причиной смещения конструктивных элементов (например, опор кранов и пилонов);
- осадка фундамента (например, мостов);
- деформации преднапряженных пучков.

4.3.3 Экспериментальная разработка задач по выполнению мониторинга

4.3.3.1 Подготовка к работе

Мониторинг технических систем основан на знании конструктивных характеристик рассматриваемой системы. Только при наличии достаточной информации о поведении системы датчики могут быть размещены в правильных местах и оценка данных измерений, характеризующих соответствующие параметры для определения системы, может быть успешной. Для локализации области конструкции, в наибольшей степени подверженной воздействию напряжений, могут использоваться вычислительные и метрологические методы.

Знания о системе конструкции, полученные при использовании методов анализа экспериментальных и теоретических моделей, или анализа динамики сооружений являются наилучшей основой для конфигурирования измерительного оборудования, используемого в рамках системы мониторинга. Цель в данном случае – доказать возможность и экономичность применения данного метода для конструкции, подвергаемой мониторингу.

4.3.3.2 Сбор данных и анализ сигналов

Все величины измеряются непрерывно, в виде аналоговых сигналов. Необходимая частота дискретизации для аналого-цифрового преобразования должна составлять максимальное значение рассматриваемого диапазона частот. Если анализ данных выполняется в частотной области, частота дискретизации должна как минимум вдвое превышать максимальную частоту. Как правило, этот верхний предел обеспечивается до цифрового преобразования при помощи фильтра нижних частот. Для анализа данных во временной области следует использовать более высокую частоту дискретизации. На практике наиболее приемлемой считается частота дискретизации, превышающая наивысшую рассматриваемую частоту приблизительно в пять раз.

Из всех измерительных сигналов должна быть постоянно обеспечена регистрация характеристических значений или параметрических функций. Очистка или грамотная обработка собранных данных играет важную роль для интерпретации этих данных. Для выполнения этой задачи могут использоваться следующие методы:

- *Фильтр верхних частот*: отфильтровывание квазистатических и высокочастотных областей сигналов, имеющих своим источником, например, колебание температуры, движение кабелей или помехи при измерениях.
- *Полосовой фильтр*: используется для отфильтровывания определенного диапазона частот спектра кроме установленного спектрального состава сигнала, к которому чувствительна конструкция.
- *Интегрирование*: интеграторы используются для преобразования сигнала ускорения в значения скорости и смещения. Интеграторы могут быть выполнены на основе аналоговых сетей и цифровых методов.
- *Генерация параметров*: расчет среднего значения и стандартного отклонения, максимального значения на основе (вероятно, предварительно обработанного) сигнала.
- *Частотный анализ*: определение спектрального состава временного отклика сигнала. Разрешение по частоте f_0 может быть определено, исходя из величины длительности временного диапазона T при помощи $f_0 = 1/T$.
- *Статистический анализ*: оценка функции плотности распределения вероятностей для некоторой переменной или определение максимального значения сигнала. Результаты представлены в настоящем документе, в виде гистограмм и функций плотности.

Процесс непрерывного сбора данных должен сопровождаться постоянной обработкой этих данных непосредственно на месте сбора для уменьшения количества данных. Хотя, наряду с этим, снижается гибкость последующего анализа данных.

В случаях медленного изменения наблюдаемых рабочих параметров, возможно, имеет смысл фиксировать лишь их скользящие средние значения. Возможно также, что будет необходимо использование сочетания алгоритмов сбора данных, и будут фиксироваться только максимальные значения, характеризующие общий режим работы, а текущие данные будут документироваться для отдельных периодов времени при превышении пороговых значений.

Выбор наиболее подходящего алгоритма сбора данных является важной составной частью контроля рабочего состояния конструкции и влияет как на количество хранимых данных, так и на тип диагностической информации, которая может быть получена.

Обработка данных также важна при использовании многосенсорных систем в рамках одного проекта по контролю рабочего состояния конструкции. Многие из этих датчиков могут иметь достаточно разные режимы формирования сигнала и системы демодуляции для получения первичных данных от соответствующих датчиков. Важно, чтобы система могла обрабатывать данные, полученные из всех источников, и соотносить их с общим справочным параметром, таким, как отметка времени.

4.3.3.3 Измерения и условия эксплуатации

В рамках мониторинга измерения выполняются в условиях эксплуатации, когда конструкция подвергается напряжению при нагрузке от транспортных средств, распространении вибрации, воздействию ветра, температуры и микросейсмических воздействиях. Наряду с тем, что получение данных о нагрузках и их воздействия выполняется в объеме программы мониторинга, появляется необходимость введения ограничений для требуемых измеряемых величин. Это должно быть учтено при выборе датчиков и их использовании в конструкции. В дальнейшем это может повлиять на методы анализа данных.

Диапазон температур, в котором компоненты установленного измерительного оборудования и приборов для анализа данных могут подвергаться воздействию, составляет приблизительно от -40 до 50 градусов Цельсия. Необходимо рассчитать, когда в измерительной цепи необходимо обеспечить температурную компенсацию. Другими важными с точки зрения климата воздействиями являются влажность и влага. Класс защиты измерительного оборудования от поражения электрическим током (датчиков, штепсельных вилок, кабелей, управляющих устройств и компьютерного оборудования) должен соответствовать условиям эксплуатации. Как правило, для датчиков и линий передачи данных необходим электрический экран, защищающий их от электромагнитных полей и токов, и, в особенности, надлежущая защита от молнии. Кабель для передачи аналогового сигнала должен быть как можно более коротким.

При использовании датчиков, кабелей и электронной аппаратуры следует учитывать, что конструкции гражданского назначения, как правило, не защищены от вандализма.

Для длительного и экономичного использования измерительной системы все компоненты должны быть легко заменяемыми.

4.3.3.4 Датчики и их характеристики

Для мониторинга конструкций важно, чтобы датчики были надежными, а также стабильно и безотказно функционировали. Необходимо обеспечить неизменяемость характеристических значений под воздействием окружающей среды, например, температуры, влажности, механических воздействий, а также электрического и магнитного полей. Если известно о наличии этих воздействий следует защитить датчики или компенсировать воздействие на измеряемые величины.

Датчики могут быть подразделены на устройства, выполняющие мониторинг локальных свойств, например, материала, и устройства, ведущие наблюдение за конструкцией в глобальном смысле. Некоторые из них встроены в конструкцию, другие размещены на ее поверхности.

В соответствии с измеряемыми величинами, геометрией и размерами, деформацией, напряжением, усилием, весом, динамическими параметрами, температурой и параметрами долговечности, наиболее важными датчиками, используемыми в настоящее время в мониторинге состояния конструкций, являются:

- Тензометры; при использовании данных устройств следует учитывать, что должны использоваться подходящие тензометры различного типа и длины, в зависимости от конструктивного материала (бетон, сталь, и т.д.). Рекомендации относительно правильного применения, защиты от воздействий окружающей среды и правильного выбора кабелей представлены в работе [1]. В зависимости от измерительного усилителя перекрываемый диапазон частот должен составлять от 0 Гц до нескольких кГц. Может быть измерена деформация, ограниченная измерительной цепью, с разрешением до $0,1 \mu m / m$.
- Волоконные решетки Брэгга; эти датчики подходят для измерения деформаций до $10000 \mu m / m$ и температурного интервала от -50 до 200 градусов Цельсия в частотном диапазоне от постоянного тока до мегагерц. Датчики могут быть вмонтированы в материал конструкции или располагаться на его поверхности. Длина датчиков может быть задана согласно поставленной задаче по выполнению измерений. Датчики обладают хорошей линейностью и небольшим гистерезисом и они нечувствительны к электромагнитным возмущениям. Поскольку датчики термочувствительны при получении информации с тензометрических датчиков необходимо выполнять температурную компенсацию.
- Датчики на основе пьезопленки; датчики этого типа, в отличие от тензометров, могут пропускать сигнал через фильтр верхних частот, т.е. они измеряют динамическое усилие за пределами граничной частоты. Значение этой пороговой частоты может быть определено при подключении электрометрического усилителя непосредственно к датчику. При использовании синтетической пленки, по-

- крытой медью, может быть обеспечена пороговая частота 0,2 Гц. Размеры датчиков варьируются, и, как правило, в среднем составляют приблизительно 12 x 90 мм, включая электрометрический усилитель и усилитель напряжения. Датчики на основе пьезопленки, вместе с встроенными усилителями, крепятся при помощи эпоксидной смолы.
- Датчики смещения для измерения прогиба; главные типы этих датчиков, измеряющих относительное смещение между двумя точками, и работа которых основана на индуктивном принципе, представляют собой различные устройства LVDT-типа с диапазонами измерений от ± 1 мм до ± 50 мм, и условно неограниченной разрешающей способностью в интервале температур от -20°C до $+120^{\circ}\text{C}$. Информация о других заслуживающих сравнения датчиках, работающих на основе аналогичных физических принципов, но имеющих другие технические параметры, представлена в работе [1].
 - GPS-датчики смещения; определение прогиба, как правило, требует наличия постоянной доступной точки отсчета для каждого измерения. Для случаев, когда это не осуществимо на практике, существуют спутниковые датчики, измеряющие движение конструкций. Сенсорные узлы, установленные на интересующих участках конструкции, способны осуществлять наблюдение за осадками фундамента, а также за движениями мостов и высотных зданий в течение длительного периода времени. Каждый сенсорный узел состоит из приемника GPS-сигналов, микроконтроллера и радиоканала передачи данных. При оценке фазовой информации спутниковых сигналов и использовании дифференциальной системы глобального позиционирования DGPS может быть достигнута точность измерений менее 10 мм.
 - Системы гидростатического нивелирования (HLS); такая система датчиков, применимая для измерения смещений, основана на классическом физическом законе сообщающихся сосудов. Она состоит из двух или более соединенных ячеек с жидкостью, установленных на выбранных местах конструкции, где одна из ячеек предназначена быть опорной точкой. Системы гидростатического нивелирования могут использоваться только для случаев статических или квазистатических событий. В пределах некоторого диапазона измерений может быть достигнуто разрешение, равное 0,02 мм.
 - Датчики смещения для измерения относительной вибрации; датчики смещения, как правило, применяются для измерения ширины трещин. В соответствии с принципом измерения можно провести различие между кондуктивными, индуктивными и емкостными датчиками. В зависимости от принципов измерения можно измерить смещения от 0,1 до 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ в частотном диапазоне от 0 Гц до нескольких кГц.
 - Струнные тензометры; в этом типе датчиков используется закон физики, говорящий о том, что квадрат собственной частоты струны пропорционален степени ее натяжения. Эти датчики, заключенные в запаянные стальные трубки, могут использоваться для измерения деформации, прочности, давления и температуры, если они закреплены на поверхности конструкции, или, произведенные для заделывания в бетон, – для статических и динамических измерений. Показатель долговременной стабильности является очень хорошим. Разрешение составляет около 0,025% от диапазона измерений.
 - Датчики скорости вибрации; для измерения значений абсолютного движения эти датчики размещаются непосредственно на вибрирующем объекте. Датчикам такого типа не нужна базисная точка. Они могут использоваться в ограниченном диапазоне измерений, составляющем приблизительно от 2 Гц до 1000 Гц. Хотя, в более низком диапазоне частот могут иметь место фазовые и амплитудные отклонения. В зависимости от типа встроенного электромеханического преобразователя датчики могут подразделяться на два класса: датчик абсолютного перемещения (индуктивный, емкостной или тензометрический преобразователь) и датчик скорости вибрации (электродинамический преобразователь).
 - Датчики виброускорения; они также размещаются непосредственно на вибрирующем объекте. В зависимости от типа встроенного электромеханического преобразователя такие датчики могут использоваться в диапазоне от 0 Гц (тензометрический или индуктивный преобразователь, также как и серводатчики ускорения) или выше нижнего порога частоты (пьезоэлектрические датчики). Верхний порог частоты в обоих случаях находится на уровне нескольких кГц.
 - Лазерный датчик для измерения вибраций; при помощи таких датчиков могут быть выполнены бесконтактные измерения в пределах сравнительно больших расстояний. Как правило, используются т.н. позиционно-чувствительные датчики PSD. Источником в большинстве случаев является полупроводниковый лазер низкой интенсивности. Диапазон измеряемой частоты составляет от 0 Гц до 300 кГц, в зависимости от системы измерения. Разрешение достигает 10 $\mu\text{m}/\text{m}$, в зависимости от размера датчика PSD, интенсивности света и системы измерения.
 - Инклинометр для измерений угла наклона; датчики такого типа могут использоваться для диапазона частот до 5 Гц, на основе емкостного принципа. Для более высоких частот более подходящими являются серводатчики ускорения. Разрешение инклинометров составляет, как правило, от 0,1 до 0,001°.
 - Волоконно-оптические датчики; в зависимости от используемого измерительного оборудования эти датчики применимы для измерения ширины трещин, а также их обнаружения и локализации. Для измерения ширины и обнаружения трещин используется закон физики, говорящий о том, что при ослаблении поперечного среза волокна возрастает поглощение рассеянного света. Ослабленный свет, измеренный на конце поперечного среза оптического волокна, используется далее в качестве показателя наличия трещины или изменения ее ширины. Необходимо отметить, что при достижении определенной ширины трещины датчик может выйти из строя. Для локализации трещин необходимо измерить время прохождения отраженного сигнала по оптическому волокну. Однако, это приводит к

значительным вложениям в необходимое для работы оборудование и разработку метода анализа данных.

- Датчики для измерения температуры, влажности, и обнаружения коррозии; для постоянного сбора данных об этих измеряемых величинах подходящими являются стандартные датчики. Для этого такие датчики могут использоваться с целью длительных измерений; они должны быть размещены, и, в конечном счете, герметизированы с большой осторожностью.

Основными критериями для выбора датчиков является минимальное изменение измеряемой величины (разрешения, линейности, точности), диапазон измерений, тип измерения (статический, динамический, и т.д.), продолжительность испытания (долговременная стабильность), среда проведения испытаний, среда в месте установки и финансовые средства.

4.3.3.5 Измерительное оборудование

Как правило, измерительное оборудование для долгосрочного мониторинга состоит из следующих компонентов:

- усилитель сигнала (усилитель напряжения, электрометрический усилитель, измерительный усилитель несущей частоты, мостиковый усилитель);
- аналоговый фильтр сглаживания (настроенный на необходимую частоту среза);
- система сбора результатов измерения с аналогово-цифровым преобразованием (глубина преобразования 16-24 бит);
- компьютер для анализа данных, предназначенный для управления, обработки, сокращения объема данных и их хранения;
- накопитель данных (полупроводник, флэш-карта, диск, флоппи, стримерный накопитель);
- источник бесперебойного питания;
- устройство для дистанционной передачи данных посредством телекоммуникационного оборудования (телефонная линия для передачи данных или факс, мобильный телефон или трансивер для спутниковой связи) или через каналы передачи данных для систем управления дорожным движением.

4.3.4 Обработка и организация данных мониторинга

4.3.4.1 Статические измеряемые величины

Изменяемые значения таких отклонений как прогиб, наклон, усадка, ширина и длина трещины, а также внешние измеряемые величины (температура, влажность, коррозия и т.д.) являются преимущественно квазистатическими поскольку их изменения во времени происходят медленно. Это было доказано для того, чтобы рассчитать эти значения в виде почасовых средних значений с соответствующим стандартным отклонением. Дополнительно рекомендуется фиксировать резкие сильные изменения амплитуд во времени с использованием предварительно определенных пороговых значений.

Появление трещин в конструкциях из (полностью) предварительно напряженного бетона или в основных элементах стальных конструкций, а также превышение предельно допустимой ширины трещин часто является сигналом критического состояния конструкции. Поэтому, важной составляющей для раннего обнаружения повреждения является непрерывный мониторинг изменений ширины существующих трещин или определение новых трещин в известных слабых местах конструкции или в местах с повышенной концентрацией напряжения. Практически была доказана необходимость определения и хранения почасовых максимальных значений.

4.3.4.2 Динамические измеряемые величины

Изменения в поведении несущей способности конструкций часто ассоциируются с изменениями в вибрационных характеристиках. Изменения статической системы и соответствующих параметров исследуемой конструкции влияют на собственные колебания и на их форму. Их следует определять с помощью экспериментального расчета форм колебаний.

В рамках автоматического долгосрочного мониторинга оценка выше обозначенных величин также может проводиться и без искусственного возбуждения. Поэтому динамическая реакция каждой точки измерения должна быть рассчитана с помощью преобразования Фурье. Пики спектра плотности мощности примерно описывают собственные частоты. Затем посредством одновременного или последовательного измерения в различных точках необходимо определить соответствующие рабочие формы колебаний. Последние являются похожими на собственные формы колебаний конструкции.

На практике результат многочисленных последовательных измерений должен быть усреднен в целях устранения помех, внешних воздействий и других частей сигнала, которые не зависят от состояния конструкции. Участки средней нормализованной спектральной плотности мощности (ANPSD) можно считать отличительной особенностью конструкции. Изменение жесткости или массы конструкции должно быть отражено в изменениях рисунка ANPSD. Посредством сравнения с базовым состоянием можно получить качественную информацию о месте и масштабе изменений конструкции.

Количественная оценка нуждается в уточнении рассматриваемых моделей конструкции. Во многих случаях рекомендуется использовать дополнительные данные из экспертных систем.

Следует выбирать место точек измерения, рассматриваемые собственные колебания, а также рабочие формы колебаний таким образом, чтобы ожидаемые изменения конструкции были отражены в максимально полной форме. Это может быть достигнуто путем экспериментальных предварительных исследований или численного моделирования.

4.3.4.3 Выбор, управление и представление результатов измерений

Система непрерывного мониторинга должна разумно применяться на площадке. Вся информация, заданная в рамках определенного диапазона, может быть записана в специальных параметрах или в счетных значениях, которые сохраняются через определенные промежутки времени. Выдающиеся результаты сохраняются отдельно с корреляцией по времени. Хранящиеся данные будут передаваться на компьютер постепенно

или в установленные интервалы времени через постоянный канал передачи данных. На компьютере хранится вся информация о настройках измерения, точках измерения и датчиках, а также названия каналов, настройки и калибровочные коэффициенты. Далее, компьютер приводит результаты к нужным условиям, делает обработку информации, создает отчеты по мониторингу и графические отчеты по результатам, а также необходимые расчеты трендов. Присоединяясь к базе данных, содержащей всю остальную информацию о конструкциях и исследованиях, появляются возможности глобального использования результатов измерений, например, сбор системы технической информации или разработка экспертных систем. Более того, такие данные могут служить основой для управления качеством.

4.3.5 Обзор параметров и результатов мониторинга

4.3.5.1 Отчет о статусе

Данные измерений необходимо регулярно исследовать с точки зрения функциональности и оптимальной производительности оборудования. Кроме того, результаты мониторинга необходимо проверять с точки зрения их достоверности и совместимости с физической реальностью. С одной стороны проверка должна проводиться на основе измеренного временного ряда выборочных результатов (типичных, максимальных, ориентированных на событие и т.д.). С другой стороны, результаты необходимо исследовать на основе статистических номинальных значений (максимальных и минимальных значений, среднеквадратичных значений, средних значений, скользящих среднеквадратичных) в установленные периоды времени. При мониторинге динамических значений частотные спектры подлежат сравнению, а определенные собственные частоты, частотные изменения и частотность, в свою очередь, должны быть представлены и исследованы с точки зрения достоверности. Результаты определения нагрузок должны быть представлены на протяжении времени проведения мониторинга, распределенные по классам нагрузки. Более того, должен быть проведен расчет и сравнение распределений нагрузки в пределах значимых периодов времени. Эффективные усталостные напряжения необходимо распределять в матрицах дождевого потока и сравнивать с соответствующими напряжениями в аналогичных периодах времени.

4.3.5.2 Анализ когерентности воздействий

Определение когерентности воздействий в форме корреляций играет важную роль в анализе результатов мониторинга, помимо их временного развития. Вместе с тем, может быть получена важная информация о зависимости значений мониторинга от оцениваемых регулируемых переменных или воздействий, которые могут регулироваться в ходе мониторинга. Ошибки и сбои в технологии датчиков или в методе измерений, появляющиеся при мониторинге, быстро становятся заметными при отображении корреляций для различных физически связанных измеренных переменных.

4.3.5.3 Оповещение

Помимо регулярной передачи данных с компьютера, производящего сбор данных на объекте, на центральный компьютер, целесообразной может быть передача дополнительных данных, ориентированных на то или иное событие. В данном случае, при возникновении особых обстоятельств, таких как превышение пороговых значений, значительные изменения в системе конструкции и износ элементов системы мониторинга, информация должна быть незамедлительно отправлена на центральный компьютер или факс.

4.4 Числовой расчет

Числовой расчет конструкции требует наличия адекватной модели, содержащей достаточно точные данные о жесткости конструкции, распределении массы и условиях опирания.

Наиболее приемлемым методом моделирования и сравнения измеренных и рассчитанных данных с целью оценки конструкции является метод конечных элементов. Как только модель конечных элементов достигла определенного уровня завершения и допустимости, она обеспечивает наилучшую основу для аналитического прогнозирования и моделирования.

Существенные задачи числового расчета заключаются в определении конструкционных свойств и моделировании поведения конструкции со следующими вариантами:

- определение модального параметра
- проверка результатов измерений
- моделирование свойств конструкции с воздействием, экспериментальное осуществление которого представляется сложным и затратным
- реализация исследований параметров
- моделирование повреждений

Неточности в моделях возникают вследствие допущений о структуре моделей (размере сетки, типе элементов, граничных условиях, линейном и нелинейном поведении), а также параметрах моделей (параметрах материалов, непрерывной и дискретной жесткости, массах и моментах инерции). Правильное определение нагрузок и других воздействий является существенным допущением для приближенного к реальности моделирования поведения конструкции.

Следующие действия рекомендуются для проверки правильности результатов моделирования:

- обзор программного кода / вводных макросов
- обзор результатов расчета, например, путем:
 - моделирования опытов с определенными граничными условиями
 - расчета предельных значений, оценки воздействий
 - статистического расчета значений с переменными параметрами
 - сравнения с альтернативными системами
 - количественной оценки результатов

4.4.1 Калибровка моделей конструкции

Интеграция аналитического моделирования с последующим проведением опыта для калибровки и проверки аналитической модели для обеспечения надежного моделирования называется идентификацией конструкции. Идентификация конструкции служит отправной точкой и основой мониторинга состояния конструкции.

Калибровка проводится путем постепенной корректировки численных значений групп параметров, определяющих материалы, геометрию, условия непрерывности и граничные условия, до тех пор, пока расхождение между измеренными данными и моделируемым поведением аналитической модели не будут сведены к минимуму с точки зрения целевой функции. Калибровочную модель необходимо проверять с помощью измеренных данных, не применяемых в целях калибровки.

Даже в случае если большинство процессов идентификации параметров, основанных на линейности, теоретических границах, опорных и начальных условиях, не могут отвечать реальным условиям конструкции, линейная модель, откалиброванная в полевых условиях, служит как лучшая возможная отправная точка для моделирования с помощью нелинейного метода конечных элементов для того, чтобы прогнозировать возможные режимы разрушения.

- Калибровка модели

Механические свойства и граничные условия, а также условия непрерывности модели подвергаются корректировке. Конфигурации модели согласуются с физической оценкой, наблюдаемой при испытании, и на основе обрабатываемых данных испытаний.

- Анализ чувствительности

Чувствительность может быть определена как данные местного градиента, полученные с помощью аналитической формулы, сопряженной дифференциации или численного расчета посредством методов конечных разностей. Данные о чувствительности имеют большую значимость, в случае если решены задачи оптимизации. Для калибровки моделей входные параметры должны быть тщательно исследованы, чтобы определить, какие из них приводят к наибольшим изменениям в ряде характеристик отклика на интервале возможных значений.

- Применение откалиброванных моделей

Аналитическая модель, откалиброванная в полевых условиях, служит наилучшим показателем фактического состояния конструкции. Она может использоваться для расчета несущей способности, допустимой нагрузки, а также оценки внутренних усилий, напряжений и деформаций в условиях эксплуатации.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ

5.1 Цели и методики определения повреждений

Целью определения повреждений является стремление как можно раньше получить всестороннюю информацию о повреждении конструкций. Кроме того, следует оценивать локальные и глобальные последствия повреждения с учетом процесса повреждения. Следующей целью определения повреждений является поиск причин возникновения повреждения.

На основе определения термина «повреждение» описывается общая методика определения повреждения. Типология существенных повреждений строительных конструкций и их причин носит целесообразный характер. Используемые методы различаются в зависимости от уровня знаний о существующем или ожидаемом повреждении в локальных и глобальных методиках. В глобальных методиках описываются общепризнанные методы, основанные на результатах статических и динамических измерений.

5.2 Определение повреждения

Повреждение определяется как изменение в системе, неблагоприятно воздействующее на настоящее и будущее функционирование конструкции.

Данное определение ограничено изменениями в материале и/или в геометрических свойствах конструкции, включая изменения граничных условий и системной совместимости.

Изменения системы в плане повреждения развиваются либо непосредственно (независимо от времени) либо в связи с зависящими от времени процессами. Повреждение, зависящее от времени, может накапливаться постепенно в течение длительного периода времени, напр. повреждение, связанное с усталостью конструкции или накопленное коррозионное повреждение. Отдельные события, такие как, например, землетрясения, временные нагрузки и другие могут привести в зависимости от их характера (запланированного или незапланированного) к непосредственным, т.е. независимым от времени повреждениям. В плане пространственного распространения повреждение имеет либо локальное воздействие, либо может быть признано распределенным. Тяжесть повреждения характеризуется либо геометрическим описанием (геометрия трещин и т.д.) либо посредством воздействия на несущую способность конструкций (напр. потеря жесткости или массы) или изменениями свойств рассеивания энергии в системе.

5.3 Классификация и механизмы повреждений

Повреждение может быть определено как частичное или полное разрушение материала конструкции и, как следствие, ослабление прочности элемента конструкции, находящегося под воздействием, либо всей конструкции соответственно. Повреждения могут быть вызваны несколькими причинами. В основном, повреждения являются следствием износа, преимущественно коррозии и усталости. Кроме этого, повреждения могут быть вызваны избытком прочности материала, не смотря на незапланированные высокие нагрузки.

5.3.1 Общие причины повреждений

Ниже перечислены общие причины повреждений:

1.) Чрезмерное напряжение (нагружение) при независимой от времени прочности

Возможные случаи:

- случайные и сейсмические нагрузки (удар, землетрясение, взрыв)
- чрезмерно высокие переменные нагрузки (высокая временная нагрузка, ураганный ветер, волны и снег)

2.) Регулярные нагрузки с пониженной прочностью

Уменьшение прочности элемента, согласно проекту, как правило, является зависящим от времени процессом, который может инициировать повреждение в ходе следующих процессов:

- износ вследствие химической нагрузки
 - коррозия поверхности стали
 - точечная коррозия стали
 - реакция между щелочами и кремнеземом в бетоне
- износ вследствие механической нагрузки
 - образование субмикроскопических трещин и рост трещин до превышения нижнего предела поперечного сечения вследствие быстро изменяющейся нагрузки металлоконструкций и бетонной арматуры (усталость)
 - коррозионное растрескивание предварительно напряженной арматуры
 - коррозионное истирание стальных элементов
 - образование микроскопических трещин в бетоне ведет к сокращению поперечной прочности на разрыв и, как следствие, к уменьшению прочности бетона на сжатие (усталость)
- износ вследствие физической нагрузки
 - повреждение полимеров ультрафиолетовым излучением
 - повреждение бетона на морозе
 - повреждение материалов теплом/огнем
- пластическая деформация, усадка, ослабление
 - пониженная прочность на сдвиг в результате потери предварительного напряжения вследствие пластической деформации

3.) Комбинация пунктов 1) и 2)

5.3.2 Особые причины повреждения

Механизмы повреждения, описанные в п. 4.3.1 имеют следующие особые причины:

1.) Коррозия стали, вызванная:

- поврежденным антикоррозийным покрытием
- трещинами в бетоне и другими механическими повреждениями строительного бетона (плюс влажная среда), вызванными:
 - случайными нагрузками
 - слабой арматурной конструкцией
 - ограничениями вследствие изменений в несущих условиях (осадка фундамента, а также смещение и уменьшение степени свободы)
 - потерей предварительного напряжения
- карбонизацией бетона
- хлорид-ионами (противообледенительная соль, морская вода)

2.) Образование и рост трещин в металлоконструкциях, а также образование микроскопических трещин в бетоне, вызванное:

- быстро изменяющейся нагрузкой над уровнем усталостной прочности вследствие
 - высоко-циклических нагрузок
 - циклических нагрузок плюс уменьшенного поперечного сечения (трещины)

5.4 Принципы определения повреждений

Определение повреждений, как правило, представляет собой четырехуровневый процесс:

1. Определение наличия повреждения в конструкции (Уровень 1: Обнаружение)
2. Определение геометрического расположения повреждений (Уровень 2: Локализация)
3. Определение степени повреждения (Уровень 3: Количественное определение)
4. Прогнозирование остаточного срока эксплуатации конструкции (Уровень 4: Прогноз)

5.5 Переменные и критерии определения повреждений

Цель экспериментальных исследований – получение информации для выполнения задач, упомянутых в разделе 3.1. Данная цель может быть достигнута либо посредством выполнения единичного исследования в плане полевых испытаний, упомянутых в разделе 3.2.5, либо при помощи периодических или непрерывных измерений с использованием систем мониторинга, работающих в автоматическом режиме. Различие между используемыми процессами проводится в зависимости от того, предполагается ли наличие информации о повреждениях или такая информация уже имеется в наличии, что приводит к мониторингу локального повреждения, либо в зависимости от необходимости сбора информации о глобальном поведении конструкции. Данные измерений основываются на результатах как статистических, так и динамических исследований. Был разработан ряд аналитических методов определения повреждений в рамках процесса мониторинга состояния конструкций.

5.5.1 Локальные методики

Применение локальных методик для анализа слабых мест целесообразно в следующих случаях:

- При наличии информации о типе и расположении существующих повреждений должны быть определены размеры повреждения, и развитие повреждений должно подвергаться мониторингу (Уровень 3). Затем должна выполняться оценка локального положения и глобальных последствий. Это относится к текущему состоянию, а также к прогнозированию состояния в будущем (Уровень 4, раздел 4.4).
- Таким же образом, эта методика относится к ситуации, в которой, на основании предварительной информации, ожидается возникновение повреждения на определенном участке конструкции, например, при чрезмерном нагружении или усталости (Уровень 1). Данная задача может быть решена при проведении мониторинга нагрузок (раздел 2).
- Дополнительной задачей локального мониторинга повреждений является определение причины повреждения. Более того, кроме параметров повреждения мониторингу подвергаются значения, влияющие на повреждения. Информация о характере и причинах повреждений может быть получена посредством временных корреляций, а также корреляций между значениями результатов измерений. Примером является наблюдение за шириной трещин, которая может быть подвержена влиянию температур, вибраций, осадок или других причин.
- Если локальные повреждения влекут за собой глобальные последствия (например, осадка опоры моста) по-видимому, целесообразным является выполнение локальных наблюдений на других участках кроме мест повреждения (Уровни 1-3).

При использовании локальных методик используются значения измерений, которые являются существенными для конкретного типа повреждения или эффектов вредного воздействия посредством соответствующих признаков (например, ширины трещин, деформаций, уклонов и т.д.). В данном случае с успехом используются системы непрерывного действия.

5.5.2 Глобальные методики

Всегда, если не известно ни о наличии повреждений, ни об их возможном расположении, необходимо контролировать и определять параметры чувствительности глобальной системы. Это может быть осуществлено как при непрерывном и периодическом мониторинге, так и при отдельных полевых испытаниях.

5.5.2.1 Динамические методики

Параметры вибрации являются общими свойствами конструкции и, хотя на них влияют локальные повреждения, они могут быть не очень чувствительны к таким повреждениям. В результате, изменение глобальных свойств может трудно поддаваться определению, за исключением случаев высокой степени повреждения или чрезвычайной точности измерений.

Определение местоположения возможного повреждения и его степени на основании изменения глобальных свойств, данные о котором получены при проведении измерений при ограниченном количестве точек расположения датчиков, является проблемой, которую не следует недооценивать. Для получения наиболее вероятного решения следует использовать сложные математические методы, включая нелинейное программирование. Общие параметры вибрации зачастую подвергаются влиянию других явлений, помимо повреждения, включая воздействия факторов окружающей среды, таких как изменения массы и тепловые воздействия, обусловленные колебанием температуры. Кроме того, граничные условия конструкции могут привести к изменению вибрации, если они подвержены изменениям с течением времени.

Информация о состоянии конструкции представлена с учетом измеренных изменений вибрационных свойств. Наиболее часто используемыми методами являются:

- Методы собственных частот
- Методы формы колебаний и эксплуатационных отклонений формы
- Модальные методы энергии деформации
- Метод вектора усилия-невязки
- Методы уточнения моделей
- Амплитудно-частотная характеристика
- Статистические методы

Оптимального метода для использования измеренных данных о вибрации для обнаружения, локализации и количественного описания повреждений не существует. На сегодняшний день не было предложено никакого алгоритма, который можно было бы повсеместно применить для определения любого типа повреждений в любом типе конструкции. Кроме того, в настоящее время не существует алгоритма, способного дать точный прогноз относительно срока эксплуатации конструкции. Кроме применения динамических методик требуется обширный опыт работы в данной области.

Методы собственных частот

Изменения в жесткости и массах, а также динамически эффективном состоянии опор и переходном состоянии конструкции, как правило, приводят к измеряемым изменениям собственных частот. В большинстве случаев, расхождения, связанные с выполнением измерений, являются небольшими. Зачастую для получения требуемой информации достаточно лишь нескольких оптимально размещенных датчиков. Для статически определенных конструкций измеренные разности собственных частот уже составляют существенный пример локализации повреждения. Поэтому, этот метод подходит для он-лайн мониторинга конструкций на Уровнях 1 и 2. Наибольших изменений частот можно ожидать при таких значениях собственных частот, в случае которых места расположения соответствующей максимальной кривизны формы колебаний соответствуют величине повреждения конструкции. Предположение о линейном соотношении между сдвигами частоты и повреждением более не является справедливым при возрастании величины повреждения и увеличении количества поврежденных мест. Из-за сильного влияния окружающей среды на сдвиги частоты, следует выполнять фильтрацию подобных воздействий.

Методы формы колебаний и эксплуатационных отклонений формы

Правдоподобные результаты задач по локализации повреждений (Уровень 2) могут быть получены только в том случае, если количество точек измерения соответствует размерам конструкции. Как правило, этого можно достичь только в случае проведения полевых испытаний (раздел 3.2.5). Признаки повреждения, вычисленные при помощи измерения форм колебаний, базируются на сравнении изменений амплитуды по отношению к точке отсчета. Двумя широко используемыми методами сравнения двух наборов форм колебаний являются критерий модальной сходимости («Modal Assurance Criteria» (MAC)) и критерий координатной модальной сходимости («Coordinate Modal Assurance Criterion» (COMAC)). В зависимости от мест расположения изменений в конструкции непосредственное сравнение форм колебаний может привести к получению лучших данных для решения задач обнаружения и локализации повреждений, по сравнению с методом сдвига частот. Кроме того, чувствительность из-за влияния окружающей среды снижается. Был получен положительный опыт сравнения в случаях испытаний конструкции до и после ремонта. В ходе исследования крупных конструкций применение искусственного возбуждения колебаний зачастую невозможно. В данном случае, для вычисления признаков повреждения используются методы эксплуатационных отклонений формы. Эксплуатационные отклонения формы должны также измеряться в тех случаях, когда повреждение может быть обнаружено только при применении эксплуатационных нагрузок.

Для определения повреждений при наличии локализованного повреждения больший смысл имеет использование кривизны формы колебаний, поскольку теоретически в данном случае образование повреждения носит крайне локальный характер. Параметры кривизны не могут быть измерены напрямую; они могут быть вычислены на основе измеряемых режимов смещения или рассчитаны, исходя из результатов измерения деформаций. В обоих случаях требования относительно точности и количества точек измерения для глобальных исследований зданий труднореализуемы. Функции распределения признаков повреждения на основе модальной кривизны вычисляются методом, аналогичным методу критерия координатной модальной сходимости.

Модальные методы энергии деформации

Расширение модального метода кривизны при помощи формулировки модальной энергии деформации приводит к появлению признака повреждения, который определяется соотношением модальной энергии деформации элементов конструкции до и после повреждения. Данный признак использует модальную кривизну, рассчитанную на основе измеренных форм колебаний при помощи производной второго порядка. Принимая в расчет зашумленные данные, необходимо использовать интерполирующие полиномы для вычисления производных в сочетании со сглаживающими процедурами при помощи методов регуляризации для того, чтобы исключить получение приблизительных значений кривизны. Модальные методы энергии деформации успешно тестируются на балочных конструкциях и опорных плитах балок. Существуют также расширенные версии первоначального метода, в которых используются вариации с признаком повреждения и сценарии множественных повреждений.

Метод вектора усилия-невязки

При использовании измеренных значений собственных частот и форм колебаний для поврежденной системы, а также исходной базовой модели по отношению к конструкции разрабатывается переопределенная система уравнений. Она позволяет определить неизвестные параметры корректировки для исходной модели, описывающие повреждение конструкции. При успешном расширении измеренных форм колебаний метод вектора усилия-невязки кажется устойчивым методом локализации и оценки размеров повреждений.

Амплитудно-частотная характеристика и передаточная функция (АЧХ)

Модальные параметры могут быть получены либо посредством измерений типа «ввод/вывод» или результатов типа «только вывод». Для того, чтобы исключить ошибки в процессе обнаружения повреждений, которые возникают при определении форм колебаний, признаки могут напрямую определяться при помощи измерений амплитудно-частотной характеристики или измеренной проводимости. Различия между исходным состоянием и состоянием повреждения определяются по сдвигу резонансов и антирезонансов в спектре, а также по разности больших амплитуд. Признаки обнаружения повреждения описывают разности амплитуд частотной характеристики для исходного состояния и состояния повреждения. Для локализации повреждения используются соотношения между АЧХ и передаточной функцией. Результаты измерений амплитудно-частотной характеристики могут быть получены при полевых испытаниях, в то время как передаточные функции могут быть измерены только при проведении онлайн мониторинга.

Методы уточнения моделей

Многие методы уточнения моделей используются для определения повреждений. Теоретически при помощи методов уточнения моделей можно решить задачи, связанные с определением повреждений на Уровнях 1-3. Для определения повреждений необходимо наличие действительных изменений физических свойств. Проблемы возникают из-за неоднозначности результирующей модели при сравнении с данными измерений. Когда повреждение влияет как на массовые, так и на прочностные свойства, параметр не может быть однозначно определен лишь посредством использования модальных измерений. В целом, в методике уточнения не рекомендуется использовать только собственные частоты. Для определения повреждений преимущество имеет прямое использование измерений амплитудно-частотных характеристик. Модальные параметры не подлежат обязательному определению, поскольку, в дополнение к этому данные измерений амплитудно-частотной характеристики предоставляют намного больше информации о требуемом частотном диапазоне. Следует избегать плохо обусловленных матриц из-за примыкающих точек в данных амплитудно-частотной характеристики. Для решения этих проблем зачастую рекомендуется делать предположения о месте нахождения и типе повреждения.

Статистические методы

Основная идея этих методов заключается в принятии того факта, что вся значимая информация о состоянии системы, которое влияет на динамическое поведение, содержится в результатах измерения динамической характеристики системы. При данном предположении определение повреждений является задачей статистического распознавания образов, которая может быть решена методами распознавания, не основанными на модели. Можно собрать любую информацию, затрагивающую исключительно соответствующие характеристики, описывающие текущее состояние повреждения. Эти характеристики, полученные при помощи измерений «только выход» в нормальных условиях эксплуатации, распределены с соответствующими численными значениями среднего и дисперсии. Изменение особенностей распределения характеристик означает наличие повреждения, в то время как предполагается, что воздействия изменяют эксплуатационные показатели системы не типичным образом. Эти методы применимы для определения повреждений на Уровнях 1 и 2.

5.5.2.2 Статические методы

Не все типы повреждений могут быть обнаружены при помощи динамических методов с достаточной степенью надежности. В случаях небольшого изменения исходной конструкции и когда повреждение появляется вблизи опор, чувствительность признаков динамического повреждения является низкой. При наложении влияния температурных изменений на измеряемые динамические параметры определение повреждений представляет собой очень сложную задачу.

Для статических измерений всегда требуются условия нагрузки, при которой определение повреждения может быть выполнено при использовании измеренных глобальных параметров. Измерения деформаций в большинстве случаев относятся к исходной точке. Предлагаемым испытанным методом определения повреждений балочных конструкций является использование разностей измеренных углов наклона (Определение повреждений на уровнях 1 и 2). Датчикам угла наклона не нужна исходная точка. Размещение лишь нескольких датчиков обеспечивает надежность в отношении качества и результатов измерений. Нагрузка прилагается при медленном пересечении конструкции грузовиком. Признак повреждения определяется на основе разницы между линиями влияния наклонов в состоянии повреждения и исходном состоянии. Линии влияния могут быть измерены относительно локального разрешения сколь угодно точно. Для оценки данных очень важно снижение шума измеряемых сигналов. Данный метод подходит также для локализации множественных повреждений.

5.6 Определение признаков повреждения посредством измерений

При определении признаков повреждения рекомендуется использовать избыточный метод, в отношении, например, обнаружения повреждений (Уровень 1) с динамическими процессами в дополнение устанавливаются датчики определения повреждений для увеличения информативности результатов. Кроме того, необходимо обратить внимание на тот факт, что зафиксированные признаки повреждений, как правило, включают в себя воздействия окружающей среды, которые должны быть «отфильтрованы» при вычислениях. Высокого пространственного разрешения для измерения изменений формы можно добиться при одновременном использовании либо множества датчиков, либо нескольких, но перемещаемых датчиков, зависящих от стационарного возбудителя. В данном случае используется технология измерения на основе процессов сканирования.

5.7 Оценка повреждений с точки зрения характеристики состояния конструкции

Описание состояния конструкции, прежде всего, ставит своей целью выполнение качественной оценки наблюдаемых, т.е. уже существующих, или недавно обнаруженных повреждений, на предмет

- величины повреждений
- последствий повреждений
- развития повреждений
- причины повреждений

Кроме того, должно рассматриваться их влияние на технические системы (например, изменение статической модели), а также итоговую несущую способность, функциональные возможности, устойчивость и надежность. На основе данных о типе и величине присущих дефектов и повреждений, а также оценки соответствующих механизмов повреждения, затрагивающих актуальную несущую способность, следует выполнить возможные действия по восстановлению и создать план использования конструкции и обеспечения ее безопасности.

5.8 Оценка повреждений с использованием пороговых значений

Простым и испытанным методом оценки измеренных значений параметров состояния является их сравнение с предварительно установленными пороговыми значениями. Эти значения могут быть указаны в нормах и руководствах, а также определены на основе исследований и опыта.

5.8.1 Пороговые значения согласно нормам и руководствам

В нормах проектирования конструкций указаны различные пороговые значения, которых следует придерживаться в период строительства и эксплуатации конструкции.

Если оценочные значения поддаются измерению, они могут использоваться напрямую для оценки результатов мониторинга. Это в особенности относится к ограничению деформации при предельном состоянии эксплуатационной пригодности. В нормах представлены дополнительные предельные значения, которые обеспечивают эксплуатационную пригодность и безопасность конструкции во избежание усталости.

5.8.2 Определение пороговых значений

Если пороговые значения состояния не заданы в нормах или руководствах, они могут быть определены по результатам предварительных исследований, которые, главным образом, представляют собой осмотры и оценку на основе моделей конструкций, а также испытаний материалов.

Для определения пороговых значений требуются убедительные знания о конструктивных связях и соответствующем уровне безопасности.

6 КВАЛИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ

Использование методик, описанных в настоящем Руководстве, может привести к получению полезных результатов только в том случае, если до начала программы измерений выбор оборудования, аппаратуры для исследований и, в особенности, программного обеспечения для выполнения оценки, а также последующая интерпретация результатов и оценка выполняются опытными специалистами. Для этого необходимы экспертные знания в области проектирования зданий и сооружений, опыт испытания конструкций, а также знание методики измерений.

Для обеспечения надежности результатов измерений использование датчиков, выполнение измерений и поддержание работоспособности данной технологии измерения должны выполняться только квалифицированными специалистами под наблюдением экспертов, ответственных за выполнение измерения. Специалисты по проведению измерений должны всегда находиться в распоряжении. Состояние методики измерений должно документироваться.

7 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] fib- bulletin 22, Monitoring and safety evaluation of existing structures, CEB-FIP, 2003 (*Технический документ 22, Мониторинг и оценка безопасности существующих конструкций, CEB-FIP, 2003 год*)
- [2] ISIS Canada, Guidelines for structural health monitoring, Design Manual No.2, 2001 (*ISIS Канада, Рекомендации по мониторингу состояния конструкций, Руководство по проектированию № 2, 2001 год*)
- [3] Merkblatt B9, Merkblatt uber die automatisierte Daueruberwachung, Deutsche Gesellschaft fur zerstörungsfreie Prufung, 2000 (in German) (*Руководство B9, Руководство по автоматизированному непрерывному мониторингу, Немецкого общества по неразрушающим испытаниям, 2000 год (на немецком языке)*)
- [4] Sohn, H. et. al.: A review of structural health monitoring , literature 1996-2001, Los Alamos Laboratory Reports LA-13976-MS, 2003 (*Сон Х. и др.: Обзор мониторинга состояния конструкций, издания за 1996-2001 гг., Отчеты Лос-Аламосской лаборатории LA-13976-MS, 2003 год*)
- [5] Farrar, C.R. et. al.: Damage prognosis:Current status and future needs , Los Alamos Laboratory Reports LA-14051-MS, 2003 (*Фарр С. Р. и др.: Прогнозирование повреждений: текущее состояние и потребности в будущем, Отчеты Лос-Аламосской лаборатории LA-14051-MS, 2003 год*)
- [6] Inman, D.J. et. al.: Damage Prognosis, Wiley 2005 (*Инман, Д. Дж. и др.: Прогнозирование повреждений, Уайли, 2005 год*)
- [7] Balageas,D. et. al: Structural Health Monitoring, ISTE-HERMES SC. Publ., 2005 (*Балагеас Д. и др.: Мониторинг состояния конструкций, издательство ISTE-HERMES SC. Publ., 2005 год*)
- [8] ISO 13822 Bases for design of structures - Assessment of existing structures (*ISO 13822 Основы проектирования конструкций – Оценка существующих конструкций*)
- [9] ISO 14963 Mechanical vibrations and shock - Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts (*ISO 14963 Механические колебания и сотрясения – Руководство по динамическим испытаниям и исследованиям на мостах и путепроводах*)
- [10] ISO 16587 Mechanical vibrations and shock - Performance parameters for condition monitoring of structures (*ISO 16587 Механические колебания и сотрясения – Параметры производительности для мониторинга состояния конструкций*)
- [11] ISO 18430 Condition assessment of structural systems from dynamic response measurement (*ISO 18430 Оценка состояния систем конструкций на основе измерений динамической реакции*)
- [12] ISO 18649 Mechanical vibrations - Evaluation of results from dynamic tests and investigation s of bridges (*ISO 18649 Механические колебания – Оценка результатов на основе динамических испытаний и исследований мостов*)
- [13] EN 1990: Basis of structural design (*EN 1990: Основы проектирования конструкций*)
- [14] DIN 1055-100 Einwirkungen auf Tragwerke (in German) (*DIN 1055-100 Воздействия на конструкции (на немецком языке)*)

- [15] DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von StraBen und Wegen - Uberwachung und Prufung (in German) (*DIN 1076 Инженерные сооружения на улицах и дорогах – Мониторинг и испытания (на немецком языке)*)
- [16] DAfStb-Richtlinie: Belastungsversuche an Betonbauwerken (in German) (*Руководство DAfStb: Испытания нагрузкой бетонных конструкций (на немецком языке)*)
- [17] Carden, E.P., Fanning, P.: Vibration based Condition Monitoring, Journal SHM 3(4), 2004 (*Карден Е.П., Фаннинг П.: Вибрационный мониторинг состояния конструкций, Журнал по мониторингу состояния конструкций 3(4), 2004 год*)
- [18] Farrar, C.R., et al.: Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande. Los Alamos National Laboratories, Tech. Rept. No. LA-12767-MS, 1994 (*Фаррар С.Р. и др.: Динамическая характеристика и выявление повреждений моста I-40 через р. Рио-Гранде. Лос-Аламосские национальные лаборатории, Технический отчет № LA-12767-MS, 1994 год*)
- [19] Fritzen, C.-P., Bohle, Parameter selection strategies on model-based damage detection, Proc. Structural Health Monitoring, Stanford, CA, Sept. 8-10, 1999 (*Фрицен С.-П., Боле, Стратегии выбора параметров по выявлению повреждений на основе модели, Доклад по мониторингу состояния конструкций, Стэнфорд, Калифорния, 8-10 сентября, 1999 год*)

ПРИЛОЖЕНИЕ А. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ, ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПОЛУЧЕННЫЙ ОПЫТ

Приложение А1. Классификация датчиков в соответствии с различными измеряемыми величинами

Измеряемая величина	Тип датчика	Диапазон измерений (мм)	Разрешение	Линейность	Электропитание	Диапазон частот	Факторы влияния
Смещение	Датчик LVDT-типа	1- 50 мм	1‰ диапазона измерений	0,1% диапазона измерений	Переменный ток/постоянный ток	0Гц-0,1кГц	Поперечное усилие Поверхности, отражающие частоту Поперечное усилие в грунте
	LVDT- толщинометр	1- 50 мм	1‰ диапазона измерений	0,1% диапазона измерений	Переменный ток/постоянный ток	0Гц-0,05кГц	
	Триангуляционный датчик LVDT-типа	2- 200 мм	1‰ диапазона измерений	0,3% диапазона измерений	Постоянный ток	0Гц-10кГц	
	Датчик с удлиненным кабелем	50- 40000 мм	1‰ диапазона измерений	0,05% диапазона измерений	Постоянный ток	0Гц-0,5кГц	
Уклон	Пузырьковый уровень	±10 градусов	1‰ диапазона измерений	0,1 градуса	Постоянный ток	0,5 Гц	Вибрации
	Датчик угла наклона маятниковый	± 1 градус	1‰ диапазона измерений	0,05% диапазона измерений	Постоянный ток	0,5 Гц	
Осадка	Гидростатический датчик уровня	0- 60 мм	0,01 мм		Постоянный ток	стационарный 0Гц-0,5кГц	Атмосферное давление, Температурные градиенты Влажность
	Позиционно-чувствительный датчик PSD	0- 90 мм	< 0,05 мм	<1% диапазона измерений	Постоянный ток		
Деформация	Тензометры	1-10000мкм/м	1 мкм/м	<1%	Постоянный ток/переменный ток Лазерное излучение широкого диапазона Лазер белого света Лазерное излучение	0Гц-100 кГц	Температурные градиенты, утечка Температурные градиенты, напряжение при изгибе Температурные градиенты, напряжение при изгибе
	Волоконные решетки Брэгга	±10000мкм/м	1 мкм/м			0Гц-100 кГц	
	Волоконно-оптические интерферометры Фабри-Перо	±5000мкм/м	1 мкм/м			0Гц-1кГц	
	Волоконно-оптические датчики SOFO Оптический кабель	0,5% длины датчика 0,5% длины датчика	2 мкм/м	<1%		стационарный 0Гц-0,1кГц	
Ускорение	Пьезоэлектрические датчики MEMS-A640 V12(дифференциальный мост)	±100g	10 мкг	<1%	Постоянный ток Постоянный ток Переменный ток	0,1Гц– 2кГц	Крепление датчика
		±1g	5 мкг	<1%		0Гц-0,25кГц	
		±20g		1%		0Гц -0,1кГц	
Скорость вибрации	Сейсмометр	100 мм/с	5мкм/с	< 1%	Постоянный ток /переменный ток	4Гц – 1кГц	Крепление датчика
	Лазерный виброметр	10 м/с	1мкм/с	< 1%		1Гц- 20кГц	
Температура	Термопара	-185– 300°C	50 мкв/градК	1%	Постоянный ток		Соединительные провода Температурные градиенты
	Термодатчик Pt 100	-200– 600°C	400мкв/градК	<1%			

Приложение А2. Использование датчиков и полученный опыт

измеряемая величина	тип датчика	установка	полученный опыт
Смещение	Датчики LVDT-типа	простая	Избегать воздействия поперечных усилий Небольшой диапазон рабочих частот Избегать отражающих поверхностей
	LVDТ-толщинометр Триангуляционный датчик LVDT-типа	простая простая	
	Датчик с удлиненным кабелем	простая	
Уклон	Пузырьковый уровень Датчик угла наклона маятниковый	простая простая	Небольшой диапазон рабочих частот
	Гидростатический датчик уровня Позиционно-чувствительные датчики PSD	сложная сложная	
Напряжение	Тензометры	сложная	Для краткосрочных измерений деформации Для продолжительных измерений
	Волоконные решетки Брэгга Волоконно-оптические интерферометры Фабри-Перо Волоконно-оптические датчики SOFO Оптический кабель	сложная сложная сложная	
		простая	
Ускорение	Пьезоэлектрические датчики MEMS-A640 B12 (дифференциальный мост)	простая простая простая	Устойчивый к наводкам
	Сейсмометр	простая	
Скорость вибрации	Лазерный виброметр	простая	Надежный, устойчивый к наводкам более надежный приемник Не применим для систем мониторинга
	Термопара Термодатчик Pt 100	сложная простая	

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА МОСТАХ

Задача:

В зависимости от количества полос движения определить и классифицировать статические и динамические временные нагрузки на мосту с семью пролетами, построенном из предварительно напряженного бетона.

Методика:

Основная идея представленного метода заключается в использовании моста в качестве противовеса. Нагрузки от транспортных средств вычисляются на основе измеренных деформаций в соответствующих участках главных балок моста.

На первом этапе должна быть разработана достоверная модель нагрузки. Для этой цели во время прохождения транспортного средства с хорошо известной геометрией и нагрузками на мост измеряются линии влияния деформации. На втором этапе эти линии влияния измеряются и сохраняются, а полученная информация собирает в себе наиболее важные возможные комбинации транспортных средств, проходящих по мосту. Возможные варианты таких комбинаций могут быть следующими: одно транспортное средство следует за другим, одно транспортное средство движется рядом с другим, одно транспортное средство следует за другим и одновременно движется рядом с другим и т.д. Данная информация формирует базовые модели для дальнейшего автоматического распознавания этих моделей.

В ходе работы измеряется деформация, вызванная весом проходящих транспортных средств, а также посредством распознавания моделей определяются комбинации транспортных средств. После этого с помощью разделения измеряемых сигналов методом Фурье определяются статическая и динамическая часть нагрузок от транспортных средств. С помощью низкочастотной фильтрации сигналов с частотой, находящейся на уровне ниже первой собственной частоты моста, определяются статические значения деформации моста. Соответствующая методика применяется и к динамической части (см. рис. 3). Динамический коэффициент определяется как отношение общей максимальной амплитуды к связанным максимальным значениям статической амплитуды.

Результаты:

Одним из результатов определения нагрузки является репрезентативная статическая нагрузка для каждой полосы движения. На рис. 4 наглядно представлена частота выявленных нагрузок от транспортных средств,

разделенных на классы нагрузки, за период времени с 1994 по 2004 гг. При помощи подобных постоянно регистрируемых данных могут быть определены конкретные модели нагрузок, обновляемые для каждого моста.

Подобным образом определяется динамический коэффициент α . На рис. 6 показано изменение коэффициента α во времени за период 10 лет. α определяется как функция величины веса транспортных средств. Данная информация о нагрузках от транспортных средств может быть использована для расчета всех фактически возникающих напряжений на мостах с их развитием во времени посредством моделей конечных элементов. С помощью данных результатов можно вычислить остаточный срок службы конструкций. На рис. 5 показано, что динамический коэффициент α может рассматриваться относительно частоты его возникновения посредством статистического распределения. Последнее меняется со временем и является источником информации о размере напряжений, обусловленных усталостью. На рис. 6 показано, что динамический коэффициент даже с пониженной частотой вполне может достигать значительно больших значений, чем его основное значение.

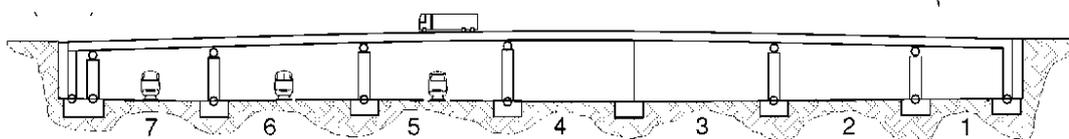


Рис. 1. Западный мост в Берлине, Германия

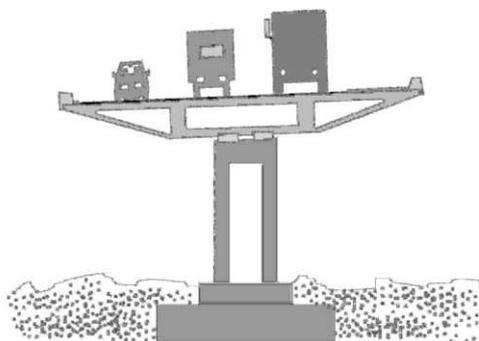


Рис. 2. Поперечное сечение испытываемого моста

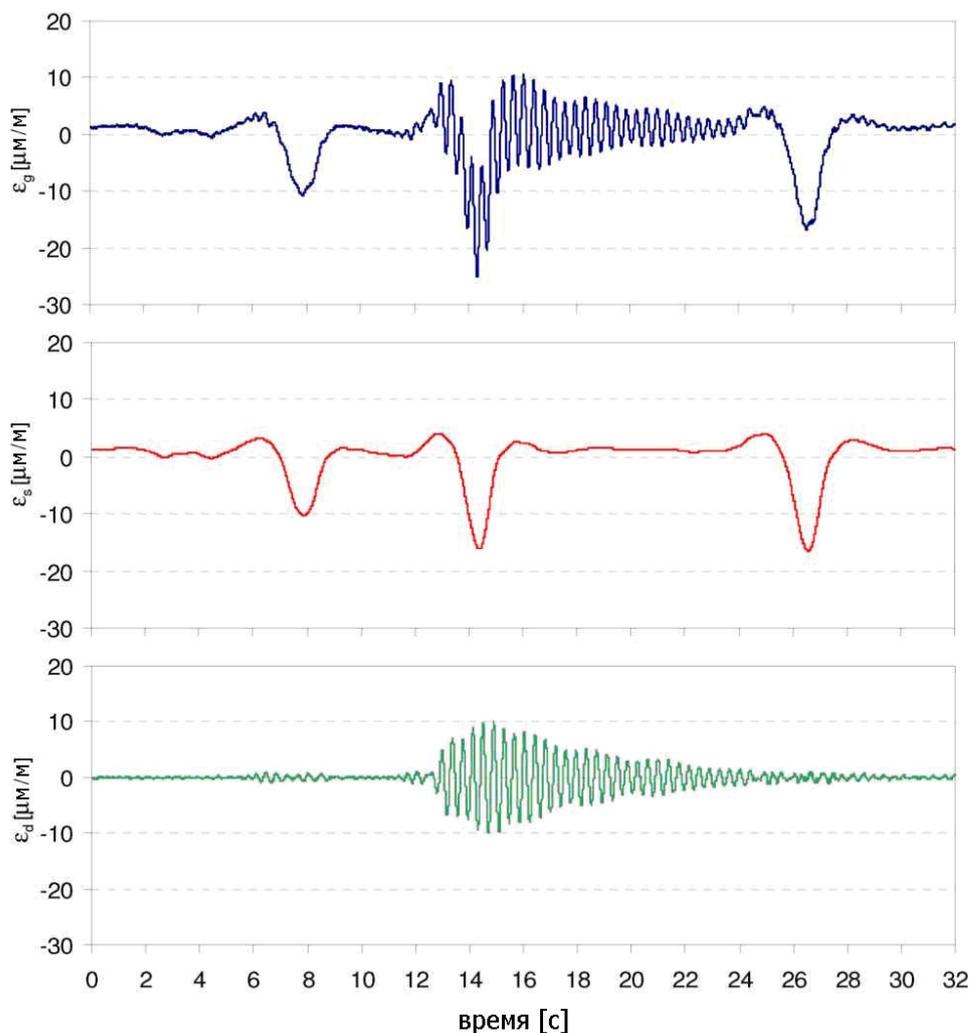


Рис. 3. Разделение комбинированной нагрузки (вверху) на ее статическую (в центре) и динамическую (внизу) части

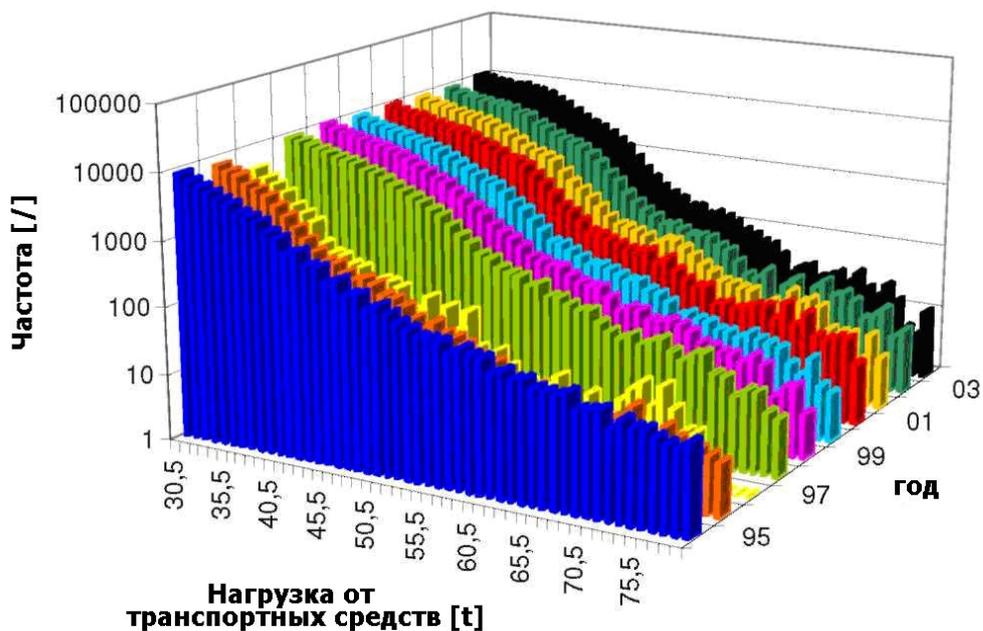


Рис. 4. Частота определяемых нагрузок от транспортных средств в диапазоне между 30 и 80 тоннами со временем в период с 1994 по 2005 гг.

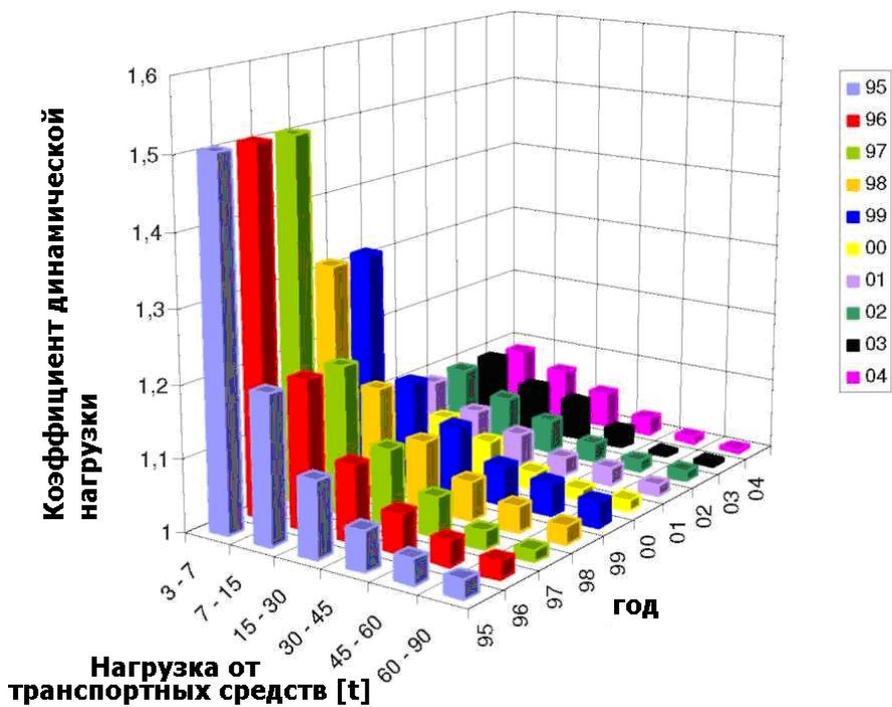


Рис. 5. Развитие коэффицента динамической нагрузки \square в зависимости от измеряемых нагрузок от транспортных средств со временем в период с 1995 по 2004 гг.

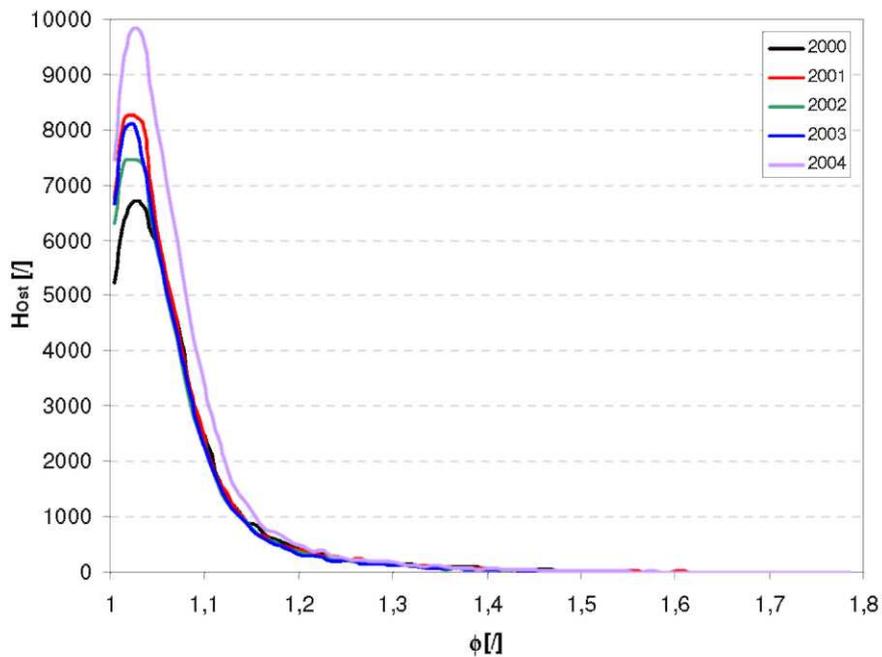


Рис. 6. Распределение частот коэффицента нагрузки и их вариации в период с 2000 по 2004 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ С. МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Задача:

Под Бранденбургскими воротами проводится строительство новой линии метро (прокладка тоннеля). В ходе работ должен проводиться постоянный мониторинг состояния данного памятника с целью обнаружения изменений и повреждений конструкции и ее фундамента.

Методика:

Прокачка тоннеля в грунте, как правило, вызывает колебания у памятника и осадку фундамента. Это может привести к повреждению несущей конструкции или исторического фундамента. Поэтому в дополнение к локальному мониторингу уже существующих трещин преимущественно используются динамические датчики для глобального наблюдения. Повреждение определяется на основании результатов мониторинга колебаний и на основании наблюдения за собственными частотами. Кроме того, перед началом и после окончания строительных работ проводится экспериментальный модальный анализ с целью получения информации о повреждениях конструкции вследствие изменений типа колебаний по сравнению с базовым состоянием. Амплитуды колебаний при отклике объекта, приведенные в возбуждение нормальным движением транспорта до начала и после окончания строительных работ, используются в качестве дополнительных показателей изменений в непосредственной близости от фундамента.

Результаты:

Результаты мониторинга показывают изменения динамических характеристик Бранденбургских ворот примерно к тому времени, когда прокачка тоннеля в грунте достигла фундамента (Рис. 4). На спектре мощности (Рис. 3) наблюдается уменьшение собственных частот. Таблица 1 показывает, что это изменение составляет около 10% для первой собственной частоты и до 25% для четвертой собственной частоты. Представленные результаты измерений были получены в контексте соответствующего экспериментального модального анализа. На рис. 6 видно, что тип колебаний №1 проявляет изменения согласно направлениям движения. До начала работ тип колебаний №1 имел исключительно горизонтальный компонент. После окончания строительных работ тип колебаний уже содержал дополнительную боковую составляющую и, таким образом, дополнительную модальную степень свободы (Рис. 6).

Эта тенденция подтверждается и результатами измерений колебаний в фундаменте ворот. На рис. 5 показана корреляция амплитуд колебаний FR (по горизонтали) и FL (по вертикали). Данные результаты содержат все частоты спектра возбуждения. Они также показывают тенденцию увеличения амплитуд в боковом направлении после окончания строительных работ.

Предполагается, что прокачка тоннеля изменила состояние жесткости фундамента. Особенно такие изменения заметны в глобальном динамическом поведении конструкции. Более подробная информация, необходимая для оценки данных изменений, должна быть получена в ходе дополнительных исследований фундамента посредством моделирования методом конечных элементов.



Рис. 1. Строительные работы рядом с Бранденбургскими воротами в Берлине, Германия

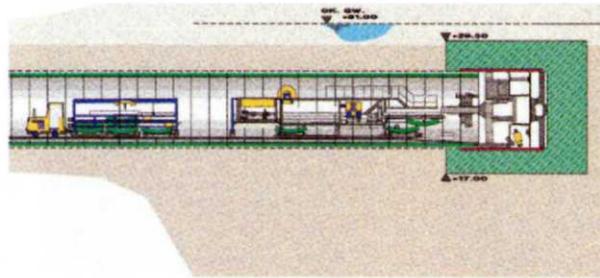
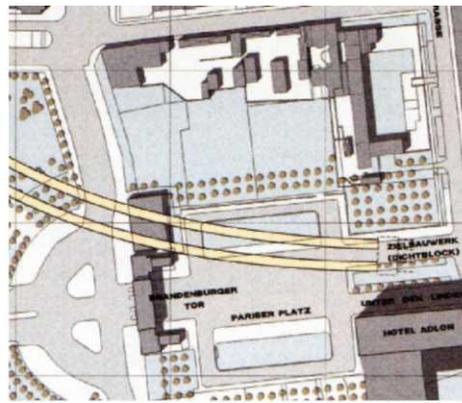


Рис. 2. Прокладка тоннеля новой линии метро под памятником

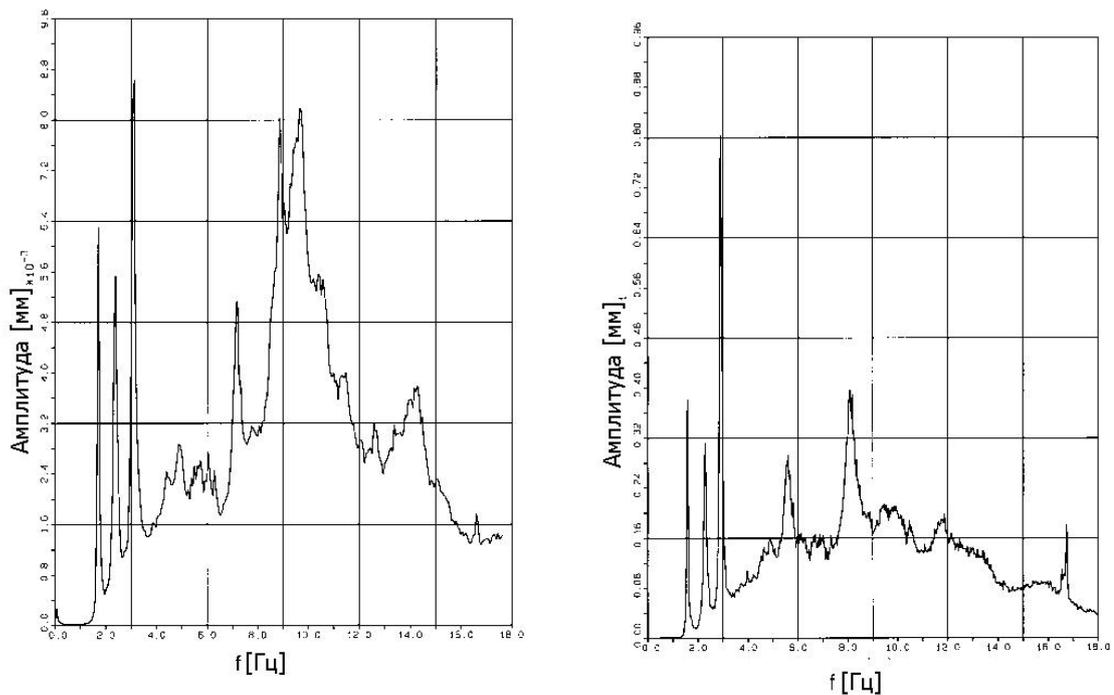


Рис. 3. Спектр мощности и собственные частоты памятника в сравнении до (слева) и после (справа) строительных работ

Номер	Собственные частоты [Гц]	
	до	после
1	1,77	1,59
2	2,44	2,29
3	3,17	2,90
4	7,26	5,80
5	8,91	8,2 – 8,4

Таблица 1. Результаты метода собственных частот, показывающие изменения в динамическом характере работы конструкции

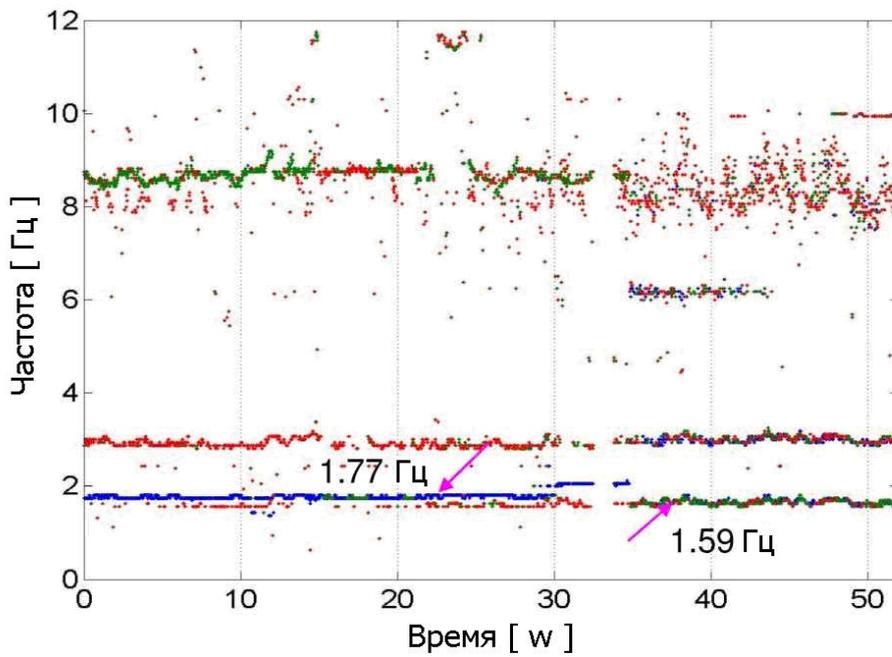


Рис. 4. Результаты непрерывного мониторинга показывают изменения первой собственной частоты после приблизительно 30 недель наблюдений

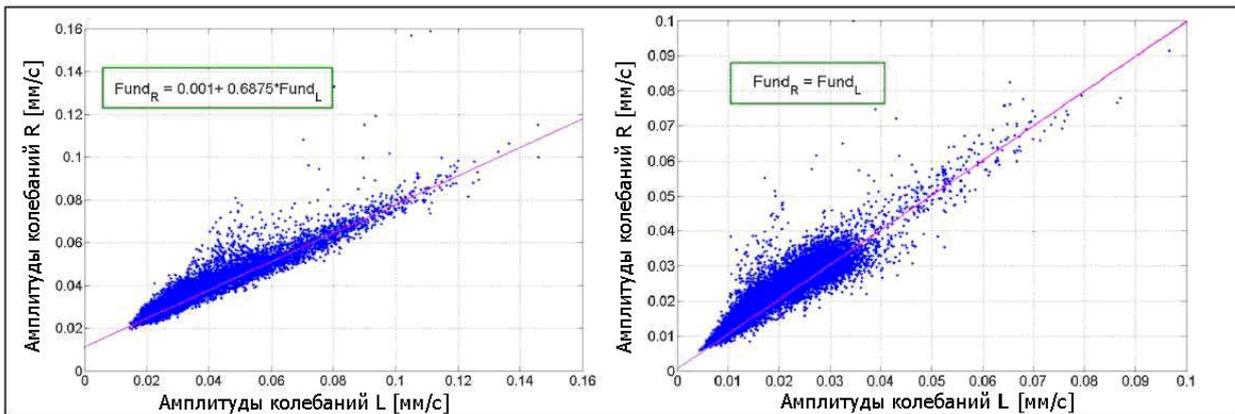


Рис. 5. Отношение амплитуд колебаний FR/FL, измеренных в фундаменте, демонстрирует изменения в конструкции

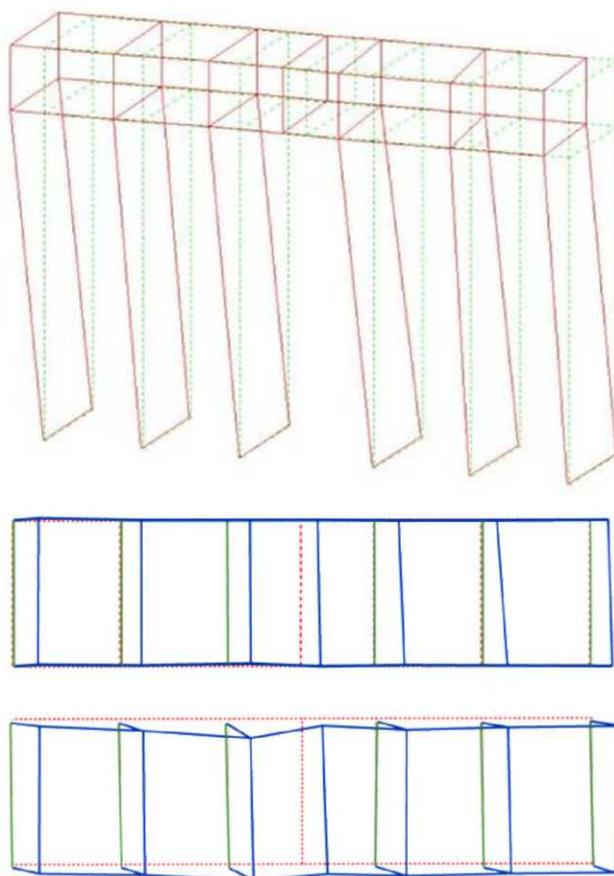


Рис. 6. Сравнение первого типа волны, измеренного до и после строительных работ

ПРИЛОЖЕНИЕ D. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОНСТРУКЦИИ

Задача:

В верхнем строении кирпичного железнодорожного моста при визуальном осмотре были обнаружены трещины. С помощью системы мониторинга следует провести наблюдение за изменением ширины трещин под воздействием временных нагрузок и температур. Кроме того, следует определить тенденции развития повреждений. Помимо этого следует измерить статическое напряжение, вызванное нагрузками от собственного веса конструкции, а также возможные изменения несущей способности, выступающей в качестве функции изменений конструкции (трещины и усадка), а также воздействие температуры.

Методика:

Общая длина моста составляет 750 метров, мост стоит на 34 арках (Рис. 1). Датчики и измерительное оборудование для непрерывного мониторинга расположены в двух из этих арок (Рис. 2). Измеряемыми переменными, используемыми для мониторинга, являлись изменения ширины трещин, напряжения, колебания и температуры. Усадка опор была определена посредством геодезических измерений в определенные промежутки времени. Сбор данных проводился непрерывно и без остановок. Первоначальная оценка данных с целью их обработки уже была проведена на месте. Преимущественно были определены статистические характеристические значения. С помощью анализа Фурье результаты измерений могли быть разделены в зависимости от воздействия (усадка, температура, движение). Причины повреждения могли быть проанализированы с помощью корреляционных функций.

Результаты:

Как правило, контролируемые изменения ширины трещин преимущественно зависят от температуры и являются обратимыми. Также были измерены изменения ширины трещин под проходящими поездами, но они оказались сравнительно небольшими и не повлияли на изменения характеристик конструкции. Максимальные изменения ширины трещин при температуре составляют 9 мм в годовом цикле, в то время, как при временной нагрузке они составляли всего 0,13 мм. Было заявлено, что трещина проходит через все поперечное сечение и, что оно движется как твердое тело (Рис. 3), при этом w_1 и w_2 - это ширина трещин на двух противоположных сторонах верхнего строения. Ремонтные работы не имеют никакого воздействия в отношении трещин. Изменения ширины трещин может быть описано в хорошем приближении посредством линейной корреляции с температурой объекта: $w \cong -0,3 \cdot T$. Воздействие измеренной усадки на изменение ширины трещины не было определено.

В связи с локальным и зависящим от температуры изменением распределения напряжения (Рис. 5) было сложно осуществить измерение репрезентативной деформации кирпичной кладки. Для хороших результатов мониторинга целесообразно использовать датчики с достаточной длиной измерения сравнительно с размерами кладки.

Сравнивая измеряемую деформацию в связи с временными нагрузками и температурой, можно отметить, что их отношение - 1:100. С учетом этого факта становится ясно, что температура является решающим расчетным вариантом нагрузки для оценки напряжения моста (Рис. 4).

Динамические измерения позволяют контролировать движение поездов в плане их расписания и модели проходящего поезда (Рис. 6). Эти знания необходимы для сравнения результатов, полученных вследствие нагрузок от транспорта. Колебания, вызванные транспортом способны привести в возбуждение собственные частоты моста (Рис. 6). Модальные данные, измеренные с помощью методики мониторинга состояния как базовая информация для конструктивной оценки, зависящей от повреждения.



Рис. 1. Железнодорожный мост "Neiße", Германия

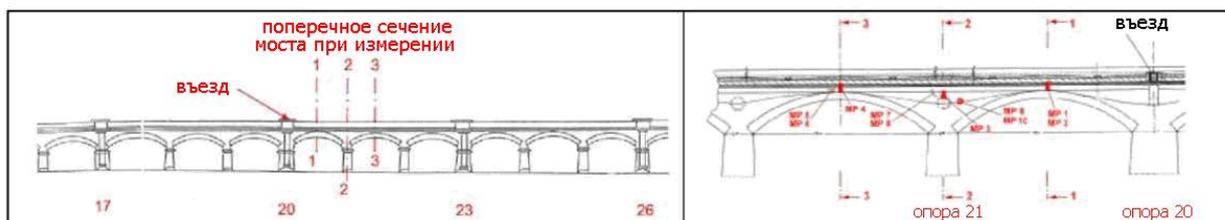


Рис. 2. Поперечные сечения (слева) и места установки датчиков (справа)

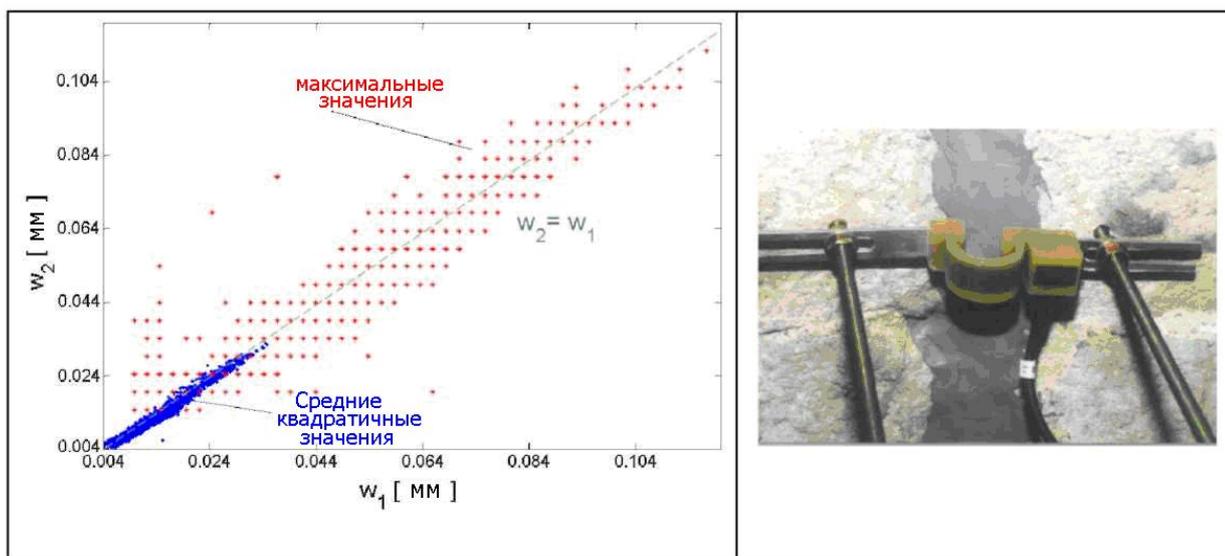


Рис. 3. Сравнение ширины трещин w_1 и w_2 (слева), датчик, используемый для измерения ширины больших трещин (справа)

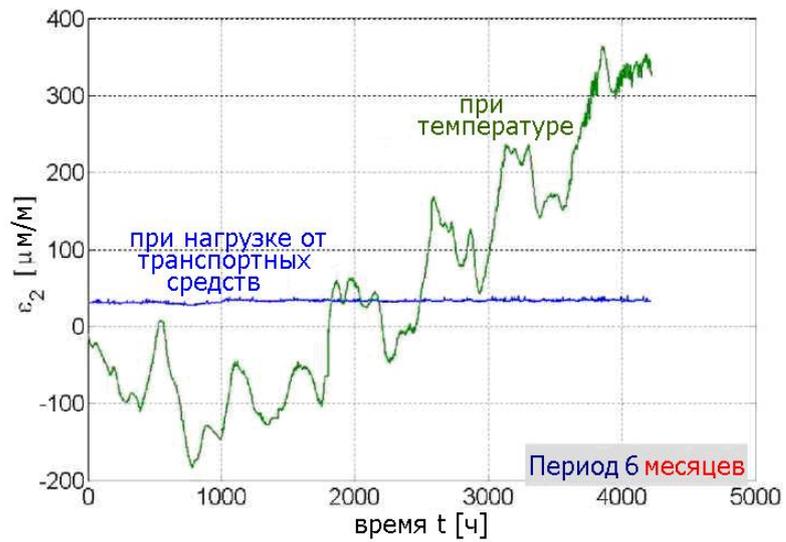


Рис. 4. Измеряемая деформация, обусловленная воздействием нагрузки от транспортных средств и температурой

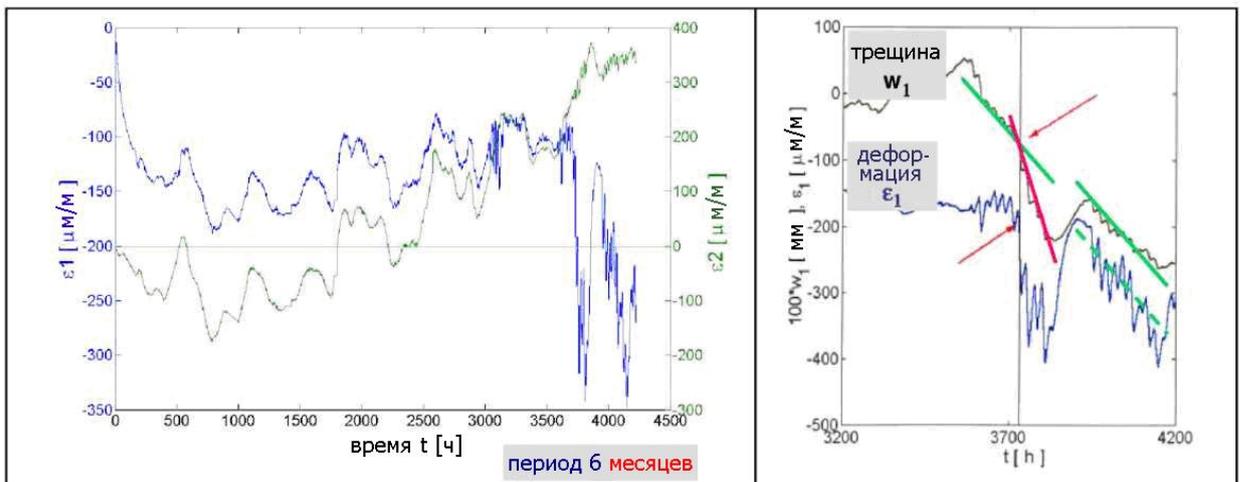


Рис. 5. Измеряемая деформация в двух местах одного и того же поперечного сечения, обусловленная температурой (слева), наблюдаемое резкое изменение деформации, вызванное резким изменением ширины трещины (справа)

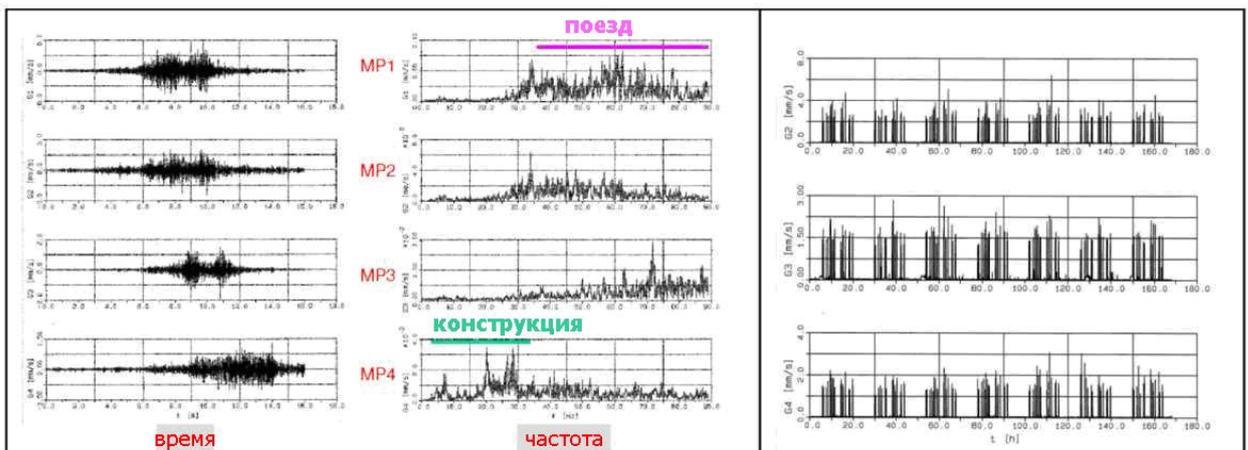


Рис. 6. Прохождение поезда и соответствующие возбужденные частоты, контролируемые прохождения поездов в течение одной недели

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЬНОГО МОСТА ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Задача:

Для моделирования развития усталостных трещин в сварных швах было искусственно создано развивающееся повреждение трехпролетного стального моста (рис. 1 и 2). На основе результатов динамических измерений для неповрежденного и поврежденного состояний следует определить место расположения и степень повреждения [18].

Методика:

При помощи вибрационной установки было выполнено возбуждение колебаний моста в диапазоне 2-12 Гц с максимальной амплитудой усилия приблизительно 8900 Н. В 26 точках измерения были измерены ускорения в вертикальном направлении (рис. 3 и 4). На основе этих результатов при помощи экспериментального анализа форм колебаний были определены собственные частоты и формы колебаний. Модальные параметры были использованы для подтверждения моделей конечных элементов для неповрежденного состояния. Амплитудно-частотные характеристики (рис. 4) показывают степень соответствия динамических характеристик модели реальной ситуации. Для оценки повреждений используется вектор невязки с шестью собственными частотами и первыми двумя формами колебаний. Насчитывается до 1080 свободных параметров для локализации повреждений на первом этапе. Для уменьшения количества свободных параметров, и, таким образом, для локализации повреждений была использована двухэтапная процедура разложения [19].

Результаты:

Что касается модели конечных элементов, то на рис. 5 показан результат локализации повреждений, полученный в процессе уменьшения количества параметров. При помощи процесса непрерывного уточнения может быть расширена модель конечных элементов для состояния повреждения. Знание параметров чувствительности позволяет количественно определить степень повреждения. Результаты вычислений хорошо воспроизводят состояние повреждения моста с технической точки зрения.

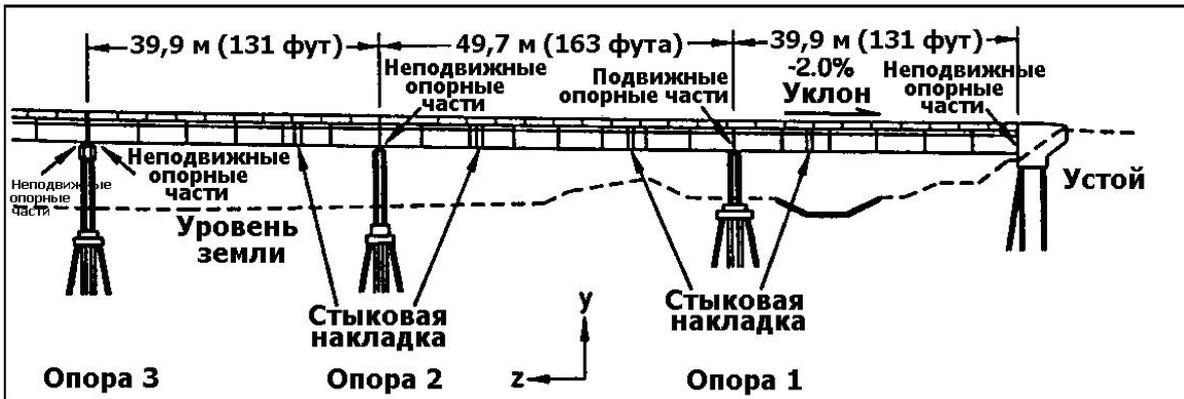


Рис. 1. Автодорожный мост I-40, Нью-Мексико, США

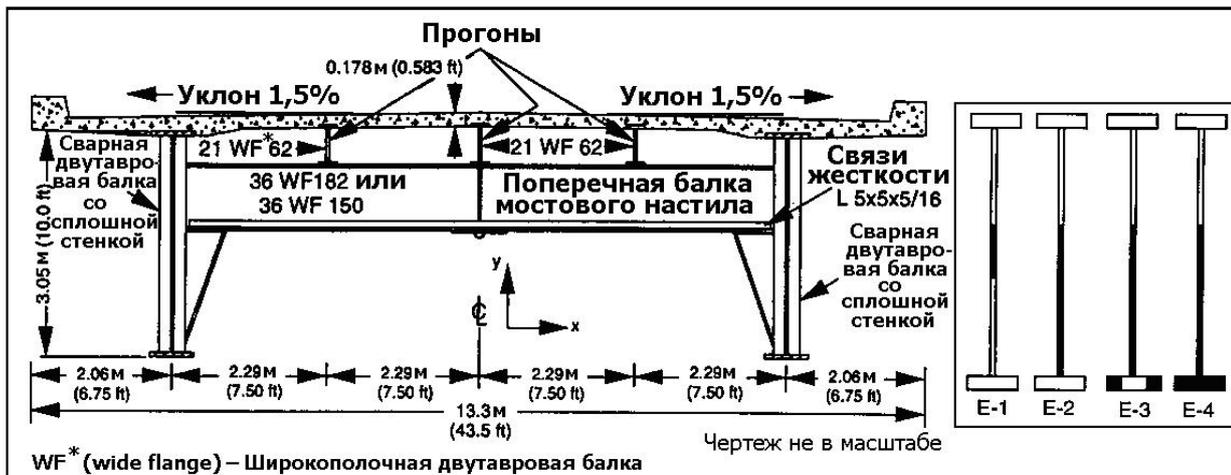


Рис. 2. Поперечное сечение испытываемого моста (слева), сценарии повреждения (справа)

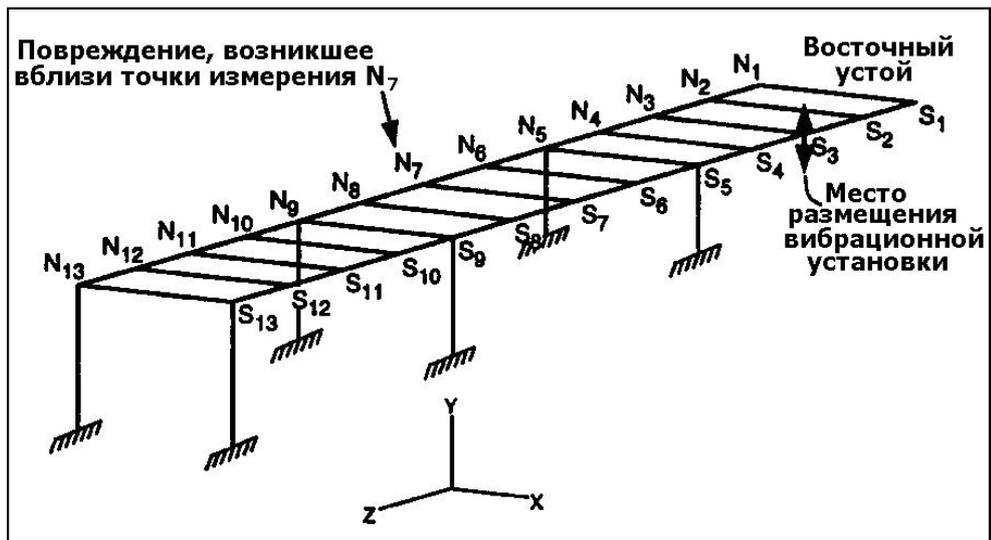


Рис. 3. Сеть датчиков вдоль балки моста

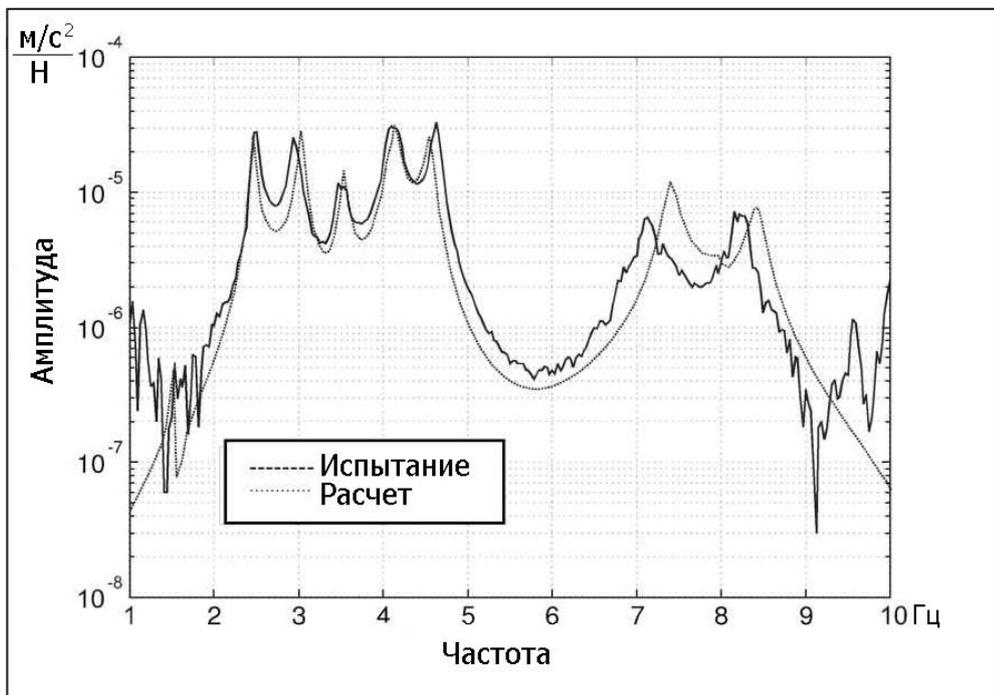
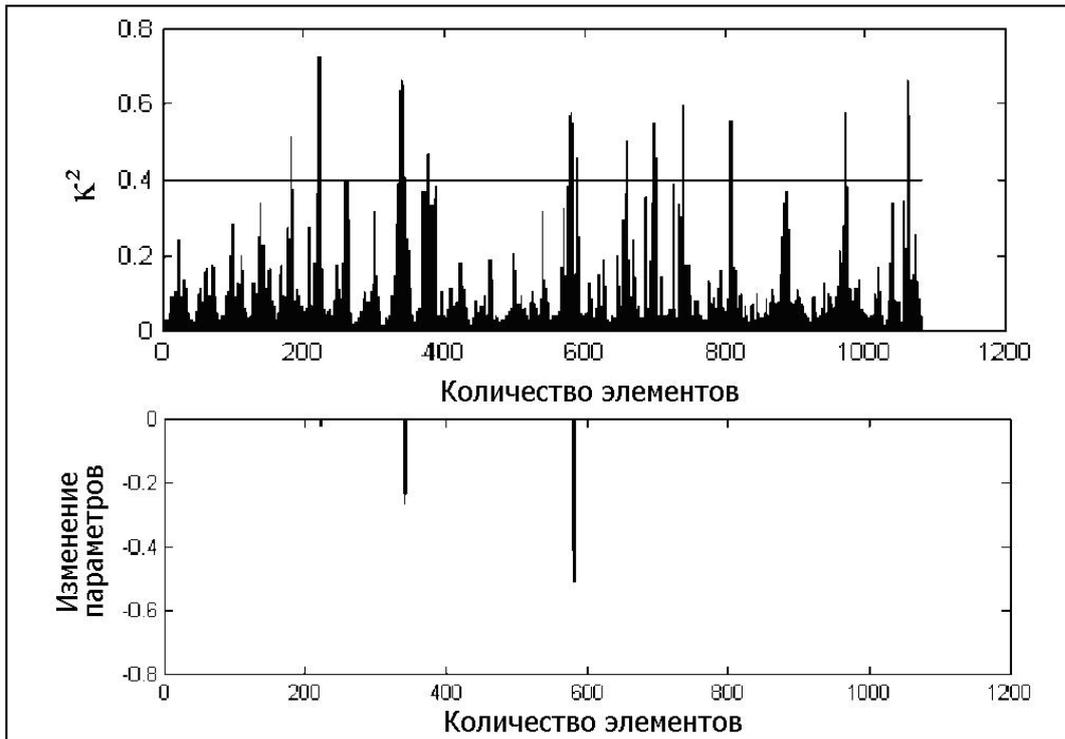
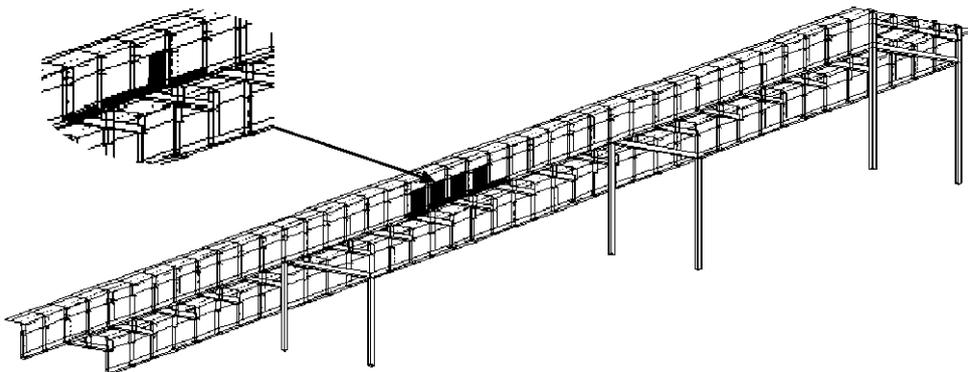


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика в точке измерения N_7



**Рис. 5. Признак повреждения² в сравнении с параметрами модели (см. выше),
Локализация повреждения: результаты после уменьшения
количества параметров (см. ниже)**



**Рис. 6. Обнаруженное повреждение и вычисленные изменения жесткости,
полученные при помощи уточнения модели конечных элементов**