

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.042.1

А.Н. Иванов, П.Ю. Кузьменков

**Мониторинг технического состояния автодорожного моста
через реку Пашенку**

Статья посвящена организации системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений. Примечательно, что в данной работе рассматривается уникальный мост с гибридным по материалу пролетным строением, в котором несущие фермы выполнены из полимерного композиционного материала и включены в совместную работу с железобетонной плитой проезжей части. В статье излагаются общие вопросы организации мониторинга на разных этапах жизненного цикла сооружения и подробно описываются частные особенности применительно к рассматриваемой конструкции. Особое внимание в работе уделяется сборке пролетного строения и организации мониторинга технического состояния на этапе его монтажа для выявления фактического состояния конструкции на момент ввода в эксплуатацию и сопоставления с теоретическими предпосылками, заложенными в проект. Для контроля технического состояния сооружения выделяются два независимых контролируемых фактора: напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики. В разделе, посвященном наблюдениям за напряженно-деформированным состоянием пролетного строения, обосновывается количество и положение контролируемых элементов и фибр, описывается приборная база для контроля местных деформаций элементов с обеспечением необходимой точности и подробно анализируются результаты с привязкой к фактической температуре окружающего воздуха. За счет измерения деформаций по всем фермам оценивается работа пролетного строения как в продольном, так и в поперечном направлении. В разделе по контролю динамических параметров конструкции описывается приборная база и положения вибродатчиков на сооружении, которые позволяют определять частоты и логарифмические декременты затухания собственных частот пролетного строения, а также выявлять формы колебаний конструкции. Разработанная система мониторинга позволяет накапливать данные о поведении уникальной конструкции в реальных условиях эксплуатации для дальнейшего ее совершенствования и оптимизации, а также оценивать фактическое состояние сооружения в любой момент времени на основе комплексного анализа результатов наблюдений за напряженно-деформированным состоянием и динамическими параметрами.

Ключевые слова: мониторинг, напряженно-деформированное состояние, строительный подъем, нормальные напряжения, динамические характеристики.

Летом 2014 г. в Новосибирской области на автомобильной дороге Красный Яр – Сосновка на пересечении р. Пашенки был сдан в эксплуатацию первый в России автодорожный мост с уникальным пролетным строением из полимерного композиционного материала. Пролетное строение представляет собой гибридную по материалу конструкцию, в которой фермы, выполненные из стеклопластиковых элементов, включены в совместную работу с железобетонной плитой проезжей части. Такое конструктивное решение было реализовано впервые в мировом мостостроении. С целью изучения характера работы моста в условиях реальных подвижных нагрузок и внешних природных факторов сотрудниками НИЛ «Мосты» СГУПС была разработана программа мониторинга его технического состояния. Особое внимание при организации мониторинга уделялось экспериментальному пролетному строению [1]. В основу программы был положен многолетний опыт сотрудников лаборатории в организации и прове-

дении долговременных наблюдений за техническим состоянием уникальных инженерных сооружений, таких как Бугринский мост в г. Новосибирске [2], железнодорожный мост через р. Енисей в Красноярске, автодорожные мосты через реки Обь и Иртыш на федеральной трассе М51 и т.д. Для контроля технического состояния пролетного строения были выделены два независимых контролируемых фактора: напряженно-деформированное состояние (НДС) и динамические характеристики [3].

Напряженно-деформированное состояние конструкции. Для установления фактического НДС было решено измерять относительные продольные деформации наиболее нагруженных элементов и общие вертикальные деформации пролетного строения. На основании расчетов было выделено три характерных области наиболее нагруженных элементов каждого типоразмера поперечных сечений: опорная зона, треть пролетного строения и средняя зона [4]. В каждой зоне для контроля деформаций приняты характерные элементы,

отражающие работу всей конструкции. Всего оборудовано 196 мерных баз, из которых 192 на стеклопластиковых элементах ферм и 4 на железобетонной плите в середине пролета. Расположение мерных баз на фермах пролетного строения для измерения продольных деформаций элементов показано на рис. 1.

Деформации измеряют по мерным базам специальными механическими компараторами конструкции НИЛ «Мосты» СГУПСа [5] с электронными индикаторами (ценой деления 0,001 мм). Измерение деформаций в каждой точке пролетного строения производят двумя приборами. Снятие отчетов по каждому из приборов выполняют при двух постановках относительно элемента (прямое измерение и обратное). Такой подход позволяет исключать случайные ошибки в показаниях. Для учета влияния температуры на показания приборов после измерения деформаций в контрольной точке с помощью компараторов измеряют деформации шаблонов. Так как компараторы и ферма выполнены из разных материалов, для измерений используют два шаблона – один из

стали Ст3, другой из стеклопластика марки СППС-240 [6]. На рис. 2 показан комплект компараторов, изготовленный специально для контроля НДС пролетного строения моста через р. Пашенку.

Полученные по результатам мониторинга местные деформации элементов пролетного строения пересчитывают в напряжения по закону Гука:

$$\sigma = E \varepsilon = E \delta / L,$$

где σ – нормальное напряжение; E – модуль упругости материала контролируемого элемента; ε – относительная продольная деформация; δ – абсолютная деформация; L – длина базы, на которой измеряется деформация.

Общие вертикальные деформации ферм на стадии монтажа измеряют с помощью нивелира Sokkia B20, на стадии эксплуатации – с помощью электронного тахеометра Leica TCR802. Для этого в середине и по концам нижнего пояса ферм закреплены точки, по которым ведутся контрольные измерения отметок. Все отметки по итогам съемки привязы-

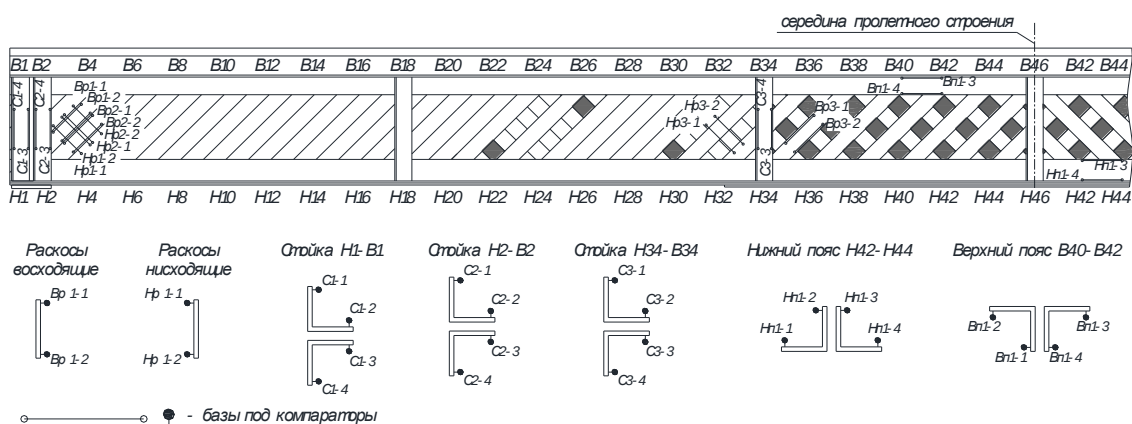


Рис. 1. Схема расположения мерных баз на элементах ферм



Рис. 2. Комплект механических компараторов

вают к трем реперам. Дополнительно выполняют съемку положения опор по двум точкам на каждой опоре для контроля их осадки и оценки влияния на пролетное строение.

Динамические параметры пролетного строения. Контроль динамических параметров осуществляют при помощи высокочувствительных датчиков вибрации системы «Тензор МС» методом малых воздействий [7]. Колебания конструкции фиксируют в двух наиболее информативных направлениях – продольном и поперечном, устанавливая датчики в середине пролета у левого ограждения безопасности, по оси моста и у правого ограждения безопасности. Такая расстановка позволяет фиксировать частоты собственных колебаний пролетного строения и логарифмический декремент их затухания одновременно во всех контрольных точках, что, в свою очередь, дает возможность качественно и количественно оценивать пространственный характер работы конструкции. Выведение пролетного строения из равновесия производят посредством прыжка одного человека поочередно в непосредственной близости от каждого места установки датчиков. Схема расстановки вибродатчиков на проезжей части пролетного строения приведена на рис. 3.

Правильная организация мониторинга НДС позволяет корректно оценивать текущее состояние конструкции и прогнозировать его изменение в будущем. За рубежом мониторинг конструкции принято разделять на три основных этапа [8]:

1) на стадии изготовления элемента или блока конструкции;

2) на стадии сборки и монтажа конструкции;

3) на стадии эксплуатации сооружения.

Мониторинг на стадии изготовления требует применения достаточно дорогих и сложных измерительных систем. Конфигурация стеклопластиковых элементов для изготовления ферм очень простая (прямоугольное и уголковое поперечные сечения постоянных по длине размеров) [2], а потому необходимости в использовании дорогостоящих измерительных приборов и в мониторинге на стадии изготовления элементов нет. Наиболее важным для экспериментального пролетного строения является мониторинг на стадии сборки и монтажа конструкции и мониторинг на стадии эксплуатации моста.

Изменение конструктивной схемы в ходе сборки (прикрепление элементов заполнения ферм к выгнутым поясам, включение плиты в совместную работу с фермами) приводит не только к изменению характера работы элементов ферм, но и к перераспределению фактических напряжений, накопившихся к этому моменту в конструкции. Теоретически оценить такое перераспределение напряжений очень сложно, особенно в конструкции с большим количеством элементов. Поэтому начальные измерения относительных продольных деформаций элементов ферм выполнены до их сборки, а в плите – после набора прочности бетона плиты. Изменение прогибов ферм фиксировали с момента выгиба поясов. Динамические параметры пролетного строения определены после окончания всех строительно-монтажных работ на стадии эксплуатации моста.

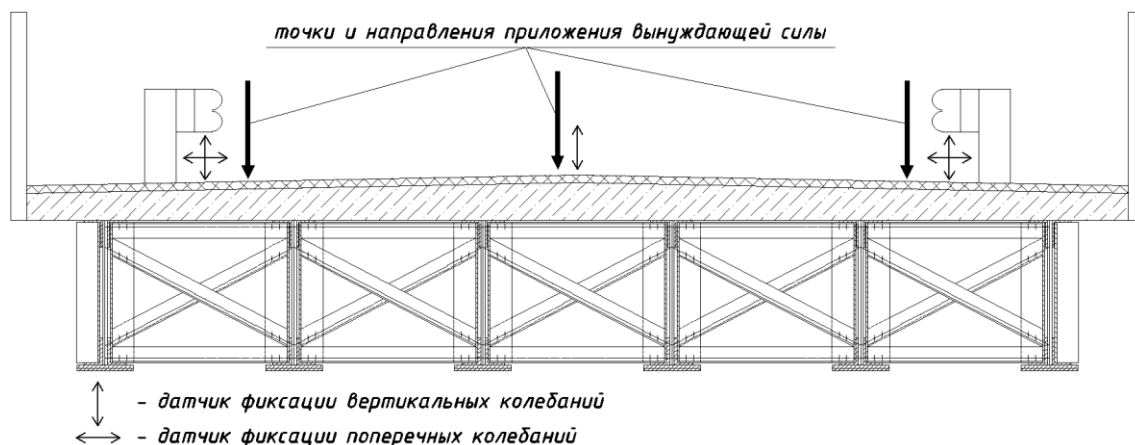


Рис. 3. Схема расстановки вибродатчиков на пролетном строении

На стадии сборки и монтажа пролетного строения соответствующие измерения выполнены с привязкой к основным характерным стадиям работ. Мониторинг на стадии эксплуатации сооружения было решено организовать с периодичностью осмотра и проведения измерительных работ 1 раз в 3 месяца (сезон) в первый год эксплуатации. Если внештатных ситуаций за первый год наблюдений не возникнет, а прогнозирование состояния будет оптимистичным, то в дальнейшем планируется проводить измерения 2 раза в год [9]. При этом наиболее целесообразными с точки зрения исследования работы конструкции в разнообразных условиях являются середина летнего и середина зимнего периодов с экстремальными для каждого из них температурами воздуха. Это позволит качественно оценить влияние на конструкцию природно-климатических факторов и количественно установить технические показатели пролетного строения для широкого диапазона температур в реальных условиях эксплуатации [10]. Стадийность выполненных работ в рамках мониторинга

технического состояния пролетного строения в период монтажа и эксплуатации с указанием даты проведения измерений представлена в таблице. Отсутствие дат на стадиях 1–3 объясняется тем, что фермы собирались на одном монтажном столе по очереди, а потому измерения были проведены в разное время.

По результатам контроля общих вертикальных деформаций ферм был построен график изменения их строительного подъема (рис. 4). По приведенному графику видно, что фермы в ходе монтажа конструкции деформировались одинаково, максимальное отклонение от среднего значения не превышало 3 мм. Это свидетельствует о хорошей организации процесса монтажа и четком соответствии принятой технологии сборки [11]. На момент сдачи моста в эксплуатацию средняя величина строительного подъема составила 8,2 см. Таким образом, снижение строительного подъема, заданного выгибом поясов ферм, в ходе монтажа не превысило 50 %. В период наблюдения за деформациями на стадии эксплуата-

Стадийность измерений в ходе мониторинга

Стадия	Дата	Контролируемые параметры	Описание состояния конструкции
0	12.04.2014	Напряжения в элементах ферм	Элементы подготовлены к сборке ферм
1	–	Напряжения в элементах ферм, выгиб ферм	Собранные фермы в горизонтальном положении на монтажном столе
2	–	Напряжения в элементах ферм, выгиб ферм	Собранные фермы установлены в вертикальный стенд
3	–	Напряжения в элементах ферм, выгиб ферм	Собранные фермы объединены поперечными связями и установлены в проектное положение на мосту
4	21.06.2014	Напряжения в элементах ферм, выгиб ферм	На фермах установлена опалубка, упоры и арматура для укладки бетона плиты
5	21.06.2014	Выгиб ферм	Уложен бетон трех секций плиты
6	02.07.2014	Напряжения в элементах ферм, выгиб ферм	Уложен весь бетон плиты
7	07.07.2014	Выгиб ферм, динамические характеристики	Перед испытаниями моста (не смонтированы конструкции мостового полотна и не уложена дорожная одежда)
8	07.07.2014	Выгиб ферм, динамические характеристики	После испытаний моста (не смонтированы конструкции мостового полотна и не уложена дорожная одежда)
9	12.07.2014	Напряжения в элементах ферм и в плите, выгиб ферм, динамические характеристики	Все работы на мосту завершены (1-я съемка в рамках мониторинга на стадии эксплуатации)
10	08.11.2014	Напряжения в элементах ферм и в плите, выгиб ферм, динамические характеристики	Все работы на мосту завершены (2-я съемка в рамках мониторинга на стадии эксплуатации)
11	26.01.15	Напряжения в элементах ферм и в плите, выгиб ферм	Все работы на мосту завершены (3-я съемка в рамках мониторинга на стадии эксплуатации)

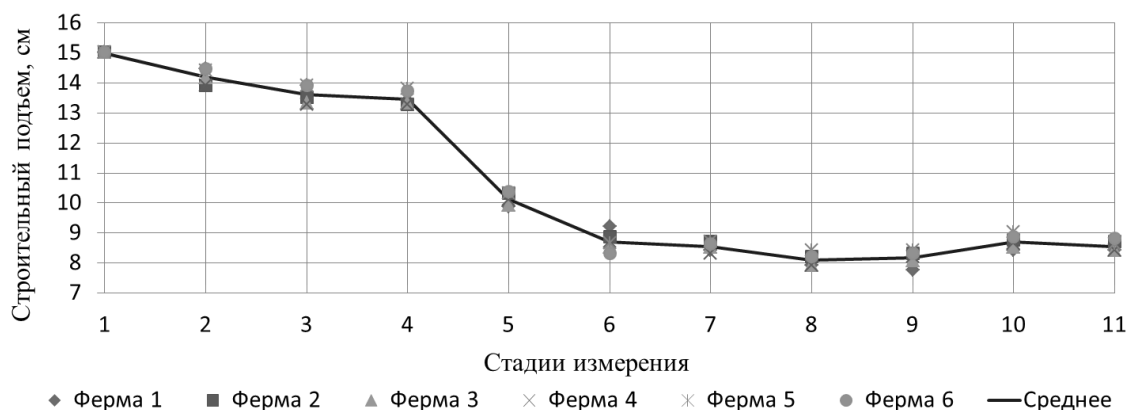


Рис. 4. График изменения строительного подъема пролетного строения

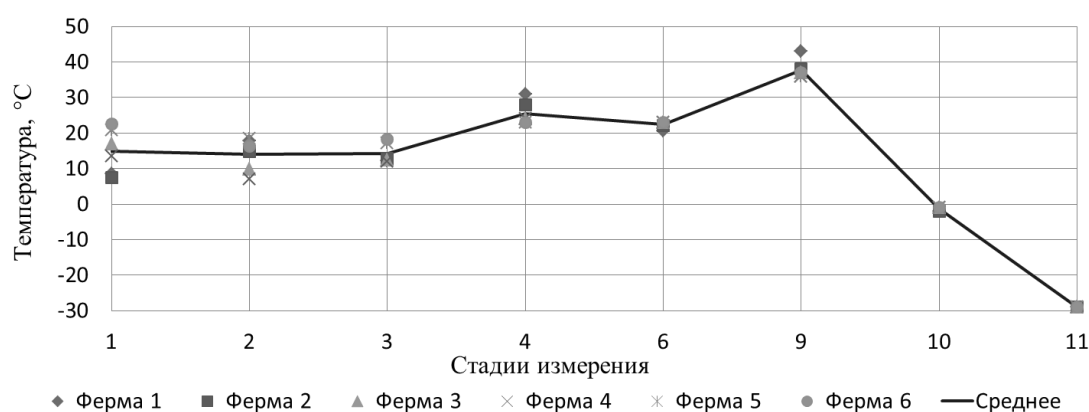


Рис. 5. График изменения температуры пролетного строения

ции моста отмечено незначительное их перераспределение и уменьшение, которое, скорее всего, связано с уменьшением температуры конструкции. График изменения температуры пролетного строения представлен на рис. 5. Различия в значениях линейных температурных коэффициентов стеклопластика и бетона приводят к тому, что ферма и плита от изменения температуры деформируются по-разному. Однако существенного влияния на общий уровень деформаций пролетного строения перепад в 70 °C не оказал.

Контроль относительных продольных деформаций элементов пролетного строения показал, что напряжения по итогам монтажа конструкции не превысили проектных значений [12]. По всем фермам элементы отработали практически одинаково и имеют близкие значения деформаций, что подтверждает вывод о качественном выполнении строительно-монтажных работ. Наибольшие значения напряжений в элементах ферм зафиксированы

в поясах, это объясняется их значительными деформациями при силовом выгибе для придания пролетному строению строительного подъема. Графики постадийного изменения средних значений нормальных напряжений в поясах ферм приведены на рис. 6 и 7.

Превышение абсолютных значений напряжений в верхних поясах над нижними обусловлено разными размерами поперечных сечений элементов. В целом же графики хорошо согласуются как между собой, так и с графиком изменения строительного подъема пролетного строения. Средние по фермам значения нормальных напряжений на стадии ввода моста в эксплуатацию (стадия 9) составили по верхнему поясу –27 МПа, но нижнему поясу 15 МПа. За время эксплуатации моста (полгода) существенного изменения напряжений не отмечено. Отклонения на последнем этапе измерений (26.01.2015 г.) от средних значений по фермам не превысили 6 МПа для верхнего пояса и 2 МПа для нижнего.

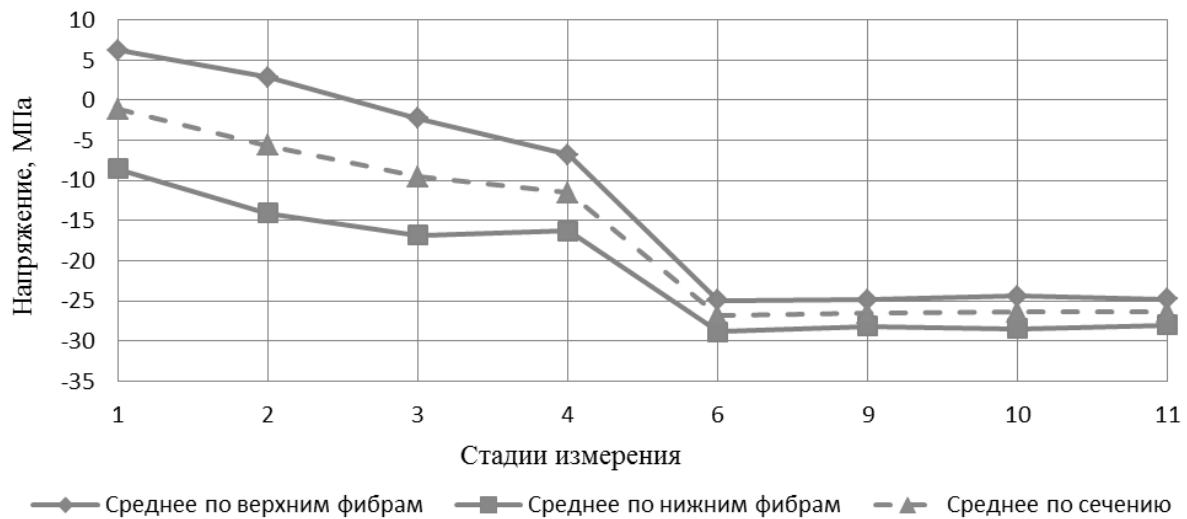


Рис. 6. График изменения осредненных по фермам нормальных напряжений в верхнем поясе

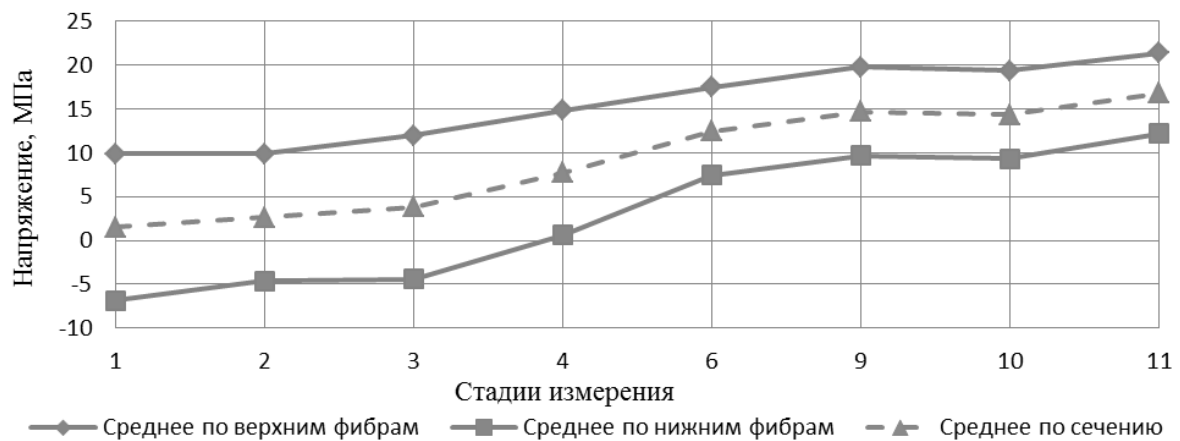


Рис. 7. График изменения осредненных по фермам нормальных напряжений в нижнем поясе

По результатам измерения динамических характеристик пролетного строения, полученным на этапах 9 и 10, можно сделать вывод, что существенных изменений в конструкции не произошло. Частота низших форм вертикальных колебаний не изменилась и составила на обоих этапах 4,785 Гц, а логарифмический декремент затухания собственных колебаний в вертикальной плоскости, равный 0,065 на этапе 9, уменьшился до 0,051 на этапе 10. На спектрограмме вертикальных колебаний, полученной по результатам обработки виброграммы, явно прослеживаются первые три формы колебаний с кратностью сигналов 4,785 Гц (рис. 8), что свидетельствует об отсутствии в конструкции побочных колебательных процессов.

В целом результаты мониторинга показали, что пролетное строение смонтировано

без нарушений технологии сборки, показатели конструкции стабильные. Техническое состояние моста на момент последних измерений можно оценить как хорошее, пропуск проектной нагрузки обеспечивается без ограничений. В ходе мониторинга отмечены небольшие колебания измеряемых величин на стадии эксплуатации моста (см. рис. 4, 6, 7), предположительно вызванные влиянием изменения температуры окружающего воздуха. Установление сезонных особенностей поведения конструкции и выявление общей тенденции изменения НДС и динамических параметров пролетного строения возможно только после проведения годичного цикла наблюдений. Поэтому описанные выше измерения будут продолжены в полном объеме.

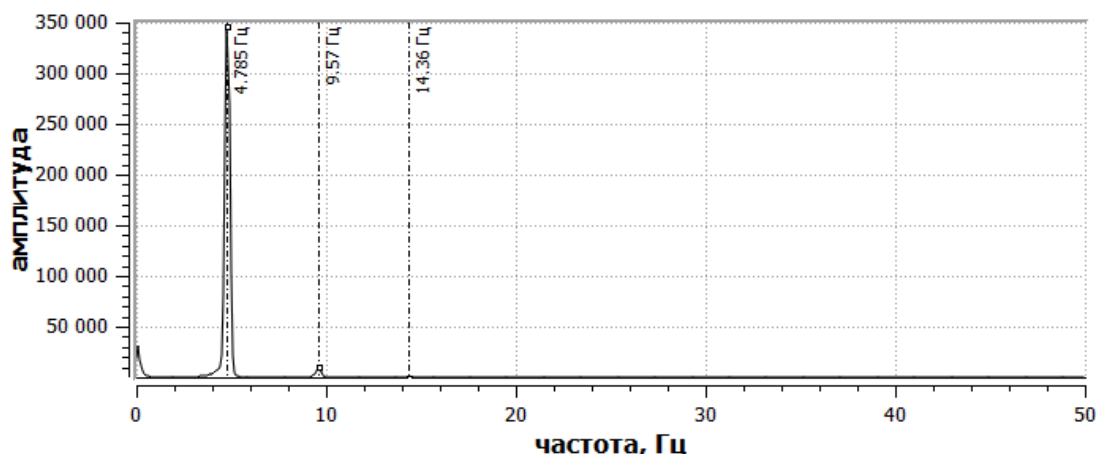


Рис. 8. Спектрограмма частот собственных колебаний на этапе 9

Библиографический список

1. Иванов А.Н. Проектирование гибридного пролетного строения автодорожного моста // Стеклопластик в пролетном строении автодорожного моста: Сборник статей. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. С. 25–36.
2. Яинов А.Н., Кузьменков П.Ю. Мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций мостов в процессе сооружения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. Пермь: ПНИПУ, 2012. С. 330–335.
3. ОДМ 218.4.002–2008. Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений. М., 2008. 40 с.
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84* / ОАО «ЦНИИС». М.: ОАО «ЦПП», 2011. 340 с.
5. Мурованный Ю.Н., Яинов А.Н. Технологии мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций при монтаже // Состояние и перспективы транспорта. Обеспечение безопасности дорожного движения. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. С. 65–72.
6. СТО 39790001.03–2007. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композитных материалов. Технические требования, методы испытаний и контроля. М.: ООО «НПП «АПАТЭК», 2007. 82 с.
7. Снежков И.И., Кузьменков П.Ю. Пример применения измерительного комплекса «Тензор МС» в мостостроении // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. С. 101–105.
8. Glisic B., Inaudi D. Fiber optic methods for structural health monitoring. Chichester: John Wiley&Sons Ltd, 2007. С. 257.
9. ОДМ 218.4.001–2008. Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах. М., 2008. 118 с.
10. Иванов А.Н., Яинов А.Н. Экспериментальное исследование работы гибридного по материалу пролетного строения на длительное воздействие нагрузки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: НГФТ, 2014. № 1-2. С. 142–146.
11. Пыринов Б.В. Первый автодорожный мост с фермами из стеклопластика и железобетонной плитой проезжей части // Стеклопластик в пролетном строении автодорожного моста: Сборник статей. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. С. 2–24.
12. ШИФР 2012-10-ИС-ОПЗ. Строительство автодорожного моста через р. Пашенка на а/д «Красный Яр – Сосновка» в Новосибирском районе НСО: В 8 т. Т. 1. Общая пояснительная записка. Новосибирск: Сибирские проекты, 2012. 130 с.

A.N. Ivanov, P.Yu. Kuzmenkov

Monitoring the Technical State of a Road Bridge across the Pashenka River

Abstract. The article describes a system for monitoring the technical state of an artificial structure, a road bridge across the Pashenka River. We consider an original bridge with a superstructure prepared from a hybrid material in which the bridge trusses, made of a polymer composite material, are included in joint operation with roadway reinforced concrete slabs. We describe in detail the general organization of the monitoring process at various stages of the bridge life and some specific features of the particular bridge design. Special attention is paid to assembling the superstructure and to the organization of the monitoring process at the installation stage aimed at revealing the actual state of the superstructure prior to its putting into operation and at making a comparison with theoretical assumptions laid to the basis of the particular bridge design. The technical state of the bridge is monitored considering two independently controlled factors, the mode of deformation and the dynamic characteristics of the superstructure. In the section devoted to the stress-strain observations of the superstructure, we give a substantiation to the number and location of controlled elements and fibers, describe the instrumentation used to control the local deformations of the elements with desired accuracy, and analyze the obtained data with due consideration for ambient air temperature. By measuring deformations in all bridge trusses, we evaluate the performance of the superstructure both in longitudinal and transverse direction. In the section devoted to the control of dynamic characteristics of the superstructure, we describe the instrumentation and the location of vibration sensors on the superstructure, which allow the determination of the frequencies and logarithmic decrements of natural oscillations of the superstructure and, also, the waveform of the oscillations. The developed monitoring system allows one to collect data on the behavior of the unique bridge structure under real service conditions for further improvement of the system and its optimization, and to evaluate, using a complex analysis of observation data concerning the stress-strain state and dynamic characteristics of the superstructure, the actual state of the superstructure at any time.

Key words: *monitoring; mode of deformation; camber; normal stress; dynamic behavior.*

Иванов Артем Николаевич – преподаватель кафедры «Мосты» СГУПСа. E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru

Кузьменков Павел Юрьевич – аспирант кафедры «Мосты» СГУПСа. E-mail: pavel.kuzmenkov.89@mail.ru