

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА МОСТОВ

У статті представлені основні концептуальні міркування стосовно розробки і реалізації системного підходу до створення моніторингу мостових споруд. Особливою рисою сучасного аспекту моніторингу мостів є перехід від вимог забезпечення надійності до вимог забезпечення усієї сукупності споживацьких якостей споруд. Сформульовані критерії діагностики експлуатаційної надійності мостів як фундаментальної мети моніторингу.

В статье представлены основные концептуальные соображения по разработке и реализации системного подхода к созданию мониторинга мостовых сооружений. Отличительной особенностью современного аспекта мониторинга мостов является переход от требований обеспечения надежности к требованию обеспечения всей совокупности потребительских качеств сооружений. Сформулированы критерии диагностики эксплуатационной надежности мостов как фундаментальной цели мониторинга.

The major concepts of the elaboration and realization of the bridge construction monitoring systemic approach are presented in this paper. The main peculiarity of the bridge monitoring modern aspect is pointed out here, namely, the transition from the demands of providing the reliability to the demands of providing the whole complex of the structure consumer qualities. The criteria of diagnostics of the bridge exploitation reliability as the fundamental aim of monitoring are formulated here.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции мирового мостостроения обусловлены разнообразием архитектурных форм и конструктивных решений. Следствием этого являются проблемы идеализации реальных мостовых сооружений, т.е. выбора расчетных схем, адекватно отображающих не только статическую, но и динамическую пространственную работу сооружений в поле многообразных нагрузок и воздействий различного происхождения.

Причины возможных отказов сооружений в целом или отдельных их частей при монтаже и в процессе эксплуатации очень часто обусловлены неадекватностью выбора расчетных схем. Отсюда очевидна необходимость оценки фактических значений параметров статической и динамической жесткости (с учетом частот внешних динамических воздействий и диссипативных свойств конструкций) уже на начальной стадии длительной эксплуатации. Именно на этой стадии роль мониторинга для уникальных, комплексно-многомерных, конструктивно неоднородных, композитных (сталь и железобетон, алюминий) и других сложных мостовых сооружений трудно переоценить, особенно для уточнения расчетных моделей, а также для оценки реакции мостов и отдельных их частей на внешние воздействия.

Фундаментальные идеи динамической интегральной диагностики состояния конструкций

как наиболее эффективного компонента мониторинга мостов были сформулированы в 70-80 гг. в работах [1...4]. Их дальнейшее развитие в работах [5...13] оказало позитивное влияние на решение реальных проблем обеспечения эксплуатационной надежности, как мостов, так и других классов сооружений.

В качестве убедительной иллюстрации эффективности мониторинга инженерных конструкций следует отметить как результаты многолетних исследований работы уникальных вантовых мостов – газопровода через р. Амударья в Афганистане пролетом 660 м в течение 1973...1991 гг. [1, 2] и аммиакопровода через р. Днепр на Украине пролетом 720 м с 1979 г. по настоящее время [4], так и мониторинг главного монумента Победы на Поклонной горе в г. Москве, организованный в 1995 г. и осуществляемый по настоящее время, а также мониторинг вантово-арочного моста в Серебряном Бору в г. Москве (на стадии реализации проекта).

### Диагностика эксплуатационной надежности

Проблема надежности конструкций по Н. С. Стрелецкому связана с критерием неразрушимости. Статистическая мера неразрушимости, названная им гарантией неразрушимости, связана с рассмотрением и анализом известного «треугольника Стрелецкого».

При всей совокупности проблем надежности не следует ни противопоставлять, ни формально сопоставлять вопросы теории надежности

строительных конструкций и проблемы эксплуатационной надежности реальных инженерных сооружений. По своей сути это пересекающиеся множества. Причем, первое из них с полной уверенностью можно отнести к нечеткому множеству (**fuzzy set**) с размытыми границами, нечеткой логикой и набором лингвистических характеристик<sup>\*)</sup>, коррелирующих с типом и назначением строительных конструкций, моделью той или иной теории надежности.

Второе множество должно быть наполнено конкретным содержанием. В частности, необходимо сформулировать в приоритетном порядке критерии качества эксплуатационной надежности в зависимости от конструктивной формы сооружения, нагрузок и воздействий, а также целого ряда физических, экономических, экологических и иных факторов.

Из большого разнообразия признаков качества надежности к наиболее важным и существенным применительно к мостовым конструкциям следует отнести безотказность, расчетную долговечность, безопасность и ремонтпригодность.

Под безотказностью понимают эксплуатационную надежность сооружений в целом и их отдельных элементов. Расчетная долговечность – это расчетный срок службы (или ресурс) при заданной обеспеченности нагрузок такого вида, как ветровая, снеговая, сейсмическая, ветровое волнение и др. Безопасность конструкций предполагает также их надежность по отношению к биосфере, т.е. к жизни и здоровью людей или состоянию окружающей среды при учете таких факторов, как редкие стихийные воздействия, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации, грубые ошибки на стадиях проектирования, изготовления, строительства или эксплуатации конструкций. Ремонтпригодность конструкций характеризует конструктивную форму с точки зрения условий нормальной эксплуатации и возможности вы-

---

<sup>\*)</sup> Понятие «надежность» аналогично понятию «устойчивость» за последние 5-6 десятилетий стало столь перегруженным, что сформировало нечеткое лингвистическое множество (**fuzzy linguistic set**). Удачной иллюстрацией нечеткого лингвистического множества «надежность» может служить словосочетание «надежный человек» аналогично словосочетанию «морально устойчивый человек» из другого нечеткого лингвистического множества «устойчивость». Очевидно, эти словосочетания не имеют ничего общего ни с теорией надежности, ни с теорией устойчивости.

полнения ремонтно-профилактических, восстановительных работ в процессе эксплуатации.

Безопасность мостовых конструкций как один из признаков качества надежности определяется также санитарным критерием диагностики, т.е. характером воздействия вибраций на организм человека. Любая вибрация оценивается по её физиологическому или психологическому воздействию на человека: комфорт с предельным порогом его снижения; обеспечение профессиональной деятельности с предельной границей снижения производительности труда вследствие усталости при выполнении строительных или ремонтно-восстановительных работ на сооружении, обеспечение безопасности и здоровья, которому соответствует предел воздействия.

К основным параметрам вибрации, обуславливающим санитарный критерий диагностики, относятся частотный состав и уровни характерных кинематических факторов – виброперемещений, виброскоростей и виброускорений, направление, регулярность (повторяемость) вибрации, длительность воздействия на человека (доза) вибрации.

Большую роль в оценке эксплуатационной надежности, долговечности и безопасности конструкций играют натурные обследования, испытания и длительные наблюдения. Они служат достоверной основой диагностики мостовых конструкций. В то же время на особо важных и уникальных мостовых сооружениях необходимо организовать:

- постоянные натурные наблюдения с целью оказания технической помощи при эксплуатации;
- уточнения метеорологического и сейсмометрического микрорайонирования и соответствующих метеорологических и сейсмических воздействий – зонинг;
- изучение реакции мостовых конструкций на реальные воздействия;
- обнаружение явлений динамической и аэроупругой неустойчивости.

Это позволяет обосновано диагностировать состояние конструкций и в необходимых случаях разрабатывать мероприятия по повышению их надежности.

### **Критерии диагностики**

Одним из доминирующих критериев диагностики конструкций являются их динамические свойства, выступающие в качестве интегральных оценок состояния. За последнее десятилетие разработаны современные эффектив-

ные методы и средства измерения динамических параметров конструкций, в том числе в инфранизкочастотном спектре (до 0,2 Гц), который характерен для большинства гибких пешеходных, а также висячих и вантово-балочных мостов различного назначения. К этим параметрам относят собственные частоты, формы и логарифмические декременты пространственных колебаний, параметры вынужденных колебаний. Сопоставляя эксплуатационные значения динамических параметров с их эталонными, паспортными значениями, теоретическими (расчетными) или экспериментальными, полученными при вводе сооружений в эксплуатацию, можно достаточно обосновано дать диагностику состояния конструкций. Динамическая интегральная диагностика мостовых конструкций аналогично диагностике судов и авиастроительных конструкций или атомных реакторов играет важную роль в обеспечении надежности сооружений и опирается на динамические методы экспериментальных исследований.

Опыт эксплуатации, многолетних наблюдений и диагностики ряда уникальных инженерных сооружений показывает, что систематический анализ их состояния позволяет не только содержать сооружения на требуемом уровне, но и своевременно осуществлять мероприятия по обеспечению эксплуатационной надежности и расчетной долговечности. При этом необходимо отметить, что диагностика конструкций служит составной частью эксплуатации сооружений и не требует дополнительных эксплуатационных затрат, за исключением средств на привлечение (не реже одного раза в 5 лет) специализированных организаций для инструментальных измерений, геодезической съёмки и некоторых других видов работ.

Наряду с интегральными динамическими критериями диагностики состояния конструкций, широкое распространение могут получить критерии, оценка которых дифференцируется поэлементно в результате выполнения комплекса инструментальных измерений. К этому комплексу следует отнести:

- измерение перемещений несущих элементов конструкций в вертикальной и горизонтальной плоскостях под действием силовых факторов, в том числе метеорологического воздействия, что позволяет определить фактическую жесткость и деформативность элементов и сооружения в целом;

- измерение усилий и напряжений в узлах и элементах;

- геодезические измерения пространственного положения (геометрии) элементов и узлов сооружения.

### **Мониторинг мостов**

Мониторинг мостовых конструкций должен получить широкое распространение для оценки их состояния в процессе эксплуатации. В самом обобщенном смысле мониторинг конструкций – это наблюдение, анализ и прогноз. При этом наблюдение предусматривает визуальное и инструментальное описание параметров нагрузок и воздействий различной природы, а также статическое и динамическое поведение сооружения в целом и отдельных его элементов в пространстве реальных нагрузок и воздействий, которое в данном случае трактуется как реакция конструкций на внешние воздействия. Анализ предполагает сравнение фактических параметров нагрузок и воздействий в реальных условиях эксплуатации с их расчетными значениями. Это необходимо для уточнения обеспеченности внешних воздействий и достоверности расчетных схем.

Составленный на основе наблюдений и оценок прогноз состояния конструкций имеет особое значение в мониторинге. Он позволяет обоснованно судить об остаточном ресурсе конструкций и в необходимых случаях активно влиять на повышение надежности в процессе эксплуатации. Достоверность прогноза обуславливается качеством программы наблюдений, оснащения приборами и аппаратурой, средств обработки и анализа результатов наблюдений.

Цель мониторинга – сбор и анализ информации о прочности, устойчивости, жесткости, надежности и расчетной долговечности конструкций, а также о комфорте людей в процессе монтажа и эксплуатации. Следовательно, наряду с традиционными признаками качества надежности – безотказность, безопасность, расчетная долговечность, ремонтпригодность – рассматриваются и экологические признаки, которые в первую очередь отождествляются с санитарными критериями уровня и дозы вибрации.

Таким образом, проект мониторинга должен составляться в соответствии с необходимой целесообразностью уточнения реального поведения мостового сооружения в поле внешних воздействий и нагрузок и оценки остаточного ресурса в процессе эксплуатации. Мера необходимой целесообразности, определяющая масштабы мониторинга, должна определяться

авторами проекта мостового сооружения по согласованию с заказчиком, балансодержателем и эксплуатирующей организацией на основе индивидуальных специфических особенностей каждого сооружения и проблем его проектирования. Это обусловлено юридической ответственностью авторов проекта за безотказность, долговечность, безопасность и ремонтпригодность мостового сооружения в течение всего срока его существования.

Мониторинг мостовых конструкций массового применения может быть основан на базе атласа отказов (дефектов), созданного при стендовых испытаниях эталонной конструкции, на которой можно моделировать различные типы дефектов, и динамическими испытаниями отслеживать влияние их на динамические параметры. При эксплуатации реальных конструкций по изменению динамических параметров по сравнению с паспортными значениями можно предсказывать тип дефектов (или группы дефектов).

При проектировании мостов сложных систем возникают вопросы, достоверные ответы на которые можно получить только при анализе фактической работы сооружения в поле реальных внешних воздействий и нагрузок.

Поэтому мониторинг большепролетных конструкций висячих и вантово-балочных мостов, а также особо важных сооружений осуществляется в индивидуальном порядке. Разрабатывается проект оснащения конструкций приборами и аппаратурой, средствами связи и коммуникаций для измерения динамических параметров работы сооружений в условиях реальных метеорологических, сейсмических, подвижных и технологических нагрузок.

На основе накопленного опыта динамической интегральной диагностики состояния конструкций, в частности, мостов больших пролетов, можно утверждать: по характеру изменений собственных частот пространственных колебаний, их форм и логарифмических декрементов колебаний и сдвигов фаз тип дефекта устанавливается с высокой степенью достоверности.

Особенности мониторинга при монтаже связаны с анализом изменений в процессе монтажа основных свойств конструкций, таких как жесткость, частоты собственных пространственных колебаний, виброускорения.

Цель мониторинга начального периода эксплуатации – уточнение нагрузок и воздействий; проверка соответствия реальной работы конструкций принятым в расчетах допущениям; ана-

лиз реакций конструкций на действие реальных нагрузок и воздействий; корректировка в случае необходимости расчета конструкций, а также инструкции по эксплуатации.

В процессе длительной эксплуатации мониторинг позволяет оценить:

- изменение динамических параметров сооружений и отдельных их элементов при эксплуатации;
- релаксационные и усадочные процессы в материалах конструкций;
- обоснованность назначений коэффициентов надежности по нагрузке, безопасности, условиям работы.

В качестве иллюстрации системного подхода к созданию мониторинга мостового сооружения ниже приведены соответствующие мероприятия на стадии разработки концептуальных соображений к программе, техническому заданию и проекту мониторинга вантово-арочного моста через реку Москва в Серебряном Бору г. Москвы.

Данное уникальное по назначению и ответственности сооружение значительно отличается от традиционных мостов:

- парадоксом спектра собственных частот пространственных колебаний системы «пролетное строение – арка – ресторан», состоящим в том, что в связи с отсутствием в пролетном строении неподвижных опорных частей низшей частоте соответствуют продольные колебания пролетного строения. Это, в свою очередь, потребовало установки специальных поглощающих устройств в торце пролетного строения, превращая инженерное сооружение в механизм, что принуждает к обязательному и постоянному вниманию службы эксплуатации сооружения;

- чувствительностью усилий в вантах к неравномерным осадкам опор арки и пролетного строения;

- наличием ресторана как объекта общественно-социального назначения со скоплением большого количества людей и возможным специфическим их поведением (танцы, пляски и т.п.), требующего постоянного внимания по допустимым уровням и дозам вибрации с точки зрения дискомфорта посетителей и обслуживающего персонала;

- необходимостью иметь непосредственно на мосту (или вблизи) помещений для службы эксплуатации, неснижаемого запаса материалов и оборудования, приборов и аппаратуры для обеспечения безопасной эксплуатации;

- пролетного строения;

- арки;
- опорных частей;
- поглощающих устройств;
- ресторана (в т.ч. для ликвидации снега и гололедо-изморозевых отложений);
- средств эвакуации посетителей и обслуживающего персонала ресторана;
- при плановых осмотрах ответственных узлов, стыков, швов и соединений, элементов несущих и ограждающих конструкций сооружения.

Отличительной особенностью современного аспекта мониторинга мостов является переход от требований обеспечения надежности к требованию обеспечения всей совокупности потребительских качеств мостового сооружения. Поэтому программа мониторинга включает следующие вопросы:

1. Фактическая работа всех опорных частей и деформативность опор и на этой основе уточнение расчетной схемы (модели) сооружения.

2. Изучение реального спектра частот и соответствующих им форм пространственных колебаний сооружения в целом и отдельных его составных частей (парциальных частот):

- пролетного строения;
- арки;
- вант;
- ресторана
- в системе «пролетное строение – арка – ресторан».

3. Измерение усилий в вантах.

4. Изучение продольного (по длине моста) и вертикального (по высоте арки) профилей скорости ветра.

5. Изучение реакции сооружения в целом и его отдельных элементов на реальные ветровые воздействия, в т.ч. вибрации вант; выявления динамической и аэроупругой неустойчивости.

6. Изучение влияния метеорологических параметров на образование гололедо-изморозевых отложений на вантах и других элементах сооружения.

7. Анализ уровня отложений снега на элементах конструкций сооружения, в том числе, на вантах и на внешней поверхности ресторана.

8. Изучение температурных деформаций конструкций.

9. Анализ работоспособности эксплуатационных качеств поглощающих устройств.

10. Геодезическая съемка пространственно-го положения пролетного строения (продольного и поперечного профилей) и арки.

11. Изучение динамического поведения платформы пола ресторана в горизонтальной и

вертикальной плоскостях и кручения относительно главных осей инерции ресторана при действии ветра, подвижной нагрузки на мосту, посетителей ресторана, в том числе уровней вибрации, с целью оценки дискомфорта посетителей и обслуживающего персонала.

12. Создание динамического паспорта сооружения.

13. Сопоставление реального ресурса сооружения и его составных частей (пролетного строения, арки, вант, поглощающих устройств, опорных частей, ресторана) с расчетной (проектной) долговечностью – 100 лет.

14. Разработка «Инструкции по эксплуатации» сооружения.

Особого внимания в процессе мониторинга заслуживает анализ эксплуатации ресторана и средств его жизнеобеспечения с точки зрения недружественного воздействия на окружающую среду. Кроме того, следует учитывать, что при эксплуатации мостового сооружения может возникнуть необходимость разработки и осуществления мероприятий по воспрепятствованию гнездования птиц в узлах конструкций арки. Многолетний опыт наблюдений за эксплуатацией мостов показывает, что это представляет реальную угрозу возникновения очагов ускоренной коррозии металла, а также иных неблагоприятных проявлений.

Технические средства мониторинга должны обеспечить выполнение цели во всех перечисленных выше аспектах и включают в себя:

- первичную аппаратуру и датчики;
- вторичную аппаратуру для регистрации информации;
- системы коммуникаций;
- микропроцессорную технику с современным программным обеспечением;
- энергетическое обеспечение функционирования измерительной и коммуникационной систем.

Функционирование технических средств мониторинга обуславливается наличием профессионально подготовленного персонала и специально оборудованного помещения.

Мониторинг впоследствии, в режиме длительной эксплуатации сооружения, должен стать составной и неотъемлемой частью функционирования службы эксплуатации с учетом постоянной модернизации всех технических средств мониторинга в связи с наиболее низким сроком их морального износа по сравнению с другими современными техническими средствами измерений и анализа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казакевич М. И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
2. Казакевич М. И. Наблюдения за аэродинамическим поведением висячего перехода газопровода Афганистан – СССР // Сб. ЦНИИС Госстроя СССР, серия VIII, Строительные конструкции. Строительная физика. – Вып. 4. – М.: ЦНИИС Госстроя СССР, 1977. – С. 17-20.
3. Казакевич М. И. Диагностика металлических конструкций и ее роль в обеспечении надежности сооружений // В кн.: «Развитие металлических конструкций: Работы школы Н. С. Стрелецкого» / Под ред. В. В. Кузнецова. – ЦНИИпроектстальконструкция. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 480-482.
4. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
5. Kazakevitch M. I. Stabilization of a Cable-Stayed Footbridge / M. I. Kazakevitch, V. V. Kulyabko // Proc. IABSE Symposium - 1995. – San Francisco (USA), 1995. – P. 1099-1104.
6. Kazakevitch M. I. Monitoring of Long-Span Steel Structures / M. I. Kazakevitch, V. V. Kulyabko // IX Int. Conf. on Metal Structures. – Krakow (Poland), 26-30 June, 1995. – P. 245-250.
7. Казакевич М. И. Введение в виброэкологию зданий и сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Д.: ПГАСА, 1996. – 200 с.
8. Казакевич М. И. Динамическая интегральная диагностика металлоконструкций // Тр. Межд. конф. «Металлостроительство-96», Макеевка, 1996. – т. 1. – С. 9-11.
9. Казакевич М. И. Динамическая диагностика и мониторинг состояния строительных конструкций ответственных сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко // Тр. VI Украинской науч.-техн. конф. «Металлические конструкции». – Киев-Николаев, 1996. – С. 84-86.
10. Казакевич М. И. Мониторинг мостов в процессе монтажа и при эксплуатации / М. И. Казакевич, Г. Б. Фукс // Тр. Межд. конф. «Передовые технологии на пороге XXI века» (ICAT'98), Часть 1. – М., 1998. – С. 152-156.
11. Казакевич М. И. Актуальные проблемы динамики сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко // Металеві конструкції. УАМК. – т. 1, № 1. – 1998. – С. 65-74.
12. Горохов Е. В. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим / Под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк, 2000. – С. 223-227.
13. Горохов Е. В. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередач / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим / Под ред. Е. В. Горохова. – Донецк, 2005. – С. 278-282.

Поступила в редакцию 17.12.2007.