

А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия

ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВНЕКЛАССНОГО МОСТА

Представлены краткие сведения об особенностях конструкции, технологий сооружения и организации мониторинга напряженно-деформированного состояния внеклассного мостового сооружения – третьего городского моста через р. Обь в г. Новосибирске. Сооружение является уникальным по своим техническим характеристикам («сетчатая» арка с длиной перекрываемого пролета 380 м) и сложности монтажа (надвижка арки по криволинейной пространственной траектории). Приведена информация о разработанной специалистами НИЛ «Мосты» СГУПС методике определения усилий натяжения вант по частотам собственных колебаний с применением автоматизированного измерительного комплекса «Тензор МС». Разработанная методика позволила осуществлять оперативный контроль изменения натяжения вантовых элементов и стала одной из составляющих системы мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций, реализованной при строительстве моста.

По завершении строительства специалистами СГУПС были выполнены работы по обследованию и испытаниям моста перед сдачей в эксплуатацию по специально разработанной программе. Необходимые для обоснования величины испытательной нагрузки расчеты выполнены в пространственной постановке в конечно-элементной среде MIDAS/Civil с учетом фактического напряженного состояния основных конструктивных элементов, зафиксированного по результатам наблюдений в процессе строительства. Испытательная нагрузка была сформирована из 24 грузовых автомобилей средней массой около 25 т каждый. При испытаниях применены современные автоматизированные измерительные комплексы для фиксации местных деформаций и частот собственных колебаний. Перемещения контрольных точек конструкции арочного пролетного строения зафиксированы с помощью наземных лазерных сканеров. Полученные при испытаниях результаты подтвердили соответствие фактической работы конструкций принятым расчетным предпосылкам. Проведенные исследования позволяют организовать мониторинг состояния моста в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: мостовое сооружение, мониторинг, диагностика, испытания, оценка технического состояния, контроль усилий натяжения вант, Бугринский мост.

A.N. Iashnov, S.Iu. Poliakov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ENGINEERING SUPPORT OF CONSTRUCTION THE EXTRACURRICULAR BRIDGE

The article gives a brief information about the design features, construction technologies and organization of the stress-strain state monitoring of extracurricular bridge construction – third bridge over R. Ob in the Novosibirsk. The building is unique on its technical characteristics – mesh arch with the length of the covered span is 380 m, and on the complexity of assembly – the sliding of the arch along a curved spatial trajectory. The article also gives an information about the method of determining the effort guys tension on the natural frequency of oscillation with the use of automated measuring complex “Ten-

sor MC", which developed by Research Laboratory "Bridges" STU specialists. This method allowed to carry out operational control for the changes of the tension cable elements and it is one of the components of the stress-strain state monitoring system, which implemented in the bridge construction.

Upon completion, before the opening of the bridge in operation STU specialists performed the examination and testing of the bridge by the specially developed program. The calculations, that are necessary to substantiate the value of load test, performed in the spatial setting in the finite element environment MIDAS/Civil based on the actual stress state of the main structural elements, which fixed on observations during construction. The test load was composed of 24 trucks average weight is about 25 tons each. During the test are applied modern automated measuring systems for fixing local deformations and natural frequencies of oscillation. Move of the control points of the arched design is fixed by means of terrestrial laser scanners. The received in the tests results confirmed the compliance of the actual work designs accepted calculation assumptions. The conducted research allows to monitor the status of the bridge during operation.

Keywords: bridge construction, monitoring, diagnosis, testing, assessment of technical condition, the control effort cables tension, Bugrinskij bridge.

В последние годы в г. Новосибирске в связи с резким увеличением автомобильного парка возникла необходимость в сооружении новых мостовых переходов через р. Обь. Существующие мосты в центральной части города – Октябрьский (Коммунальный) и Димитровский – практически перестали справляться с возросшим потоком автомобилей (для примера на рис. 1 приведены показания веб-камеры, отражающие обычный уровень загруженности транспортом Октябрьского моста). Чтобы предотвратить транспортный коллапс и обеспечить дальнейшее устойчивое развитие городских территорий, было принято решение о возведении третьего моста через р. Обь по Оловозаводскому створу, названного впоследствии Бугринским.



Рис. 1. Интенсивность движения на мосту через р. Обь в г. Новосибирске

Проект нового мостового перехода через р. Обь был разработан ЗАО «Институт «СТРОЙПРОЕКТ»» (г. Санкт-Петербург) [1]. Мост запроектирован в соответствии со СНиП 2.05.03–84* под нормативную временную нагрузку от автотранспортных средств в виде полос А14 и одиночной колесной нагрузки Н14 по ГОСТ Р 52748–2007. Нагрузка на тротуары при учете совместно с другими действующими временными нагрузками принята 2,0 кПа. Пропускная способность сооружения – не менее 135 000 автомобилей в сутки при расчетной скорости 100 км/ч. Габариты проезжей части обеспечивают размещение шести полос движения (по три в каждом направлении, ширина каждой полосы – 3,75 м) с полосами безопасности шириной 1,5 м справа по ходу движения и 1,0 м – слева, а также тротуарных проходов по краям пролетных строений шириной по 1,5 м с уширением до 2,5 м в пределах арочного пролета. Мост выполнен по схеме $(62,5+2\times 78,0+74,4) + 380,0 + (77,5+2\times 78,0+74,5) + (59,5+4\times 66,0+59,5) + (74,5+105,0+74,7) + 2\times(41,5+2\times 42,0+41,5) + (41,5+42,0+36,1)$ м и имеет полную длину 2096 м.

Пойменные пролетные строения (пролеты 1–5 и 6–30) – неразрезные балочные, сталежелезобетонные с ездой поверху, состоящие в поперечном сечении из четырех главных балок коробчатой конструкции, объединенных между собой по железобетонной плите и поперечными балками, а в надпорных сечениях – дополнительно поперечными связями. Железобетонная плита забетонирована на месте в съёмной щитовой опалубке (для левобережной части, пролеты 5–6) и в несъёмной опалубке (для правобережной части, пролеты 6–30) и включена в совместную работу с металлическими балками посредством гибких упоров типа «Нельсон». Такие конструктивные решения пролетных строений получили широкое распространение в последние годы, общий вид конструкций на пойменных участках показан на рис. 2.

Наибольший интерес вызывает устройство руслового пролетного строения, имеющего уникальную конструкцию – две коробчатые наклонные арки пролетом 380 м и стрелой подъема около 70 м. Затяжка арки представляет собой две стальные коробки высотой по 2,5 м (главные балки) и две балки двутаврового сечения высотой по 2,44 м (продольные балки). Арки – коробчатого сечения (высотой по 3 м и шириной по 2,1 м каждая), объединены между собой системой поперечных связей. Совместную работу арки и затяжки обеспечивают четыре плоскости вантовых подвесок (39 вант в каждой плоскости, по две плоскости подвесок на арку). Ванты состоят из семипроволочных прядей –

монострендов, от 8 до 19 прядей в каждой, причем активные анкеры, расположенные в арках, позволяют производить регулировку усилий натяжения. На рис. 3 приведен общий вид главного пролета Бугринского моста.



Рис. 2. Конструкция пойменных пролетных строений Бугринского моста (правобережный участок)



Рис. 3. Главное русловое пролетное строение Бугринского моста

Сооружение такого уникального и технически сложного объекта было осуществлено за 5 лет – с конца 2009 по 2014 г. Работы по монтажу были выполнены подразделениями генеральной подрядной строи-

тельной организации ОАО «Сибмост». Строительство моста велось одновременно на двух берегах. Монтаж конструкций выполнен способом продольной надвигки, причем на правом берегу надвигка пойменных пролетных строений для сокращения сроков строительства производилась в двух направлениях. Левобережное пойменное пролетное строение и затяжка арочного руслового пролетного строения были надвинуты с левого берега. После надвигки затяжка опирается, до этапов натяжения вант, на временные и капитальные опоры с общим количеством точек опирания – 32 шт. Заметим, что для обеспечения соответствия опорных реакций проекту потребовалась организация контроля с применением специально разработанного в НИЛ «Мосты» оборудования. На следующем этапе на затяжке был смонтирован арочный свод, который собран по технологии конвейерно-тыловой сборки на стапелях, установленных по концам затяжки, с последующей надвигкой с двух сторон по временным опорам, смонтированным на затяжке в створе с нижними временными опорами под затяжкой. Разработанную ЗАО «Институт “СТРОЙПРОЕКТ”» [2] технологию можно с полным основанием считать уникальной, а ее осуществление потребовало организации контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций на всех этапах для недопущения возникновения каких-либо внештатных и аварийных ситуаций и обеспечения соответствия проекту. Важность и необходимость научного сопровождения при строительстве транспортного комплекса всегда подчеркивалась учеными транспортной отрасли [3–5]. Поэтому специалистами НИЛ «Мосты» СГУПС была разработана и реализована программа мониторинга НДС основных несущих конструкций пролетных строений в процессе монтажа.

Завершающий этап – монтаж и натяжение вант, обеспечивающих совместную работу комбинированной конструкции (арки с затяжкой), – осуществлен филиалом швейцарской компании VSL в России. При этом контроль натяжения вант выполняется с помощью специальных мессдоз. Однако известны и другие способы определения усилия натяжения, в том числе косвенно, по частоте собственных колебаний [6–9]. Для обеспечения независимого контроля величины натяжения вант специалисты НИЛ «Мосты» СГУПС как раз и применили методику, основанную на определении усилия в растянутом ванте по частоте собственных колебаний, но доработанную с учетом свойства кратности собственных частот колебания струны.

Поскольку длина подвески значительно больше поперечных размеров, ее можно рассматривать как струну. Это позволяет, зная частоту ее собственных колебаний, использовать для определения усилия натяжения известную аналитическую формулу [10]:

$$N = \frac{m \cdot (2Lv)^2}{n^2}, \quad (1)$$

где N – продольное усилие в подвеске, Н; m – погонная масса подвески, кг/м; L – длина подвески, м; v – собственная частота колебаний подвески, Гц; n – порядковый номер формы колебаний подвески.

На практике может проявляться значительное число форм колебаний вант (например, на мосту через р. Обь в г. Сургуте – до 20 форм колебаний [11]), для фиксации которых требуется большое количество датчиков, установленных по всей длине ванта. Однако, используя высокочувствительные вибродатчики-акселерометры системы «Тензор МС» [12], можно фиксировать колебания в месте закрепления ванта, где проявляются все формы колебательного процесса. Сложность применения такой методики заключается в правильном учете фактического положения точки заделки ванта. Например, при разработке методики было исследовано включение пассивного анкера в колебательный процесс, а анализ полученных данных позволил определить фактическую расчетную длину ванта. Кроме того, фиксирование параметров колебаний вант при разной температуре позволило сделать вывод, что перепад температур практического влияния на усилия в вантах не оказывает, следовательно, можно не учитывать температурный фактор.

В итоге для фиксации колебаний был использован один вибродатчик-акселерометр, записывающий колебания вантовых подвесок в направлении поперек оси моста. Исследования показали, что в большем количестве датчиков нет необходимости. Колебания вант возбуждались с помощью метода «малых воздействий» – нескольких одиночных толчков испытателем пассивного анкера на затяжке. Характерный вид получаемых спектрограмм, позволяющий выделить кратные частоты колебаний, показан на рис. 4 (хорошо видна повторяемость пиков с одинаковым шагом).

Разработанная методика дает хорошую сходимость полученных результатов с данными компании VSL – разница усилий по большей части не превышает 10 %, что достаточно для организации периодических контрольных проверок усилий натяжения вант. Таким образом, устраняется необходимость использования дорогостоящих импортных

мессдоз для определения усилий натяжения, к тому же требующих больших трудозатрат при перестановке.

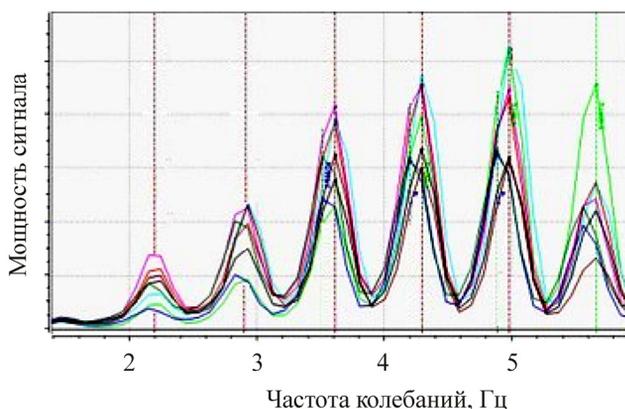


Рис. 4. Спектрограмма колебаний вантовой подвески

После завершения строительства специалистами СГУПС были проведены статические испытания неразрезного пролетного строения через р. Иня (правобережный участок моста) и главного арочного руслового пролетного строения, а также динамические испытания сооружения. Работы проведены в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

При динамических испытаниях колебания пролетных строений фиксировали с помощью вибродатчиков-акселерометров комплекса «Тензор МС» [12], высокая чувствительность которых позволила провести испытания с помощью метода «малых воздействий», когда конструкция выводилась из состояния относительного равновесия посредством прыжков испытателей. В результате анализа полученных вибро- и спектрограмм определены динамические параметры сооружения.

Колебательный процесс неразрезных пролетных строений на пойменных участках моста весьма сложный, для него характерно наличие широкого спектра частот (рис. 5), наложенных друг на друга. При выведении одного из пролетов неразрезного пролетного строения из состояния «относительного» покоя фиксируются колебания как самого пролетного строения, так и его отдельных элементов, а кроме того, на виброграммах отражаются и периодические внешние воздействия. Однако детальный анализ полученных частот позволяет сделать вывод, что низшие моды собственных колебаний лежат в диапазоне от 1,1 Гц при пролете 105 м до 1,9 Гц при пролете 42 м.

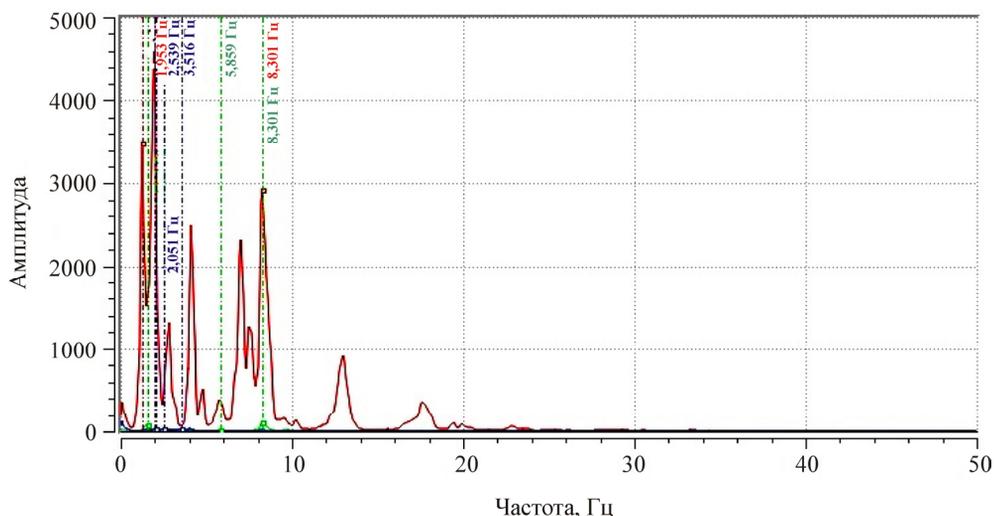


Рис. 5. Спектрограмма колебаний неразрезного пролетного строения 1–5 (выведение из равновесия и фиксация колебаний в пролете 3–4 длиной 78 м)

Динамическая диагностика арочного пролетного строения показывает, что первая низшая форма вертикальных колебаний происходит на частоте 0,78 Гц (рис. 6), горизонтальных – 0,48 Гц. Особенностью конструкции «сетчатой» арки с регулярным шагом вантовых подвесок является наличие кратных частот с шагом 0,78 Гц, особенно хорошо проявляющихся в замковом сечении арки (см. рис. 6).

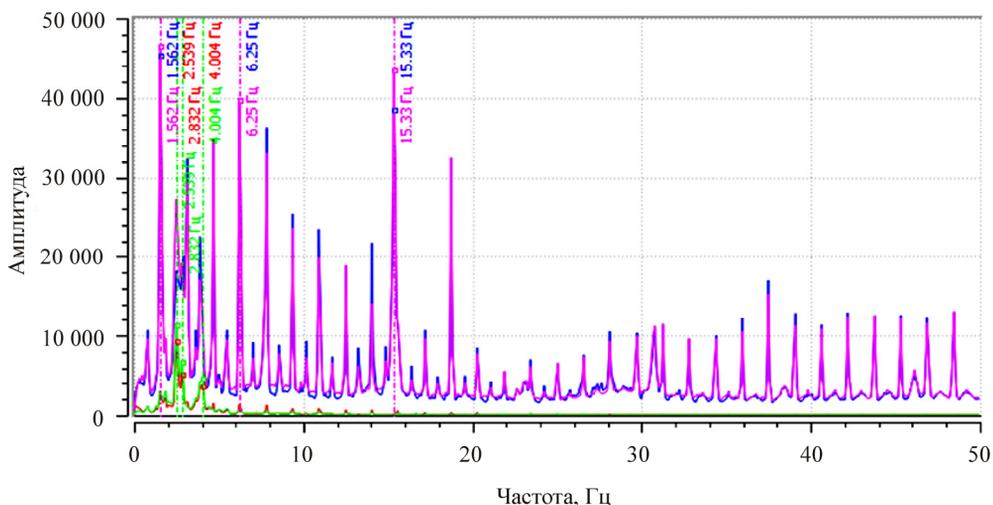


Рис. 6. Спектрограмма колебаний, фиксируемых в верхней точке арки

При статических испытаниях измеряли фибровые деформации в характерных сечениях конструкций при загрузке испытательной нагрузкой. При испытании арочного пролетного строения было задействовано 24 груженых песком автомобиля-самосвала КамАЗ-65115 средней массой около 25 т и общим весом 600 тс (рис. 7). Расчетный уровень нагруженности для различных элементов конструкции составил от 50 до 100 % расчетных усилий от проектной временной нагрузки. Максимальные зафиксированные напряжения в арках не превысили 250 кгс/см² на сжатие, в главных и продольных балках затяжки – 500 кгс/см² на растяжение. Результаты исследования работы поперечных балок также показали, что характер их работы соответствует ожидаемому, напряжения в ходе испытаний не превышали 500 кгс/см². Значения конструктивных коэффициентов, полученные на максимальных уровнях нагружения, близки к единице. Остаточные прогибы пролетного строения составили около 7 мм, что не превышает регламентированных СНиП 3.06.07–86 значений. Учитывая фактический уровень напряжений от постоянной нагрузки, зафиксированный в процессе контроля НДС при строительстве, можно сделать вывод о наличии запасов несущей способности элементов пролетного строения.



Рис. 7. Установка испытательной нагрузки на мосту

Следует отметить, что при статических испытаниях определение изменения усилий натяжения вант при заезде испытательной нагрузки осуществлено с помощью фиксации собственных частот колебаний

вант. При расчетных максимальных усилиях от испытательной нагрузки в наиболее нагруженных вантовых подвесках 30–33 тс были зафиксированы фактические усилия 30–35 тс (средний конструктивный коэффициент $K_k = 1,04$).

Результаты статических и динамических испытаний пролетных строений свидетельствуют о соответствии фактической работы конструкции расчетным схемам, заложенным при проектировании, и подтверждают высокую жесткость и несущую способность пролетных строений. Полученные в результате научно-технического сопровождения строительства данные позволяют организовать мониторинг состояния моста в процессе эксплуатации, основываясь на фактическом уровне напряженно-деформированного состояния, сформировавшемся в процессе строительства.

Список литературы

1. Девичинский Ю.Б., Суровцев Б.А. Третий мост через Обь в Новосибирске: особенности проекта // Дороги. Инновации в строительстве. – 2011. – № 15. – С. 68–74.

2. Вихров М.С. Особенности конструкции пролетного строения Бугринского моста // Дороги. Инновации в строительстве. – 2014. – № 35. – С. 67–71.

3. Цернант А.А. Научное сопровождение объектов как условие обеспечения комплексной безопасности строительства // Транспортное строительство. – 2009. – № 3. – С. 2–5.

4. Картопольцев В.М., Боровиков А.Г. Об инженерно-техническом сопровождении строительства объектов дорожного комплекса // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов, мостов и автомобильных дорог. Механизация строительства. Охрана окружающей среды: материалы Рос. науч.-техн. конф. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – С. 172–175.

5. Яшнов А.Н., Кузьменков П.Ю. Мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций мостов в процессе сооружения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – Т. 3. – С. 330–335.

6. Ladysz A. Structural health monitoring and life-cycle costing of structures. Application to cable-stayed bridges. – Barcelona, 2008. – 62 p. –

URL: <https://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/5646> (accessed 10 September 2014).

7. Мисюра Е.А. Влияние изгибной жесткости на динамические свойства вант / Днепропетр. ин-т инженеров железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2004. – С. 233–237.

8. Бахтин С.А. Проектирование висячих и вантовых мостов. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 1995. – 122 с.

9. Jarosevic A. Magnetoelastic method of stress measurements in steel // NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. – Nantes, France, 2009. – URL: <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/60.pdf> (accessed 12 September 2014).

10. Вантовые мосты / А.А. Петропавловский [и др.]. – М.: Транспорт, 1985. – 224 с.

11. Автодорожный мост через реку Обь у г. Сургута: особенности проектирования и строительства / В.Ф. Солохин [и др.]. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2002. – 164 с.

12. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / С.А. Бокарев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 25.

References

1. Devichinskii Iu.B., Surovtsev B.A. Tretii most cherez Ob' v Novosibirsk: osobennosti proekta [The third bridge across the Ob river in Novosibirsk: project specificity]. *Dorogi. Innovatsii v stroitel'stve*, 2011, no. 15, pp. 68-74.

2. Vikhrov M.S. Osobennosti konstruksii proletnogo stroeniia Bugrinskogo mosta [Specificity of the Bugrinskii bridge superstructure]. *Dorogi. Innovatsii v stroitel'stve*, 2014, no. 35, pp. 67-71.

3. Tsernant A.A. Nauchnoe soprovozhdenie ob"ektov kak uslovie obespecheniia kompleksnoi bezopasnosti stroitel'stva [Scientific support of facilities as a prerequisite of comprehensive safety construction]. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2009, no. 3, pp. 2-5.

4. Kartopol'tsev V.M., Borovikov A.G. Ob inzhenerno-tekhicheskom soprovozhdenii stroitel'stva ob"ektov dorozhnogo kompleksa [About engineering and technical support of the construction road complex projects]. *Materialy Rossiiskoi nauchno-tekhicheskoi konferentsii "Problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii fundamentov, mostov i avtomobil'nykh dorog. Mekhanizatsiya stroitel'stva. Okhrana okruzhayushchei*

sredy". Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, pp. 172-175.

5. Iashnov A.N., Kuz'menkov P.Iu. Monitoring napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniia konstruktsii mostov v protsesse sooruzheniia [Monitoring of the stress-strain state of the bridge structures during the construction]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, vol. 3, pp. 330–335.

6. Ladysz A. Structural health monitoring and life-cycle costing of structures. Application to cable-stayed bridges. Barcelona, 2008. 62 p., available at: <https://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/5646> (accessed 12 September 2014).

7. Misiura E.A. Vliyanie izgibnoi zhestkosti na dinamicheskie svoistva vant [The influence of the bending stiffness on the dynamic cables properties]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskii institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta, 2004, pp. 233-237.

8. Bakhtin S.A. Proektirovanie visyachikh i vantovykh mostov [The design of suspension and cable-stayed bridges]. Novosibirsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet putei soobshchenia, 1995. 122 p.

9. Jarosevic A. Magnetoelastic method of stress measurements in steel. Nantes, 2009, available at: <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/60.pdf> (accessed 12 September 2014).

10. Petropavlovskii A.A. [et al.]. Vantovye mosty [Cable-stayed bridges]. Moscow: Transport, 1985. 224 p.

11. Solokhin V.F. [et al.]. Avtodorozhnyi most cherez reku Ob' u g. Surguta: osobennosti proektirovaniia i stroitel'stva [Road bridge across the Ob river near the Surgut: design and construction specificity]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2002. 164 p.

12. Bokarev S.A. [et al.]. Malogabaritnye avtomatizirovannye sistemy dlya diagnostiki ISSO [Compact automated systems for diagnostics of artificial structures]. *Put' i putevoe khoziaistvo*, 2007, no. 9, p. 25.

Получено 12.03.2015

Об авторах

Яшнов Андрей Николаевич (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Мос-

ты» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, e-mail: yan@stu.ru).

Поляков Сергей Юрьевич (Новосибирск, Россия) – студент Сибирского государственного университета путей сообщения» (630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, e-mail: sergey19920@mail.ru).

About the authors

Andrei N. Iashnov (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Department Head of Bridges, Siberian Transport University (191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation, e-mail: yan@stu.ru).

Sergei Iu. Poliakov (Novosibirsk, Russian Federation) – Student, Siberian Transport University (191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, e-mail: sergey19920@mail.ru).