

Основные методы повышения устойчивости и жесткости большепролетных вантовых и висячих мостовых сооружений

А.А. Карамышева, М.А. Колотиенко, Д.В. Гранкина, В.И. Даненко
Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: в работе представлена систематизация основных методов повышения жесткости и устойчивости мостовых сооружений вантового и висячего типов, данная в совокупности с анализом введенных в эксплуатацию объектов. Также описаны инновационные разработки, применимые в исследуемой области.

Ключевые слова: транспортное сооружение, мост, вантовый мост, висячий мост, мостостроение, вант, пилон, жесткость мостовой конструкции, устойчивость мостовой конструкции, эксплуатационная безопасность моста, аэродинамика моста.

Для выявления методов повышения прочностных свойств висячих и вантовых мостов висячего необходимо предварительно внести конкретику в определение конструктивных и архитектурных особенностей сооружений данных типов. К висячим конструкциям относятся строительные конструкции, в которых основные несущие элементы работают на растягивающие усилия. Это дает возможность полностью использовать высокопрочные материалы с их механическими свойствами, а сравнительно малый вес позволяет перекрывать большепролетные сооружения [1].

Висячие конструкции просты в монтаже, имеют высокую эксплуатационную надежность, с их применением можно добиться архитектурной выразительности, интересного формообразования.

К недостаткам висячих конструкций относится наличие распоров, а также большая деформативность от действия местной нагрузки. Распор обычно воспринимается анкерными фундаментами или контурными конструкциями. Деформативность можно уменьшить стабилизирующими элементами (балки жесткости, оттяжки, раскосы, дополнительные пояса), а также созданием в элементах конструкций предварительного напряжения.

К вантовым конструкциям относятся геометрически неизменяемые системы из прямолинейных элементов [2]. Вантовые мосты – это вид

висячих мостов, проезжая часть которых поддерживается висячей формой, которая является геометрически неизменяемой и состоит из прямолинейных вантов-канатов.

Нами составлена сравнительная таблица, содержащая основные характеристики мостовых сооружений вантового и висячего типов, введенных в эксплуатацию, как в России, так и зарубежом (таблица №1). Расположение в хронологическом порядке дает возможность проследить динамику развития технологии мостостроения, а выявленные приемы повышения устойчивости и жесткости конструкций- основу для систематизации методологии усиления в целом.

Таблица № 1

Введенные в эксплуатацию вантовые и висячие мостовые сооружения

Объект	Конструктивные, технологические и архитектурные особенности
Наименование, расположение: Висячий мост им. Джорджа Вашингтона, река Гудзон, США Год:1931 Центральный пролет, м:1100	1. Замена ферм на систему пластинчатых балок (обеспечение жесткости палубы); 2. Использование системы балок и ферм, соединяющей палубы (сопротивление кручению).
Наименование, расположение: Висячий мост «Золотые ворота», Сан-Франциско, США. Год: 1937 Центральный пролет, м:1280	1. Включение боковых и диагональных связей, соединяющих нижние пояса боковых ферм; 2. Использование сейсмоизоляторов.
Наименование, расположение: Висячий мост «Верразано-Нерроуз» Нью-Йорк, США	1. Устройство дополнительных ферм под палубой; 2. Расхождение башен моста от параллелей



Год: 1965 Центральный пролет, м: 1298	(компенсация искривления поверхности); 3. Конструирование вертикальных связей.
Наименование, расположение: Висячий мост через пролив Хамбер, Великобритания Год: 1981 Центральный пролет, м: 1410	1. Установка опалубки на гидравлические домкраты в процессе бетонирования палубы (предупреждение возникновения нерасчетных прогибов); 2. Сужение колонн в сечении; 3. Расхождение башен моста от параллелей; 4. Минимизация расчетного пролета
Наименование, расположение: Вантовый мост через реку Янцзы Сутонг, Китай. Год: 2003 Центральный пролет, м: 1088	1. Устройство пилонов в форме обратной «У», работающих совместно с системой вант; 2. Обеспечение плавающего сопряжения балок и пилонов (упругая работа элементов); 3. Наличие восьми вязких демпферов.
Наименование, расположение: Вантовый мост «Русский». Владивосток, Россия Год: 2012 Центральный пролет, м: 1104	1. Определение формы поперечного сечения аэродинамическим анализом; 2. Использование самоподъемной опалубки для повышения качества материала пилонов; 3. А-образная форма пилонов; 4. Применение «компактных» вант; 5. Устройство полуактивных демпферов.
Наименование, расположение: Вантовый мост «Золотой». Владивосток, Россия. Год: 2012 Центральный пролет, м: 737	1. Применение V-образной форм пилонов непрямоугольного сечения; 2. Установка шок-трансммиттеров; 3. Использование самоуплотняющегося бетона.

На основе анализа мирового опыта строительства определены основные группы методов повышения надежности и жесткости мостовых конструкций: применение высококачественных материалов; включение в работу конструкций дополнительных элементов, трансформирующих энергию колебаний различной природы; внедрение дополнительных и модификация основных структурных единиц мостовой конструкции.

1. Применение высококачественных материалов

Говоря о применяемых для вантовых и висячих мостов материалах, можно выделить три основных периода в мостостроении: первый – XVIII век – представлен небольшими висячими мостами с цепными подвесками; второй период – XIX век – отмечен широким освоением новых материалов (стали и чугуна); третий период – XX – начало XXI века – характеризуется бурным развитием вантовых сооружений на основе новейших достижений науки и технологий.

Важнейшим направлением технологического прогресса является широкое применение высокопрочных сталей в строительстве, их механические характеристики намного выше обычных сталей, что обеспечивает надежную работу стальных элементов конструкций мостов [3].

Эффективность применения высокопрочных сталей для сжатых элементов снижается от продольного изгиба. Поэтому конструкции с применением высокопрочных сталей предпочтительнее использовать для растянутых элементов. К особенностям применения таких материалов в висячих и вантовых конструкциях необходимо отметить значительные деформации от действия временных нагрузок.

Существенное влияние на рациональность вантовой конструкции оказывает безмоментный характер работы для различных сочетаний нагрузок [3]. Полностью безмоментную работу конструкции можно получить в некоторых случаях.

Говоря о бетоне, как о материале для основной части конструктивных элементов мостов, необходимо учитывать ряд технологических требований: удаленность участка бетонирования от места заготовки смеси, ускоренный набор прочности, снижение трудозатрат на уплотнение смеси. При этом безопасность и прочность конструкций определяется, в значительной мере, качеством бетонной смеси. Оптимально применение самоуплотняющихся бетонов, примером использования которых являются вантовый мост «Золотой» (Владивосток, Россия) и мост Нагиса (Аомори, Япония), представляющий сочетание вантовой и подвесной мостовых систем.

2. Включение в работу конструкций дополнительных элементов, трансформирующих энергию колебаний

Как видно, в истории строительства висячих и вантовых мостов накоплен богатейший опыт обеспечения безопасности транспортных сооружений. Однако имеют место и случаи отказа мостовых конструкций, повлекшие крупные аварии. Анализ причин их возникновения способствует развитию аэродинамической устойчивости мостовых сооружений - одному из ведущих направлений динамики сооружений, а проведенная нами систематизация может служить прикладной базой для выбора мер по усилению эксплуатационной надежности новых конструкций [4].

К классическим примерам крушений мостов можно отнести разрушение подвесного моста Такома-Нерроуз (США) в 1940 году. Отказ конструкций произошел в результате аэродинамических колебаний [5]. Так же известен случай обрушения моста в провинции Квебек (Канада) в 1907 и 1916 годах. Основная причина первой аварии – потеря устойчивости сжатых стержней при слабых решетках связей. Вторая катастрофа 1916 года связана с соскальзыванием поперечной балки, опирающейся на цилиндрические опоры.

Обрушение моста может происходить из-за резонансных явлений, стихийных бедствий, а также в связи с недостаточным учетом ветровой нагрузки. При строительстве моста Такома-Нерроуз были использованы сплошные балки, поддерживающие дорожное полотно. Замена на балки сквозного сечения способствовала бы минимизации напряжений от ветровой нагрузки, однако, для обеспечения устойчивости не всегда требуется изменение конструктивных параметров элементов моста [6].

Воздействие колебаний на мостовые конструкции, как подчеркнуто ранее, является значительным фактором, определяющим структурные особенности сооружения. С целью уменьшения воздействия энергии колебательных движений в мостостроении часто применяются демпферы различных конфигураций, динамические гасители, пружинные амортизаторы.

К примеру, мост «Золотой» (Владивосток, Россия), рассчитан на безотказную работу в условиях землетрясения, за счет установки шок-трансммиттеров на пилонах. В случае ЧС стальные гидроцилиндры распределяют сейсмическую нагрузку равномерно по опорам. Примечательно, что в обычных условиях элементы позволяют перемещения в трех направлениях, а при возникновении динамической нагрузки обеспечивают жесткое сопряжение [7].

Наиболее часто с целью обеспечения устойчивости в мостостроении применяются демпферы различного типа. Так, мост через реку Янцзы Сутонг (Китай), оснащен системой вязких демпферов, работа которых обеспечена силой реакции силиконовой жидкости [8]. Данная конфигурация устройства является наиболее эффективной для гашения колебаний в мостах вантового типа, однако применяются также и демпферы трения-скольжения.

Также в мостостроении применяются резино-металлические сейсмоизоляторы, работающие как упруго-пластические элементы при

опорной части конструкции, и стопоры, предупреждающие сдвиговые деформации.

Необходимо учесть, что включение в работу дополнительных элементов способно обеспечить устойчивость мостов только лишь при грамотном расчете и технически качественном монтаже. Так установка стопоров требует высокого качества анкерных соединений в узле сопряжения, а демпфирование предполагает проведение нелинейного расчета и учет остаточных деформаций в элементах конструкций.

3. Внедрение дополнительных и модификация основных структурных единиц мостовой конструкции

В качестве удачного приема модификации системы основных элементов мостового наполнения возможно привести уменьшение расчетного пролета, что применено при строительстве висячего моста Хамбер (Великобритания). Расчетная схема пролета (1410 м.) разбита на участки 18 м., за счет включения в работу кронштейнов тросов. Значительные нагрузки таким образом распределены равномерно и прогибы требуют расчета на минимизированных расстояниях [9]. Модель наихудшего нагружения конструкции представлена на схеме рис.1.

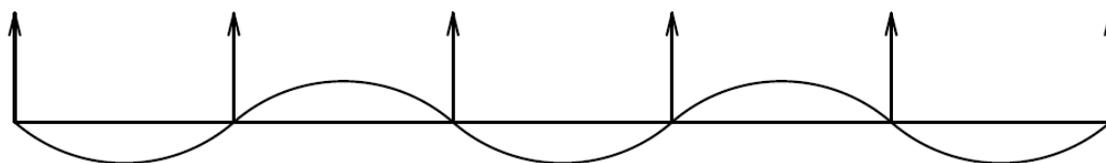


Рис. 1. – Диаграмма прогибов для наихудшего случая нагружения

Увеличение количества тросов снижает требования к жесткости балок, что способствует уменьшению их сечения, закономерно снижению веса конструктивных элементов, поддерживаемых вантами, снижается нагрузка на каждый трос. Такая система вант обеспечивают равномерную

вертикальную жесткость, однако, возникает риск перегрузки соединительных узлов тросов.

Общая жесткость моста обеспечивается совместной работой всех структурных элементов: вант, балки жесткости, мостовых башен:

-повышенная жесткость балки способствует снижению количества вант, уменьшению поперечного сечения пилона, однако чрезвычайно повышает стоимость объекта;

- перераспределение восприятия нагрузок на пилоны способствует снижению требуемой жесткости балки, что практически в многопролетных сооружениях;

-увеличение количества вант (подвесок) является оптимальным решением в большинстве случаев, однако требует соблюдения угла наклона тросов и минимального зазора в узлах сопряжения. При этом ванты способны эффективно стабилизировать систему.

Распространены в мостостроении модификации, проводимые с отдельными элементами конструкции, например, с очертаниями пилонов. V-образная форма пилонов прямоугольного сечения вантового моста «Золотой» (Россия), уравнивает горизонтальные составляющие от нагрузки вант, а так же снижает ветровую нагрузку.

Включение в работу конструкции дополнительных структурных элементов может являться частью работ по переоснащению введенных в эксплуатацию сооружений. К примеру, висячие мосты «Золотые ворота» (Сан-Франциско, США) и «Верразано-Нерроуз» (Нью-Йорк, США) были модифицированы по средствам добавочных связей и палубочных ферм соответственно, после крушения моста в Такоме в 1940 году. Включение боковых и диагональных связей укрепило конструктивную систему моста в Сан-Франциско, позволив ей работать на кручение, что не было учтено при строительстве «Такома Нарроуз».

В настоящее время висячие и вантовые мосты отличаются удивительной красотой и изяществом. Однако, мировая история крушений мостовых сооружений предопределяет сочетание в них не только красоты, но и надежности. По этой причине обязательной составляющей любого проекта уникального сооружения должно быть предварительное изучение отечественного и зарубежного опыта строительства аналогичных сооружений.

Для повышения эксплуатационной надежности транспортных сооружений требуется комплексная проработка различных методик: мониторинга и диагностики; оценки безопасности; повышения надежности сооружений, после введения в эксплуатацию [10]. Особое внимание следует уделить формированию математических моделей вероятных аварийных ситуаций большепролетных конструкций мостов вантового и висячего типов. Необходимо также более глубокое изучение напряженно-деформированного состояния сооружений при различных возможных воздействиях на них [11].

Литература

1. Chen W. F., Lian Duan L. Handbook of International Bridge Engineering. Florida (USA): CRC Press, 2013. pp. 1166-1167
2. Kopp G. A. Large-Scale and Full-Scale Methods for Examining Wind Effects on Buildings. Lausanne (Switzerland): Frontiers Media SA, 2018. 64 p.
3. Шумейко В.В., Карамышева А.А., Евтушенко А.И. Большепролетные вантовые несущие конструкции зданий и сооружений. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 5-13.
4. Карамышева А.А., Строев Д.А., Колотиенко М.А. Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений // Инженерный вестник Дона, 2019, №3. (принята к публикации)
5. Loughran P. Failed Stone: Problems and Solutions with Concrete and Masonry. Berlin (Germany): Walter de Gruyter, 2006. pp. 125-126.



6. Шумейко В.И., Кудинов, О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2164.

7. Melaragno M. Preliminary Design of Bridges for Architects and Engineers. Florida (USA): CRC Press, 1998. 307 p.

8. Tabatabai H. Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems: A Synthesis of Highway Practice. Washington (USA): Transportation Research Board, 2005. 32 p.

9. Winward S. J. A Critical Analysis of the Humber Bridge // Second Annual Bridge Engineering 2 Conference. Bath (UK): University of Bath, 2008. URL: people.bath.ac.uk/jjo20/conference2/2008/WINWARD%20PAPER%2023.pdf

10. Гиря Л.В., Хоренков С.В. Проблемы консервации и технического обследования объектов капитального строительства в современных условиях // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1656.

11. Zhu H., Zhou Z., Chen M. Deformation Compatibility Control for Engineering Structures: Methods and Applications. Berlin (Germany): Springer, 2016. pp. 90-91.

References

1. Chen W. F., Lian Duan L. Handbook of International Bridge Engineering. Florida (USA): CRC Press, 2013. pp. 1166-1167

2. Kopp G. A. Large-Scale and Full-Scale Methods for Examining Wind Effects on Buildings. Lausanne (Switzerland): Frontiers Media SA, 2018. 64 p.

3. Shumeyko V.V., Karamysheva A.A., Yevtushenko A.I. Bol'sheproletnyye vantovyye nesushchiye konstruktсии zdaniy i sooruzheniy [Long-span cable-carrying structures of buildings and structures]. Rostov-na-Donu: DSTU, 2019. pp. 69-73.



4. Karamysheva A.A., Stroev D.A., Kolotienko M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №3. (accepted for publication)
5. Loughran P. Failed Stone: Problems and Solutions with Concrete and Masonry. Berlin (Germany): Walter de Gruyter, 2006. pp. 125-126.
6. Shumejko V. I., Kudinov O.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
7. Melaragno M. Preliminary Design of Bridges for Architects and Engineers. Florida (USA): CRC Press, 1998. 307 p.
8. Tabatabai H. Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems: A Synthesis of Highway Practice. Washington (USA): Transportation Research Board, 2005. 32 p.
9. Winward S. J. Second Annual Bridge Engineering 2 Conference. Bath (UK): University of Bath, 2008. URL: people.bath.ac.uk/jjo20/conference2/2008/WINWARD%20PAPER%2023.pdf
10. Girya L.V., Khorenkov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/165
11. Zhu H., Zhou Z., Chen M. Deformation Compatibility Control for Engineering Structures: Methods and Applications. Berlin (Germany): Springer, 2016. pp. 90-91.