

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МОСТА НА ОСТРОВ РУССКИЙ ВО ВЛАДИВОСТОКЕ

Мостовой переход на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке является одним из объектов подпрограммы «Развитие Владивостока как центра международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе» в составе федеральной целевой программы «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Забайкалья на период до 2013 года». В рамках подпрограммы предусматривается осуществление комплекса мероприятий по развитию инфраструктуры Владивостока как самого крупного города на Дальнем Востоке России, с превращением его в современный культурный, научно-образовательный, торгово-финансовый, транспортно-логистический и индустриальный центр.

Функции заказчика по строительству моста, как и многих других уникальных объектов, реализуемых в программный период, выполняет федеральное государственное учреждение «Дирекция по строительству объектов дорожного хозяйства г. Владивостока как центра международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе Федерального дорожного агентства» (ФГУ ДСД «Владивосток»), созданное в соответствии с распоряжением Правительства РФ № 619-р от 4 мая 2008 г. Генеральным подрядчиком по строительству мостового перехода на о. Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке в соответствии с государственным контрактом выступает ОАО «УСК МОСТ». Комплекс проектно-изыскательских работ выполняет ООО «НПО «Мостовик».

Мост на о. Русский представляет собой внеклассное инженерное сооружение с одним из самых больших в мире вантовых пролетов. Инженерные задачи, возникающие при проектировании, строительстве и эксплуатации столь уникального объекта требуют неординарных, инновационных подходов и значительно усложняются особенностями окружающей среды, отличающимися силой и агрессивностью воздействий с точки зрения температурных режимов, коррозионности, ветровых нагрузок и сейсмичности.

Мост, соединяющий о. Русский и п-ов Назимова, строится в самом узком месте пролива Босфор Восточный, между мысом Новосильского и мысом Назимова. Трасса мостового перехода пересекается с осью Шкотовского фарватера, являющегося основным из судоходных и интенсивно используемых фарватеров порта Владивосток, под углом $78^{\circ}30'$. Высота подмостового габарита для прохода судов – 70 м. Наибольшие глубины в зоне моста находятся в средней части пролива и составляют 35–42 м. Мост представляет собой одиннадцатипролетную двухпилонную вантовобалочную систему с продольной схе-

мой $60 + 72 + 3 \times 84 + 1104 + 3 \times 84 + 72 + 60$ (м) и является рекордным по следующим показателям:

- протяженность центрального вантового пролета – 1104 м;
- высота пилонов от уровня ростверков – 312 м (бетон В60 F300 W8);
- наибольшая длина ванта – 580,5 м.

Габарит моста при 4-х полосах движения с разделительной полосой 3 м и полосами безопасности по 1,5 м, составляет $21 \text{ м} (1,5 + (2 \times 3,75) + (1 + 1 + 1) + (2 \times 3,75) + 1,5)$, служебные проходы шириной по 0,75 м.

Сваи основания пилонов – буронабивные $\varnothing 2,00 \div 2,20$ м, длиной до 70 м, бетон В30 F300 W8, ростверки опор под пилоны изготавливаются из бетона В35 F400 W12. Сваи оснований промежуточных опор также буронабивные $\varnothing 1,80 \div 2,00$ м, длиной $6,5 \div 31$ м, бетон В27,5 F300 W8, с ростверками из бетона В30 F300 W8. Выше обреза фундамента опоры изготавливаются из монолитного бетона В35 F300 W8, В35 F300 W8 (тело опор). Рабочая арматура опор – класса А-III из стали 25Г2С. Все железобетонные элементы опор изготавливаются на сульфатостойком портландцементе.

Коробчатая цельнометаллическая балка жесткости центрального пролета выполнена из стали 10ХСНД с максимальной толщиной элементов 40 мм. По краям балки жесткости устраиваются отбегатели. Для удержания центрального пролета балка жесткости противовесных боковых пролетов по схеме $(60 + 72 + 3 \times 84)$ м, выполнена из предварительно напряженного монолитного железобетона коробчатого сечения, с той же строительной высотой, что и металлическая балка жесткости центрального пролета.

А-образные пилоны вантового моста запроектированы с учетом повышенных архитектурных требований и выполняются из монолитного железобетона переменного сечения по вы-

соте. Каждый пилон представляет собой две стойки, объединенные распоркой в уровне балки жесткости и двумя распорками выше. Общий вид строительства с пилонами М6 и М7, достигшими на момент подготовки данной статьи высотных отметок более 100 м, показан на рис. 1.

Вантовая система имеет веерное расположение вант. Каждая ванта включает в себя от 34 до 94 стрендов. Длина самой короткой ванта – 135,3 м, самой длинной – 580,5 м. Для гашения колебаний в узлах крепления вант на балке жесткости предусматривается устройство демпферов.

В связи с пониманием высокого уровня ответственности при решении уникальных задач по проектированию и строительству не имеющего аналогов в отечественной практике моста, уже осенью 2008 г. была принята согласованная ОАО «УСК МОСТ» и утвержденная ФГУ ДСД «Владивосток» комплексная программа работ по обоснованию наукоемких проектных решений и новых технологий строительно-монтажных работ с обеспечением контроля качества на объекте, а также предварительная программа работ по мониторингу.

Приборный мониторинг в настоящее время является автоматизированным и наиболее прогрессивным способом постоянного надзора, обеспечивающим непрерывный контроль безопасности и надежности мостовых конструкций с минимальной зависимостью от человеческого фактора, что позволяет в сочетании с традиционными осмотрами мостовых сооружений обеспечить эффективное планирование капиталовложений на содержание, ремонт и реконструкцию.

Социально-экономический эффект от применения непрерывного приборного мониторинга, как наиболее объективного контрольного аппарата комплексной системы содержания, выражается в достижении следующих целевых показателей, отражающих интересы потребителей транспортных услуг при пользовании мос-

товыми сооружениями на автомобильных дорогах:

- повышение безопасности проезда;
- повышение эксплуатационной надежности;
- поддержание нормативной грузоподъемности;
- обеспечение нормативной пропускной способности;
- повышение долговечности;
- повышение эффективности капиталовложений на содержание мостового сооружения.

В части обеспечения безопасного проезда по мостовому сооружению средства мониторинга, организованные в виде комплексной автоматизированной системы контроля и управления, позволяют:

- снизить количество и тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) путем автоматизированного управления режимами эксплуатации с осуществлением контроля скоростных режимов и информирования водителей при помощи подсистем контроля скорости, состояния дорожного полотна, знаков и табло с переменной информацией (ЗПИ и ТПИ);
- снизить риск взаимного повреждения транспортных средств и мостовых конструкций от провоза сверхтяжелых и негабаритных грузов при помощи датчиков весового и габаритного контроля;
- предотвратить катастрофические последствия для пользователей моста (водителей, пассажиров, пешеходов, собственников транспортных средств) при обледенениях, ураганах, тайфунах, цунами, землетрясениях и т. п. аномальных природных явлениях, а также угрозах техногенного характера и связанных с терроризмом путем экстренного оповещения и прекращения доступа на объект.

В ряду вышеприведенных задач по повышению безопасности пользования мостовыми сооружениями наиболее сложной является выявление предаварийных ситуаций, вызываемых угрозами техногенного характера, связанными с постепенным накоплением износа и повреждений основных несущих конструкций. Накопление, например, усталостных повреждений стальных конструкций, в частности прядями вант, может вызвать их внезапный обрыв.

Средства приборного мониторинга позволяют отследить накопление скрытых повреждений в несущих конструкциях, в частности путем количественного анализа параметров напряженно-деформированного состояния конструкций с формированием истории нагружения. Надежность работы мостовых сооружений контролируется средствами мониторинга также при помощи непрерывного слежения за отклонениями основных параметров от нормы на ранних стадиях развития дефектов и автоматизацией подачи тревожных сигналов при приближении текущих показателей отслеживаемых характеристик к пороговым значениям.

Таким образом, очевидно, что непрерывный приборный мониторинг является наилучшим и наиболее объективным средством контроля состояния сложных инженерных конструкций. Однако стоимость элементов такого мониторинга довольно высока. На предпроектной стадии создания системы мониторинга моста на о. Русский задача обоснования оптимального состава средств мониторинга, позволяющего контролировать реакцию самых уязвимых элементов сооружения на наиболее вероятные и опасные виды воздействий, вышла на первый план. Одним из исходных условий этой задачи являлось существование определенного лимита финансирования на создание системы мониторинга, при требовании обеспечения максимальной отдачи

от ее работы в процессе строительства и эксплуатации моста.

Для решения этой задачи был предложен метод анализа рисков, представляющий инновационную разработку применительно к уникальным конструкциям моста на о. Русский. До настоящего времени анализ рисков не применялся в отечественной практике для оценки и управления техническим состоянием мостовых сооружений (МС). Однако тяжесть последствий отказов при обрушениях МС весьма значительна. Обрушения МС приводят к гибели людей, повреждению транспортных средств, долговременным перерывам в движении, большим экономическим потерям, загрязнению водотоков, тем более значительным, чем значительнее МС. Следовательно, для параметров моста на о. Русский метод анализа рисков наиболее актуален.

За рубежом в связи с пониманием потенциальной опасности МС в некоторых развитых странах уже производится соответствующий анализ рисков, возникающих при их строительстве и эксплуатации. Например, фирма «Адвита» (Франция) использует для гражданского строительства метод AMDEC с целью осуществления оценки и управления рисками (AMDEC представляет собой метод, применяемый в промышленности, военной и атомной отраслях Европейского экономического сообщества). В области МС, где конструкции и технологии часто являются уникальными, метод AMDEC, по мнению специалистов «Адвита», обеспечивает наибольшую объективность оценки рисков и позволяет осуществить оптимизацию управления рисками. Так, например, определив виды отказов, опасностей, воздействий и критичность рисков, фирмой «Адвита» была разработана эффективная система, так называемая Structural health monitoring system (SHMS) для уникального вантового моста «Рион-Антирион» в Греции.

Конечной целью анализа рисков МС является повышение эффективности управления техническим состоянием объектов для обеспечения охраны здоровья людей и их безопасности, предотвращения экономических и других потерь. Комплекс мероприятий по анализу и управлению рисками, выполненный ЗАО «НИПИ ТРТИ» применительно к мосту на о. Русский, включал следующие этапы:

- этап идентификации и описания МС и его элементов;
- этап идентификации потенциальных опасностей;
- этап идентификации возможных видов отказов;
- этап моделирования сценариев отказов и возможных нежелательных последствий;
- этап количественной оценки или



Рис. 1



Рис. 2

- ранжирование рисков;
- этап выявления факторов, обуславливающих риск, и слабых звеньев в системе;
- этап выбора мер и приемов по обеспечению снижения риска.

Идентификация и описание моста и его элементов выполнялись способом декомпозиции (разбивки) на макроэлементы, учитывающим не только прямую тяжесть последствий головных событий, но и опосредованную тяжесть последствий, выявленных в процессе анализа деревьев отказов (АДО) для различных типов конструкций первоначальных базовых событий и событий-следствий. Также одним из основных принципов декомпозиции был принцип деления конструкции в соответствии с разделением по стыкам в натуре (рис. 2) и в проекте. Основными критериями выделения макроэлементов в группу были одинаковая тяжесть последствий и вероятность наступления их частичных и полных отказов. Исходное техническое состояние макроэлементов при анализе рисков на данном этапе принималось идеальным, то есть без отклонений от норм, строительного брака, износа, старения материалов, эксплуатационных дефектов и повреждений. На стадии идентификации потенциальных опасностей были получены:

- перечень нежелательных событий;
- описание источников опасности — факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий;
- предварительные оценки опасности и риска.

Опасности для элементов мостового сооружения были отнесены к следующим трем основным категориям:

- природные опасности (негативные воздействия окружающей среды: воздействие водного потока, влага,

соль, обледенение, инсоляция, оползни, ветер (тайфуны), землетрясения, смерч, молния, цунами и т. д.);

- технические опасности, источниками которых являются транспортные средства, химические реагенты, коммуникации, пожары, блуждающие токи, технологические процессы, оборудование и т. п.;
- социальные опасности, источниками которых являются человеческий фактор, противоправные действия, вооруженное нападение, война, диверсия и т. д.

Далее был произведен анализ тяжести последствий реализации опасностей. Для расчетов рисков, касающихся моста, анализ последствий представляет собой определение возможного нарушения работы конструкции и влияния на техническое состояние для каждого элемента в отдельности, макроэлемента и сооружения в целом, если произойдет нежелательное событие.

Целью анализа вероятности критических отказов является определение частоты каждого из нежелательных событий или сценариев аварий, идентифицированных на стадии идентификации опасности. Для определения вероятности критических отказов макроэлементов моста через пролив Босфор Восточный использовались три основных подхода:

- использование соответствующих данных эксплуатации объектов-аналогов с целью определения частоты, с которой данные события происходили в прошлом, и, исходя из этого, определение оценок частоты, с которой они произойдут в будущем;
- прогнозирование частот событий с использованием таких технических приемов, как анализ диаграммы всех возможных последствий несрабатывания или аварии системы («дерева неисправностей») и ана-

лиз диаграммы возможных последствий данного события («дерева событий»);

- экспертная оценка.

Далее, на основе полученных характеристик, были построены матрицы «вероятность — тяжесть последствий» и рассчитаны критичности рисков. Затем была произведена классификация рисков и выполнено ранжирование элементов моста по критичности рисков. На основе выполненного анализа были предложены технологические средства и мероприятия, рекомендуемые в рамках оптимальной, в смысле эффективности капиталовложений, стратегии управления рисками. Данные мероприятия должны обеспечиваться:

- соответствующими техническими решениями на стадии проектирования моста (проект);
- системой мониторинга состояния конструкций моста (СМСКМ);
- автоматизированной системой управления дорожным движением (АСУДД);
- комплексной системой безопасности (КСБ);
- проектом содержания мостового перехода (ПСМП).

Для моста на о. Русский максимальная критичность риска составила 12 баллов из 16 возможных. Данные риски, соответствующие третьему уровню опасности, имеют большую значимость для объекта и должны, во избежание наступления потенциальных отказов, находиться под постоянным контролем. Для элементов сооружения с третьим уровнем опасности доля мероприятий по управлению рисками с помощью автоматизированных систем (СМСКМ, АСУДД, КСБ) значительно превышает соответствующие показатели для низших уровней опасности.

Риски второго уровня опасности являются важными с точки зрения долговечности сооружения, своевременного обнаружения и устранения возможных отказов. При правильной организации управления ими наиболее важно выдержать правильную пропорцию между автоматизированными и обычными технологиями контроля. Однако, учитывая уникальность объекта и сложность климатических и метеорологических условий, рекомендовалось по возможности отдавать предпочтение автоматизированным средствам, исключающим необъективность индивидуальных оценок, характерную для человеческого фактора.

В. М. Курепин, к. т. н.
(ООО «НПО «Мостовик»);
А. В. Сырков, к. т. н.
(ЗАО «НИПИ ТРТИ»);
О. В. Крутиков, к. т. н.