

УДК 624.21.01/.09

*ЯШНОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
yan@stu.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191,*

БАРАНОВ ТИМОФЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук.

baranov-87@yandex.ru

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15*

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АКАДЕМИЧЕСКОГО МОСТА ЧЕРЕЗ Р. АНГАРУ В ИРКУТСКЕ

В статье описаны способы и приемы проведения мониторинга вибраций Академического моста через р. Ангару в г. Иркутске в рамках общей системы наблюдений, называемой «Системой мониторинга геодинамической безопасности». Вибрации измерялись путем установки акселерометра в одни и те же точки пролетного строения циклами на протяжении шести лет. Проведен спектральный анализ показаний акселерометра, и осуществлено численное моделирование колебаний, которое выявило сходимость результатов. Представлены результаты семи циклов измерений колебаний, проведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: мониторинг; вибрации; Академический мост; спектральный анализ; частоты колебаний; формы колебаний.

*ANDREY N. YASHNOV, PhD, A/Professor,
yan@stu.ru*

*Siberian State Transport University,
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia,*

TIMOFEY M. BARANOV, PhD,

baranov-87@yandex.ru

Irkutsk State Transport University,

15, Chernyshevskii Str., 664074, Irkutsk, Russia

MONITORING OF DYNAMIC BEHAVIOR OF BRIDGE ACROSS THE ANGARA IN IRKUTSK

The paper describes the methods of vibration monitoring the Akademichesky Bridge across the Angara river in Irkutsk. Observations are provided by the Geodynamic Safety Monitoring System. Six-year measurements of vibrations have been provided in cycles using the accelerometer placed in the same points of the bridge superstructure. The spectral analysis of accelerometer readings and numerical simulation demonstrate the fine precision of results which include seven measurement cycles. A comparative analysis of obtained results is given herein.

Keywords: monitoring; vibrations; Akademichesky Bridge; spectral analysis; oscillation frequency; oscillation mode.

Современные методы содержания сложных и ответственных искусственных сооружений на автомобильных дорогах предусматривают проведение различных видов непрерывного мониторинга, организованного в автоматизированном режиме. Объекты мониторинга, а также требования к составу, средствам и способам его проведения закреплены в нормативных документах¹. В зарубежной и в последнее время отечественной практике известно много примеров организации инструментального мониторинга за состоянием и работой мостовых сооружений: *Akashi Kaikyo*, Япония [1], *Commodore John Barry*, США [2], *Hawkshaw*, Канада [3], мосты в Южной Корее [4], мост через р. Мацесту на автомобильной дороге Джугба – Сочи [5], мост им. Александра Невского, г. Санкт-Петербург [6], мост на о. Русский, г. Владивосток [7], Бугринский мост, г. Новосибирск [8, 9] и многие другие.

Комплексный мониторинг конструкций реализован на Академическом мосту через р. Ангару в г. Иркутске [10, 11]. Мост выполнен в монолитном железобетонном исполнении по схеме $(36.68 + 26.85 + 37.03 + 37.40 + 33.00) + (42.50 + 2 \times 42.00 + 42.50) + (84.00 + 2 \times 105.00 + 2 \times 105.00 + 84.00) + 4 \times (42.50 + 2 \times 42.00 + 42.50)$ раздельно в двух направлениях: верховом и низовом. Длина моста составляет 1615,080 м. Для зоны мостового перехода характерны активные геодинамические воздействия, к которым относятся сейсмические и геодеформационные факторы, способные привести к смещениям опор и связанным с ними изменениям напряженно-деформированного состояния в неразрезных системах предварительно напряженных железобетонных конструкций моста. Наиболее сложная русловая часть моста, которая согласно «Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений»² должна быть оборудована системой непрерывного мониторинга, показана на рис. 1. Специалистами ИрГУПС и СГУПС была создана инструментально-измерительная система, которая в увязке с методами оценки данных получила название «Система мониторинга геодинамической безопасности».

При организации мониторинга выделены три основные группы наиболее важных параметров, характеризующих работу мостовых сооружений. Во-первых, это измерения пространственно-временного положения элементов и всей конструкции в целом, а также геодинамических движений оснований. Данная группа измерений проводится геодезическими средствами и условно названа «геодезическим мониторингом». Ко второй группе можно отнести контроль изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов сооружений. Группа параметров по измерению напряженно-деформированного состояния названа «деформационным мониторингом». И наконец, динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений и частотных

¹ ОДМ 218.4.002–2008. Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений: введ. 2008-06-24. М.: Росавтодор, 2008. 45 с.
СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализир. ред. СНиП 2.05.03–84*; введ. 2011-05-20. М.: ЦНИИС, 2011. 341 с.

² Российская Федерация. Федеральный закон. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: от 30.12.2009 № 384-ФЗ: оф. текст с изм. и доп. от 02.07.2013 // Консультант-Плюс: справ. правовая система. М., 2016. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 10.02.2016 г.).

картин колебаний интегрально содержат данные о жесткостях, массах сооружения и внешних воздействиях.



Рис. 1. Общий вид руслового пролетного строения по схеме
(84.00 + 2 × 105.00 \$ 2 × 105.00 + 84.00) м

Результаты измерений при «динамическом мониторинге» позволяют выявить скрытые изменения прочностных свойств конструкций.

Таким образом, в задачи динамического мониторинга входит следующее:

- определение доминирующих частот свободных колебаний;
- оценка влияния сейсмической активности на динамическую работу сооружения;
- установление уровня влияния транспортных нагрузок на динамические характеристики;
- анализ частот с целью оценки и прогноза изменения технического состояния.

Необходимость решения поставленных в рамках динамического мониторинга задач открывает широкое поле как для исследований самих конструкций с оценкой развития в них скрытых повреждений, так и с точки зрения методик, инструментария и постановки задач мониторинга. И в этой связи следует отметить, что одной из основных характеристик любой конструкции являются параметры собственных колебаний (СК), представленные в виде набора частот и соответствующих им форм колебаний. Из динамики сооружений известно уравнение

$$(C - \lambda E)\bar{u} = 0,$$

где $C = AM$; A – матрица податливостей системы с n -степенями свободы; M – диагональная матрица масс; E – единичная диагональная матрица; λ , $\bar{u}$ – собственное значение и собственный вектор матрицы C .

При мониторинге частот собственных колебаний предметом измерений являются составляющие λ и $\vec{v}$, содержащиеся в спектральной плотности реакции моста на внешние воздействия. Собственные колебания вызываются рядом начальных условий, связанных с приданием конструкции начального перемещения и (или) начальной скорости, либо вызываются изменяющейся во времени нагрузкой с постоянным спектром воздействия.

На придании начальных перемещений основан метод «малых воздействий», когда, например, пролетное строение моста «раскачивается» от прыжка на нем одного или нескольких человек, затем претерпевает затухающие колебания с частотами, близкими к собственным. Однако его применение в условиях непрерывного мониторинга имеет определенные ограничения, связанные в первую очередь с постоянным движением по мосту автотранспорта. Затруднено при непрерывном автоматизированном мониторинге и применение активной вибродиагностики путем приложения гармонической вибрационной нагрузки, т. к. в этом случае производят разовые диагностические процедуры, а не постоянный контроль и модальный анализ.

Более перспективный способ вызова собственных колебаний конструкции основан на внешнем воздействии, обладающем постоянным частотным спектром $S(\omega)$, так называемом белом шуме [12]. В этом случае непрерывный мониторинг, во-первых, обеспечит репрезентативную выборку реализации частот собственных колебаний, а во-вторых, несмотря на малую чувствительность низшей частоты колебаний к дефектам на сооружении, позволит выявлять тенденции в изменении состояния. В отличие от методов «малых воздействий», проезжающий автотранспорт продуцирует колебания конструкций в достаточно широком диапазоне частот, соответствующих не только низшей, но и следующим за ней формам деформаций конструкции.

Предварительно с помощью конечно-элементных моделей в программе Midas Civil были произведены расчеты частот собственных колебаний и определены формы деформации конструкций. При моделировании учитывались фактические геометрические размеры и свойства материалов, постоянно действующие нагрузки: собственный вес пролетного строения, мостового полотна, перил и ограждений, а также опор освещения. Для нахождения низших форм колебаний составлены модели всего руслового пролетного строения, включающие опоры и особенности опирания на них пролетного строения (рис. 2, а). Для поиска более высокочастотных форм колебаний составлены детальные модели участка пролетного строения длиной 3 м (рис. 2, б).

Расчеты показали, что основная доля вертикальных колебаний происходит на частоте 1,6 и 2,2 Гц, а также на частоте 3,7 Гц. На данных частотах и на ряде других частот пролеты моста вовлекаются в колебание независимо друг от друга (рис. 3, а, б). Форма деформации, охватывающая все пролетное строение, а также среднюю опору, соответствует первой форме СК и происходит на частоте 0,7 Гц.

Более высокочастотные колебания обусловлены деформациями элементов поперечного сечения пролетного строения. При этом основные вертикальные деформации происходят на частотах 17,5 и 27,6 Гц за счет изгиба плиты проезжей части и плиты нижнего пояса пролетного строения (рис. 3, в, г).

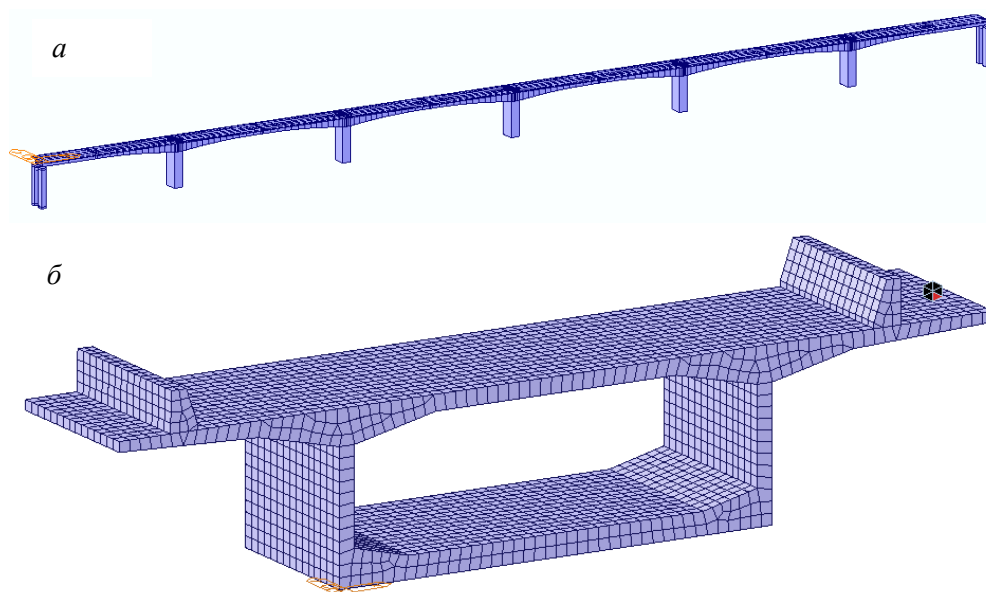


Рис. 2. Конечно-элементные модели пролетного строения:

a – всего пролетного строения, включая опоры; *б* – участка пролетного строения, значком обозначена масса опоры освещения

Для Академического моста периодические измерения динамических параметров проводятся с 2009 г. с использованием мобильной измерительной системы «Тензор МС» производства «Сибирского государственного университета путей сообщения», г. Новосибирск. Все измерения выполняли для пролетного строения русловой части низового моста в четвертях и середине для каждого пролета. На рис. 4 показан блок измерительной системы для динамических испытаний, состоящий из трех датчиков ускорений, аналогово-цифрового преобразователя с усилителями и управляющего компьютера.

Начальный банк данных получен в момент динамических испытаний при сдаче в эксплуатацию моста в 2008 г. После этого до начала 2016 г. было проведено семь измерений по схожей методике: 26.10.2009 г., 01.08.2011 г., 17.04.2012 г., 13.07.2012 г., 14.07.2013 г., 04.02.2015 г., 10.02.2016 г.

Начиная с апреля 2012 г. совместно с «Институтом земной коры» СО РАН внутри пролетного строения над опорой № 10 была установлена сеймостанция, фиксирующая ускорения по трем направлениям в непрерывном режиме. Сеймостанция состоит из пьезоакселерометра, регистрационного блока и блока бесперебойного питания (рис. 5). Сеймостанция работает в автономном режиме. Все собираемые данные записываются в файлы на флеш-носитель, установленный в сеймостанции. Следует отметить, что за весь период наблюдений существенных сейсмических событий не было зафиксировано, а те геодинамические воздействия, которые были в этот период, не привели к изменению динамических параметров сооружения.

Обработка сигналов акселерометра при периодическом мониторинге велась с использованием программы «Тензор-МС 2.1», разработанной

СТУПС. На спектральном разложении колебаний, как правило, четко просматривались доминирующие в колебаниях частоты. Все записи имели ярко выраженный набор инфразвуковых частот в диапазоне 17–30 Гц (рис. 6, а). Внутри коробки пролетного строения при движении по нему потока городского автотранспорта издается характерный низкий гул, который хорошо улавливается органами слуха. Частота этих колебаний согласуется с расчетными моделями, показывающими местные деформации элементов сечения пролетного строения (рис. 3, в, з).

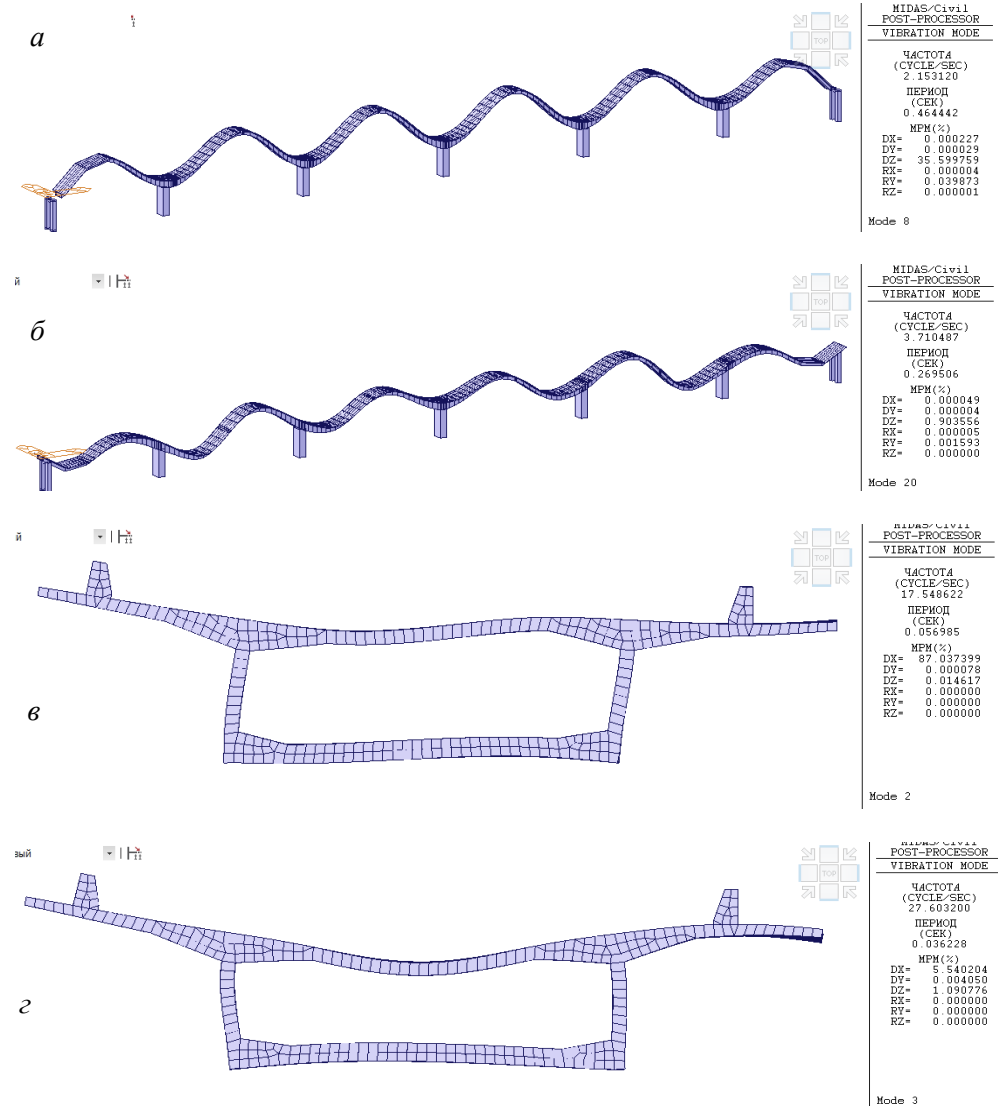


Рис. 3. Расчетные формы СК:

а – всего пролетного строения на частоте 2,15 Гц; б – то же на частоте 3,7 Гц; в – элементы поперечного сечения на частоте 17,5 Гц; з – то же на частоте 27,6 Гц



Рис. 4. Динамический блок системы мониторинга



Рис. 5. Общий вид сеймостанции «Института земной коры» СО РАН

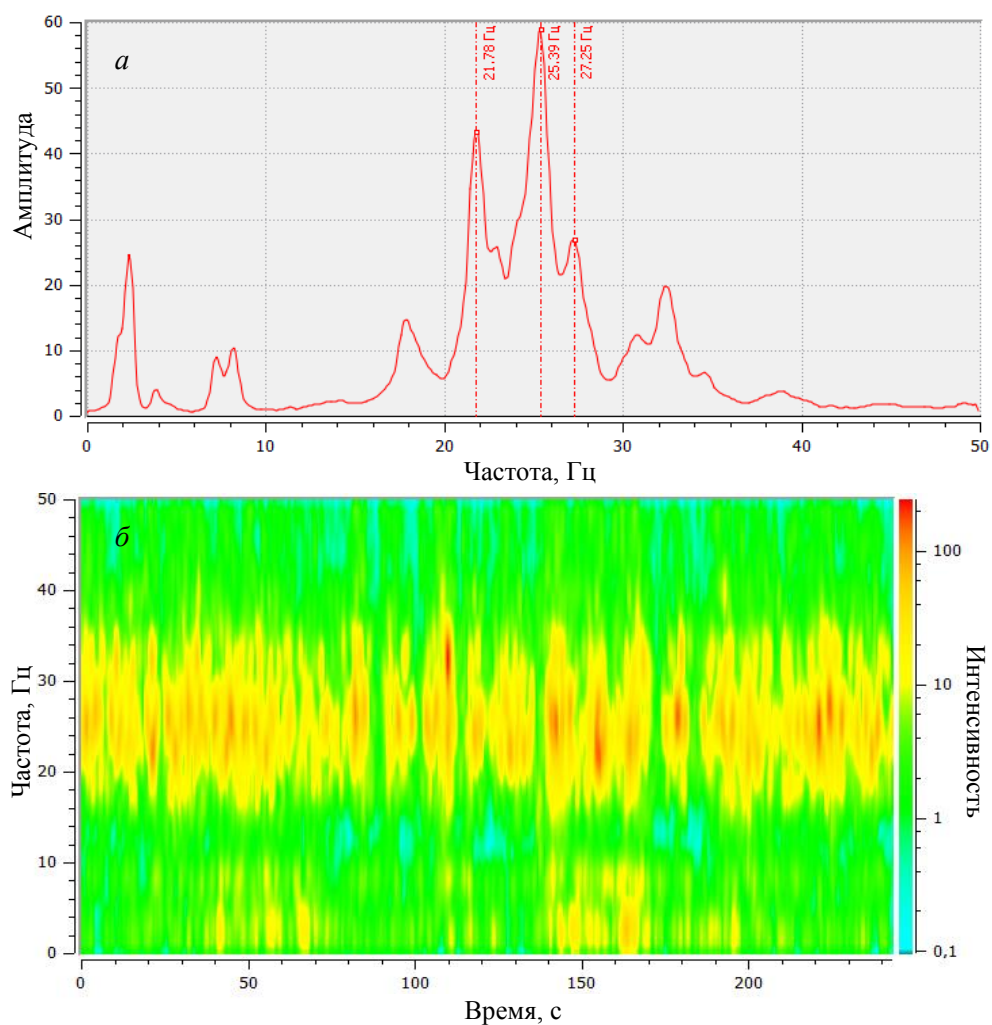


Рис. 6. Спектральный состав вертикальных колебаний середины пролета 10–11, данные июля 2013 г.:
а – спектральный состав; б – спектрально-временное разложение

Периодически появлялись колебания более низких частот (область от 0 до 10 Гц), например, участки времени 40–70, 110–125, 140–200 с на рис. 6, б. Согласно расчетным моделям, это соответствует той или иной низшей форме колебаний одного пролета или группы пролетов. Фактический уровень нагруженности на мосту не превышает 5–10 % от собственной массы пролетных строений, поэтому наличие или отсутствие транспортных средств на мосту не приводит к каким-либо существенным отклонениям в частотах собственных колебаний конструкций, что подтверждается полученными результатами (рис. 6, б).

Исходя из расчетов и наблюдений за тем, что при движении потока городского автотранспорта наиболее ярко выделяются независимые друг от друга деформации пролетов, результаты мониторинга частот удобнее представлять отдельно для каждого пролета 6-пролетной неразрезной системы. На рис. 7 приведены результаты измерений, выполненные в период с 2009 по 2016 гг., по фиксированным точкам пролетных строений. Каждое значение теоретических частот отмечено жирной горизонтальной линией и имеет зону $\pm 0,2$ Гц, учитывающую погрешности моделирования.

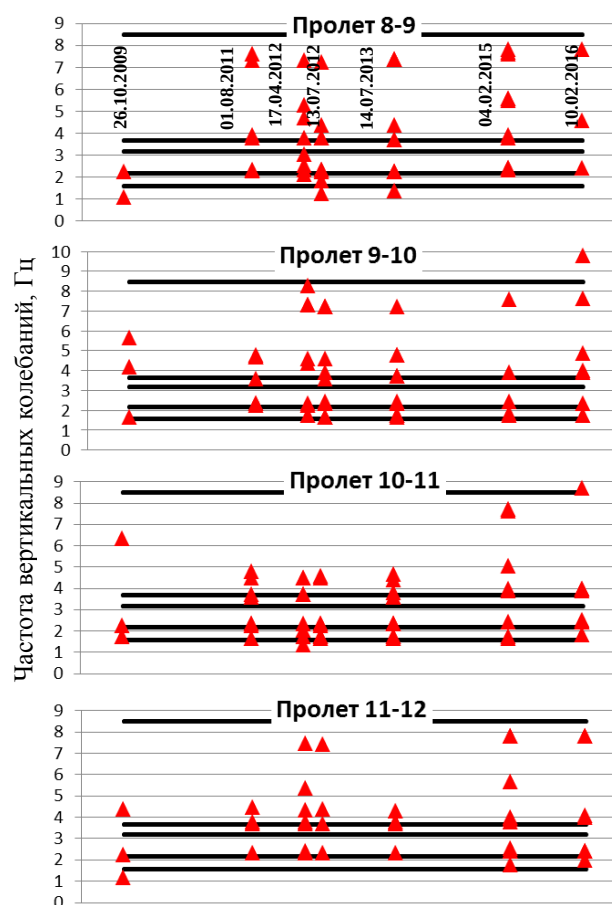


Рис. 7. Некоторые результаты мониторинга частот СК и теоретические значения частот (указаны горизонтальными жирными линиями)

Выполненное сравнение фиксируемых частот собственных колебаний в различные периоды показывает, что конструкция находится в стабильном состоянии, тенденций, свидетельствующих об ухудшении технического состояния, не выявлено, но отмечаются сезонные изменения, например, измерения 04.02.2015 г. показали увеличение частот СК зоны 2,2–2,3 Гц до 2,3–2,5 Гц, зоны 3,6–3,7 Гц до 3,9–4,0 Гц, а также зоны 7,2–7,4 Гц до 7,6–7,8 Гц по всем пролетам. Результаты измерений год спустя 10.02.2016 г. подтвердили увеличение частот собственных колебаний при отрицательных температурах. Вероятно, это связано с изменением жесткости конструкции. Изучение данной закономерности должно стать предметом последующих исследований.

Характерные для всех пролетов вертикальные колебания имеют частоту 2,2–2,3 Гц, что хорошо согласуется с расчетом, согласно которому вертикальные колебания пролетного строения происходят на частоте 2,15 Гц (см. рис. 3, а). Экспериментально выделено четыре основных частоты вертикальных СК: 1,65–1,75 Гц; 2,2–2,3 Гц; 3,7–3,8 Гц; 7,2–7,4 Гц. Форма СК на частоте 2,3 Гц (по расчету – на частоте 2,15 Гц, см. рис. 3, а) является доминирующей формой длительных колебаний пролетного строения. Высокочастотные колебания, лежащие в диапазоне частот 17–30 Гц, являются колебаниями элементов сечения пролетного строения, в основном, плиты проезжей части и нижнего пояса балок. Зона частот 10–17 Гц в достаточной степени «тихая», что позволяет отделить СК пролетов и элементов поперечного сечения.

Обоснованность и достоверность представленных данных основывается на хорошей сходимости результатов расчетов и измерений, выполняемых сертифицированным оборудованием. Динамический мониторинг, проводимый в периодическом режиме под возбуждающим действием движения потока городского автотранспорта, позволил сделать ряд выводов:

1. Длительности записи колебаний пролетного строения в одной точке в 250–300 с достаточно, чтобы оценить спектр частот колебаний конструкций пролетного строения при движении городского автотранспорта. При этом возмущающее действие автотранспорта близко по спектральному составу к «белому шуму», а конструкция при этом совершает свободные колебания.

2. При прохождении потока городского автотранспорта возбуждаются колебания как всего пролетного строения в целом, так и отдельных его пролетов и элементов поперечного сечения. Первая расчетная форма колебаний в связи с большой ее энергоемкостью не вызывается. В основном происходят синхронные колебания отдельных пролетов на частотах: 1,65–1,75 Гц; 2,2–2,3 Гц; 3,7–3,8 Гц; 7,2–7,4 Гц. Расчетом определены формы деформации конструкций, соответствующие данным частотам.

3. Значительный вклад в общее колебательное движение в точках установки вибродатчиков вносят колебания элементов поперечного сечения пролетного строения, в частности: плиты проезжей части и плиты нижнего пояса коробчатой балки. Диапазон частот этих колебаний лежит в области 17–30 Гц.

4. Измерения в периоды с отрицательными температурами окружающего воздуха показывают рост частот собственных колебаний.

5. Динамический мониторинг позволяет контролировать изменение жесткостных свойств и масс мостовых конструкций. Возбуждающие колебания кон-

струкций силы от прохождения потока городского автотранспорта имеют постоянный частотный спектр, близкий по составу к «белому шуму». При этом воздействия конструкции совершают свободные колебания с постоянным частотным составом. Этот частотный состав является предметом динамического мониторинга. Определен частотный состав колебаний руслового пролетного строения Академического моста в Иркутске, намечены зоны частотного диапазона, которые контролируются при проведении динамического мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Long span bridge health monitoring system in Japan* / S. Sumitro, Y. Matsui, T. Okamoto, K. Fujiib // *Proc. SPIE*. – 2001. – V. 4337. – P. 517–524.
2. *A theory of health monitoring for highway bridge* / A.E. Aktan, F.N. Catbas, K. Grimmelsman, M. Pervizpour, J. Curtis, K. Shen, X. Qin // *Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona*, 14–17 July, 2002.
3. *Larocca, A.P.C. Monitoring of dynamic behavior of suspension bridge on high-frequency GPS-data* / A.P.C. Larocca, R.E. Schaal, M.C. Santos // *GPS World*. April, 2005.
4. *Development and application of health monitoring system for bridge in Korea* / M. Koh, S.P. Chang, S.-K. Kim, S.-Y. Kim, W.J. Kim // *Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona*, 14–17 July, 2002.
5. Крутиков, О. Измерительные системы при непрерывном мониторинге мостов / О. Крутиков // *Институт Гипростроймост*. – 2008. – № 2. – С. 89–92.
6. Иттенберг, М.А. Разработка информационно-измерительной системы (ИИС) мониторинга пролетных строений моста А. Невского / М.А. Иттенберг, Н.М. Митропольский, М.Л. Хазанов // *Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов* : тр. ЦНИИС. – М., 2002. – С. 58–67.
7. Васильев, А.И. Мониторинг моста на стадиях строительства и эксплуатации / А.И. Васильев // *Дороги. Инновации в строительстве*. – 2011. – № 10. – С. 74–76.
8. Яшинов, А.Н. Мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций мостов в процессе сооружения / А.Н. Яшинов, П.Ю. Кузьменков // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. – Пермь : ПНИПУ, 2012. – Т. 3. – С. 330–335.
9. Яшинов, А.Н. Научно-инженерное сопровождение строительства Бутринского моста в г. Новосибирске / А.Н. Яшинов, С.Ю. Поляков // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. – Пермь : ПНИПУ, 2015. – С. 521–525.
10. *Система автоматизированного мониторинга геодинамической безопасности городских мостов* / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов, В.О. Мишутин, Т.М. Баранов // *Транспортное строительство*. – 2011. – № 7. – С. 11–13.
11. Баранов, Т.М. Оценка безопасности мостов при геодеформационных воздействиях / Т.М. Баранов // *Науковедение: интернет-журнал*. – 2013. – № 1. – Условия доступа : <http://naukovedenie.ru/PDF/60tvn113.pdf> (дата обращения: 14.03.2013 г.).
12. Пат. 2498255. Российская Федерация. МПК G01M7/00. Способ оценки прочности и жесткости автодорожных и железнодорожных мостов / В.В. Кашковский, В.В. Устинов, Т.М. Баранов. – Заявл. 12.12.2011 ; № 2011150598/28 ; опубл. 20.06.2013. – 14 с.

REFERECNES

1. Sumitro S., Matsui Y., Okamoto T., Fujiib K. Long span bridge health monitoring system in Japan. *Proc. SPIE*. 2001. V. 4337. Pp. 517–524.
2. Aktan A.E., Catbas F.N., Grimmelsman K., Pervizpour M., Curtis J., Shen K., Qin X. A theory of health monitoring for highway bridge. *Proc. 1st Int. Conf. 'Bridge Maintenance Safety and Management'*, Barcelona, 14–17 July, 2002.
3. Larocca A.P.C., Schaal R.E., Santos M.C. Monitoring of dynamic behavior of suspension bridge on high-frequency GPS-data. *GPS World*. April, 2005.

4. Koh M., Chang S.P., Kim S.-K., Kim S.-Y., Kim W.J. Development and application of health monitoring system for bridge in Korea. *Proc. 1st Int. Conf. 'Bridge Maintenance Safety and Management'*, Barcelona, 14–17 July, 2002.
5. Krutikov O. Izmeritel'nye sistemy pri nepreryvnom monitoringe mostov [Permanent bridge monitoring measuring systems]. *Institut Giprostroimost*. 2008. No 2. Pp. 89–92. (rus)
6. Ittenberg M.A., Mitropol'skii N.M., Khazanov M.L. Razrabotka informatsionno-izmeritel'noi sistemy (IIS) monitoringa proletrykh stroenii mosta A. Nevskogo [Development of information-measuring system for monitoring superstructures of Nevskii bridge]. *Proc. TsNIIS*. Moscow, 2002. Pp. 58–67. (rus)
7. Vasil'ev A.I. Monitoring mosta na stadiyakh stroitel'stva i ekspluatatsii [Bridge monitoring at building and operation stages]. *Dorogi. Innovatsii v stroitel'stve*. 2011. No. 10. Pp. 74–76. (rus)
8. Yashnov A.N., Kuz'menkov P.Yu. Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktssii mostov v protsesse sooruzheniya [Stress-strain state monitoring of bridge construction]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. Perm': PNIPU Publ., 2012. V. 3. Pp. 330–335. (rus)
9. Yashnov A.N., Polyakov S.Yu. Nauchno-inzhenernoe soprovozhdenie stroitel'stva Bugrinskogo mosta v g. Novosibirsk [Science and engineering support of Burginsky bridge in Novosibirsk]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. Perm': PNIPU Publ., 2015. Pp. 521–525. (rus)
10. Bykova N.M., Zainagabdinov D.A., Mishutin V.O., Baranov T.M. Sistema avtomatizirovannogo monitoringa geodinamicheskoi bezopasnosti gorodskikh mostov [Automated monitoring system of geodynamic safety of city bridges]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction]. 2011. No. 7. Pp. 11–13. (rus)
11. Baranov T.M. Otsenka bezopasnosti mostov pri geodeformatsionnykh vozdeistviyakh [Bridge safety assessment at deformations]. *Naukovedenie*. 2013. No. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/60tvn113.pdf>/ Last visited March 2013 (rus)
12. Kashkovskii V.V., Ustinov V.V., Baranov T.M. Sposob otsenki prochnosti i zhestkosti avtodorozhnykh i zheleznodorozhnykh mostov [Stiffness and strength evaluation technique of road and railway bridges]. *Pat. Rus. Fed.* N 2498255, 2013. 14 p. (rus)