Хазанов Михаил Львович. Анализ напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций с использованием компьютерной измерительной системы : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.11, 05.13.06 / Хазанов Михаил Львович; [Место защиты: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т)].- Москва, 2007.- 131 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/4212

**61:07-5/4212**

Российская Федерация

**московский автомобильно-дорожный институт**

**(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

***На правах рукописи***

Хазанов Михаил Львович

**Анализ напряженно-деформированного состояния  
мостовых конструкций с использованием компьютерной  
измерительной системы**

Специальности:

05.23.11 - «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэ-  
родромов, мостов и транспортных тоннелей»

05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и

производством (по отраслям)»

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель - доктор технических наук А. И. Васильев**

**Москва -2007**з

**СОДЕРЖАНИЕ**

Список терминов и сокращений 5

[Введение 6](#bookmark3)

1. Развитие методов и средств исследования НДС мостовых конструкций.... 12
   1. [Исторический обзор измерений в мостостроении 12](#bookmark5)
   2. [Современное состояние методов анализа НДС 14](#bookmark6)
      1. [Моделирование 14](#bookmark7)
      2. [Натурные испытания 16](#bookmark8)
   3. [Методы и приборы для измерений НДС конструкций 19](#bookmark9)
      1. [Тензодатчики 22](#bookmark10)
      2. [Инклинометры 30](#bookmark11)
      3. [Электронные прогибомеры 33](#bookmark12)
2. [Компьютерные измерительные системы (КИС) 36](#bookmark13)
   1. [Краткий обзор компьютерных измерительных систем 36](#bookmark14)
   2. [Компьютерная измерительная система «КИС-ИМИДИС» 38](#bookmark15)
      1. [Описание аппаратной части «КИС-ИМИДИС» 38](#bookmark16)
      2. [Описание программного обеспечения «КИС-ИМИДИС» 51](#bookmark18)
3. Использование «КИС-ИМИДИС» при испытаниях инженерных

сооружений 59

* 1. Технология измерений 60
     1. Статические испытания 60
     2. [Динамические испытания 71](#bookmark20)
     3. [Оценка опасности резонансных явлений 85](#bookmark21)

1. [Мониторинг мостовых конструкций с использованием КИС 91](#bookmark22)
   1. [Задачи мониторинга 91](#bookmark23)
   2. [Мониторинг в процессе строительства 91](#bookmark24)
      1. [Особенности поведения опор в процессе надвижки 92](#bookmark25)
      2. Измерение НДС пролетного строения в процессе его надвижки . 102
   3. [Мониторинг НДС эксплуатируемых мостов 105](#bookmark27)
      1. [Мониторинг НДС моста через р. Волгу в г. Кинешме 105](#bookmark28)
      2. [Мониторинг НДС моста через р. Гуселку в г. Саратове 110](#bookmark29)
      3. Мониторинг моста Александра Невского через р. Неву в г. Санкт-

Петербурге 114

[Заключение 121](#bookmark32)

[Литература 124](#bookmark33)

**Список сокращенйй**

аналого-цифровой преобразователь; компьютерная измерительная система; линейный датчик перемещений метод конечных элементов;



















Московская монорельсовая дорога; напряженно-деформированное состояние; прибор с зарядовой связью (разновидность набора фотоэлемен­тов). Используется в сканерах и видеокамерах; цифро-аналоговый преобразователь;

протокол обмена данными через последовательный порт ком­пьютера;

**Введение**

*Актуальность исследований.* Для повышения надежности возводимых инженерных сооружений, эффективности применяемых материалов, конструк­тивных и технологических решений проводится большой объем эксперимен­тальных исследований. Основной задачей таких исследований является полу­чение реальной картины напряженно-деформированного состояния (НДС), как отдельных конструкций, так и сооружения в целом при различных внешних воздействиях [53].

В связи со значительным темпом роста автомобильного движения в по­следнее время увеличивается объем строительства автомобильных дорог, в том числе идут интенсивные работы по восстановлению и реконструкции старых мостов для приведения их грузоподъемности и пропускной способности в соот­ветствие современным требованиям. Сложные условия строительства мостов в больших городах (мало места для строительной площадки, невозможность уст­ройства временных опор без перекрытия и так сильно затрудненного движения автомобилей) вынуждают использовать в мостостроении оригинальные конст­рукции и новейшие технологии, которые требуют большого объема контроль­ных измерений и дополнительного анализа НДС.

Таким образом, эффективное определение НДС мостовых конструкций, как в процессе строительства, так и при различных типах испытаний и в про­цессе эксплуатации становится весьма актуальным.

*Цель работы* заключается в совершенствовании методов анализа НДС мостовых конструкций от внешних статических и динамических воздействий по результатам натурных исследований за счет использования современных приборов, измерительных систем, методик проведения испытаний и анализа полученных данных.

Для оценки НДС мостовых конструкций в процессе испытаний необхо­димо измерять напряжения от испытательной нагрузки в характерных сечениях наиболее нагруженных элементов, прогибы пролетных строений, периоды их свободных колебаний, динамические коэффициенты. В некоторых случаях не­обходимо также определять декременты колебаний, а в вантовых и висячих мостах еще и усилия в канатах. Могут также возникать потребности определе­ния напряжений в опорах и величины отклонения верха опор при резком тор­можении движущейся испытательной нагрузки или от изменения температуры окружающей среды. При испытаниях эксплуатируемых мостов иногда возника­ет потребность определения зависимости раскрытия трещин или смещения од­них блоков пролетного строения относительно других от величины и положе­ния испытательной нагрузки.

Для упомянутых измерений применяют специальные приборы: тензомет­ры, прогибомеры, инклинометры, различные геодезические приборы и т.п.

Для оценки НДС мостовых сооружений даже в наше компьютерное время продолжают широко использоваться разнообразные механические приборы.

К достоинствам этих приборов относятся простота конструкции и спосо­ба установки, надежность, ненадобность источников электропитания, необхо­димых для работы электронных приборов. Последнее преимущество становит­ся все менее актуальным, т.к. практически на всех мостах имеется осветитель­ная электросеть. Кроме того, имеется большой набор различных бесперебойных источников питания и малогабаритных генераторов, работающих в автономном режиме.

Главными недостатками механических приборов являются: невозмож­ность вести запись в реальном масштабе времени[[1]](#footnote-1) и необходимость иметь во время испытаний возле каждого прибора или компактно расположенной груп­пы приборов наблюдателя, который должен записывать их показания. При этом достаточно велика вероятность субъективных ошибок (неправильное чтение показаний приборов, ошибки при записи и т.д.). Если приборы установлены в труднодоступных местах, то съем показаний отнимает значительное время, что приводит к увеличению времени испытаний, а значит к их удорожанию. Кроме того, такой способ ведения записи данных затрудняет проведение их экспресс­анализа непосредственно в процессе испытаний.

Таким образом, все более актуальным становится использование компью­терных измерительных систем (КИС) для сбора и обработки данных в процессе испытаний. Если же требуется осуществить мониторинг, т.е. длительное на­блюдение за состоянием исследуемого сооружения, то КИС оказывается един­ственно приемлемой, т.к. она позволяет не только полностью отказаться от многочисленных наблюдателей, но и может снабжаться системой принятия ре­шения для автоматического предотвращения критических ситуаций.

Таким образом, на современном этапе исследование НДС мостовых кон­струкций наиболее эффективно с использованием КИС. Это позволяет более глубоко анализировать экспериментальные данные и находить оптимальные решения по повышению надежности мостов.

Для достижения поставленной в диссертации цели необходимо решить ряд задач:

1. Сформулировать требования к измерительной системе, позволяющей определять напряженно-деформированное состояние мостовых кон­струкций в условиях строительства, испытаний и в процессе монито­ринга с максимальной эффективностью.
2. Разработать методику проведения исследований НДС мостовых кон­струкций с помощью выбранной измерительной системы.
3. Разработать методику обработки полученных данных измерений, по­зволяющую дать однозначную оценку состояния исследуемых конст­рукций.
4. На основе этих методик выполнить анализ особенностей НДС для со­временных конструктивно-технологических решений и дать рекомен­дации по учету этих особенностей как при проектировании, так и в процессе строительства.

*Научная новизна* работы состоит в следующем:

g

* разработана компьютерная измерительная система «КИС-ИМИДИС», в рамках которой был создан ряд электронных датчиков, две системы пе­редачи данных (проводная и радио) и пакет программ для управления системой и обработки полученных результатов;
* разработаны методики анализа результатов статических и динамиче­ских испытаний мостовых сооружений с помощью созданной автором специальной многофункциональной программы «Спектр»;
* разработан математический аппарат оценки опасности резонансных яв­лений при воздействии нагрузок от автомобилей и пешеходов;
* выявлен ряд важных аспектов в поведении мостовых конструкций в процессе строительства и эксплуатации, которые необходимо учиты­вать на стадии проектирования и строительства.

*Степень обоснованности и достоверности* полученных результатов в работе подтверждена фактическими данными обследования, испытания и науч­ного сопровождения строительства многих мостов, причалов и других инже­нерных сооружений, проведенных ЗАО «Институт ИМИДИС», ОАО ЦНИИС и МАДИ (ГТУ).

Метрологическая чистота «КИС-ИМИДИС» подтверждена сертификатом Госстандарта № РОСС ІШ.АЯ46.А01651. Корректность разработанного про­граммного обеспечения проверена на ряде контрольных примеров.

*Практическая ценность работы.* В процессе эксплуатации «КИС- ИМИДИС» был создан ряд сервисных программ, позволяющих оперативно вы­числять необходимые параметры испытываемых конструкций и вести испыта­ния или контроль в диалоговом режиме.

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных о ра­боте мостовых конструкций при строительстве и эксплуатации сформулирован ряд рекомендаций для организаций, занимающихся проектированием, эксплуа­тацией и испытаниями мостовых сооружений.

Проведенные исследования показали, что при монтаже, испытаниях и мониторинге мостовых сооружений наиболее прогрессивным инструментом

являются компьютерные измерительные системы, работающие в реальном масштабе времени. Использование разработанной автором «КИС-ИМИДИС» значительно повысило информативность получаемых измерений и облегчило научное обоснование результатов.

Предложенная математическая модель поведения опор моста в процессе монтажа пролетного строения методом тыловой сборки и продольной надвиж­ки с использованием аванбека позволяет правильно организовать технологию надвижки, мониторинг НДС в её процессе и предотвратить опасные нештатные ситуации.

Методика анализа резонансных явлений позволяет определять, в каких случаях период свободных колебаний пролетного строения, определенный в СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы» [37] как запрещенный, не представляет опасности, а в каком случае опасность существует, хотя все нормы соблюдены.

Внедрение в практику испытаний и мониторинга НДС мостов и других инженерных сооружений компьютерных измерительных систем значительно снижает стоимость этих работ за счет сокращения количества персонала и ис­пользуемой техники при испытаниях и снижения риска возникновения нештат­ных ситуаций при мониторинге.

*Апробация и внедрение.* Основные концепции и результаты исследова­ний доложены и обсуждены на многих научно-технических конференциях, наиболее крупные из которых, это межрегиональная конференция «Эксплуата­ция искусственных сооружений, программные средства по экспертизе и анали­зу конструкций» в Санкт-Петербурге (2004 г.) и 63-я международная конферен­ция МАДИ-ГТУ (2005 г.). Результаты работы используются в повседневной практике испытания мостов в ЗАО «Институт ИМИДИС», в ОАО ЦНИИС и МАДИ (ГТУ).

*Публикации.* Результаты исследований по теме диссертации опубликова­ны в пятнадцати научных статьях, в том числе в шести патентах на изобретения и полезные модели.

*Структура и объем диссертации.* Диссертация состоит из введения, че­тырех глав и заключения.

*Первая глава* посвящена описанию исследуемых параметров мостовых конструкций и развитию измерительных приборов и систем для определения их НДС.

*Вторая глава* содержит обзор существующих измерительных комплексов и описание аппаратной и программной частей компьютерной измерительной системы «КИС-ИМИДИС».

*Третья глава* подробно описывает практику использования «КИС- ИМИДИС» при приемочных испытаниях. Даются рекомендации по методике проведения испытаний и по способам анализа полученных результатов. Приво­дятся примеры выявления дефектов конструкций по результатам анализа дина­мических испытаний.

*Четвертая глава* посвящена проблемам мониторинга при строительстве и эксплуатации мостов. Показано, как эти проблемы решаются при помощи компьютерной измерительной системы.

В *Заключении* обобщены полученные научные и практические результаты и даются выводы и рекомендации.

Количество станиц 128, рисунков 83.

**Заключение**

1. Анализ опыта использования наиболее распространенных приборов (как механических, так и электронных) для измерения напряженно­деформированного состояния мостовых сооружений в процессе их строитель­ства, испытаний и эксплуатации показал, что при современном уровне проек­тирования и строительства с использованием новейших проектных решений и технологий, только электронные приборы в составе компьютерных измери­тельных систем позволяют получить наиболее полную картину НДС и дать подробный анализ полученных результатов измерений.
2. Разработанная компьютерная измерительная система ««КИС- ИМИДИС»», включающая ряд новых электронных приборов, конструкция и способы функционирования которых защищены патентами на изобретение и полезные модели, возможность передачи данных как по проводам, так и по ра­дио, а также соответствующее программное обеспечение, позволяет наиболее полно решать задачи исследования НДС мостовых конструкций в процессе строительства, испытаний и эксплуатации.
3. Разработанная компьютерная программа «Спектр» позволяет прово­дить углубленный научный анализ не только результатов измерений, получен­ных при помощи «КИС-ИМИДИС», но и данных, полученных из других источ­ников в табличной или текстовой форме. В частности эта программа использу­ется в ОАО ЦНИИС при анализе данных измерительной системы СТКМ.
4. Выявлена особенность поведения опор при монтаже пролетного строения методом тыловой сборки и продольной надвижки. Показано, что ве­личину отклонения опор за счет сил трения можно эффективно оценивать по углу отклонения верха опоры, а на слабых грунтах - с учетом угла отклонения у ростверка. Экспериментально выявлено и теоретически обосновано отклоне­ние лидирующей опоры в сторону стапеля, когда нависающая консоль пролет­ного строения имеет значительный провис.
5. Разработана методика учета влияния температуры на показания тен­зометрических датчиков при мониторинге эксплуатируемых мостов. Разрабо­тана компьютерная программа обработки данных большого числа тензометри­ческих датчиков, используемых при мониторинге моста Александра Невского в Санкт-Петербурге, позволяющая в реальном масштабе времени отделять от по­казаний датчиков температурную составляющую и сравнивать полученные ре­зультаты измерений с расчетными предпосылками для обеспечения безопасной эксплуатации моста.
6. Дана методика анализа результатов суточных измерений НДС моста, вызванных изменением температуры. Эта методика позволила, например, в Ки- нешме подтвердить нормальную работу антифрикционных карточек, а в Сара­тове - выявить опасность возникновения трещин в опорах из-за неточной уста­новки опорных частей пролетного строения и особенности их конструкции.
7. Разработана методика измерения натяжения канатов вантовых и ви­сячих мостов, обеспечивающая достижение заданной точности.
8. Дана сравнительная оценка различных способов проведения динами­ческих испытаний мостов. Разработана методика определения скоростей дви­жения нагрузки, при которых будут наблюдаться максимальные и минималь­ные динамические коэффициенты.
9. Даны рекомендации по анализу результатов динамических испыта­ний мостов с помощью программы «Спектр», которые позволяют определять не только динамические коэффициенты и периоды собственных колебаний, но и выявлять скрытые дефекты в конструкции.
10. Дана оценка опасности возникновения резонансных явлений как от колебаний подрессоренной массы движущихся по мосту автомобилей, так и от марширующих по нему колонн людей.

Внедрение в практику испытаний и мониторинга НДС мостов и дру­гих инженерных сооружений компьютерных измерительных систем позволяет получить значительную экономическую эффективность за счет сокращения ко­личества персонала и используемой техники при испытаниях и снижения риска возникновения нештатных ситуаций при мониторинге.

1. Некоторые механические приборы снабжены самописцами (например, прогибомер ГеОгера), но годятся для записи только медленных процессов. Кроме того, запись диаграмм на бумаге затрудняет их дальнейшую математическую обработку. [↑](#footnote-ref-1)