

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ВАНТОВОГО АВТОДОРОЖНОГО МОСТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Имеющиеся преимущества вантовых конструкций определяют технико-экономическую целесообразность их применения в мостах больших пролетов, где легкость несущих конструкций приобретает особо важное значение. Отрицательной особенностью вантовых мостов является их пониженная жесткость по сравнению с мостами других систем, что обусловлено высокими напряжениями, допускаемыми в вантах от временной нагрузки, пониженным модулем упругости некоторых типов вант, значительной их длиной в мостах больших пролетов, а также провисанием.

Современный уровень развития знаний в области аэродинамики не позволяет чисто теоретическими средствами выявить все особенности динамического поведения висячих мостов сложной формы, в т.ч. находящихся в ветровом потоке. Между тем зарегистрированы случаи их разрушения в результате воздействия резонансных колебаний, возникающих от сильного ветра, при пропуске потока людей, идущих в ногу, других динамических воздействий. Поэтому при проектировании висячих мостов большое внимание уделяют динамическим и аэродинамическим экспериментам и исследованиям. Модели целых мостов или их фрагменты тщательно испытывают в аэродинамических трубах.

Для поддержания эксплуатационной надежности конструкций вантовых мостов осуществляются периодические испытания, измерения силовых и геометрических параметров несущих элементов, в первую очередь, усилий в элементах вантовой системы. Крупные мостовые сооружения оснащаются автоматизированной системой инструментального мониторинга параметров работы сооружения. В настоящее время создание диагностических методов оценки технического состояния мостов, в т.ч. с вантовой системой, является актуальной задачей.

ОАО ЦНИИС разработаны «Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов», предназначенные для периодической инструментальной диагностики эксплуатируемых и приемочных испытаний вновь построенных автодорожных, в т.ч. вантовых, мостов. Вибродиагностика базируется на анализе параметров расчетного и экспериментального откликов (реакции) сооружения на дина-



З.А. Шульман
технический директор
корпорации «Промстальконструкция»,
к.т.н., г. Днепропетровск

мическое воздействие в низкочастотном диапазоне собственных форм колебаний.

Методология и основные подходы к разработке программы экспериментальных исследований поведения моста при реальных динамических воздействиях изложены на примере вантового автодорожного моста через р. Даугаву в г. Риге (первое название «Горьковский»), приведены основные результаты этих исследований. Целью проведения натурных экспериментальных работ было определение динамических характеристик моста и усилий в канатах вантовой системы, что потребовало разработки специальной измерительной системы, в т.ч. методов и приборов для измерений усилий в вантах руслового пролетного строения моста и частот их колебаний в реальном ветровом потоке, а также выбор способов спектрального анализа измеренных параметров колебаний сооружения.

При сдаче сооружения в эксплуатацию действительные динамические характеристики были получены в недостаточно полном объеме и проанализированы с недостаточной степенью корректности. В частности, из записей вертикальных колебаний пролетного строения не идентифицированы формы колебаний пролетного строения и пилона в вертикальной продольной плоскости моста, хотя эти динамические характеристики служат надежной основой диагностики состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации. Кроме того, как в период сдачи моста в эксплуатацию, так и в предшествующий ему не измерялись усилия в вантах, величина которых влияет на параметры колебаний вантового пролетного строения и по изменениям которых можно судить о происшедших за тот период эксплуатации релаксационных процессах в них.

Мост введен в эксплуатацию в 1981 г. На момент открытия это был самый длинный вантовый мост в Европе (рис. 1).

По мосту осуществляется двустороннее троллейбусное и автомобильное, а также пешеходное движение. Мостовой переход состоит из вантового однопилонного моста с главным пролетом 312 м, левобережного пролета 89,9 м и правобережной эстакады (87,5 + 64,6) м. Вантовое пролетное строение моста имеет общую длину 554 м, схему 89,9 + 312 + 87,5 + 64,6 и перекрывает 4 пролета между опорами № 1 и № 5. Вантовая схема асимметричная – однопилонная с одной центральной плоскостью расположения вант.

Между пролетами 89,90 м и 312,00 м расположен А-образный железобетонный пилон высотой 108 м. Фундаментом ему служит высокий ростверк на 52 буровых железобетонных столбах диаметром по 1,7 м, заглубленных в толщу доломитов. В сторону берега от верха пилона уходят 25 вант, закрепленных в устье-противовесе, в сторону русла – 24 ванты, собранные в четыре луча по 5, 5, 8 и 6 вант считая от пилона. На пилоне ванты прерываются. Канаты заделаны в стальные анкеры, один из которых упирается в тело пилона, а другой – в конструкцию балки пролетного строения.

Стальная балка жесткости вантового пролетного строения представляет собой неразрезную четырехпролетную систему, защемленную на левобережном устье и опирающуюся в остальных четырех точках на продольно-подвижные опорные части (рис. 2).

В поперечном сечении балка жесткости – замкнутая четырехстенчатая коробка с тротуарными консолями в уровне верхнего пояса.



Рис. 1. Автодорожный вантовый мост через р. Даугава в г. Риге. Автор проекта Г.Б. Фукс (ПАО «Киевсоюздорпроект»)

Вантовое пролетное строение предназначено для пропуска 4-х полос автомобильной нагрузки. Для пешеходной зоны предназначены двухсторонние тротуары шириной по 3 м, отделенные от проезда барьерными ограждениями. Полная ширина моста составляет 28,14 м.

Программа экспериментальных исследований, составленная с учетом предложений автора проекта, включала:

- определение динамических характеристик сооружения и отдельных его элементов;

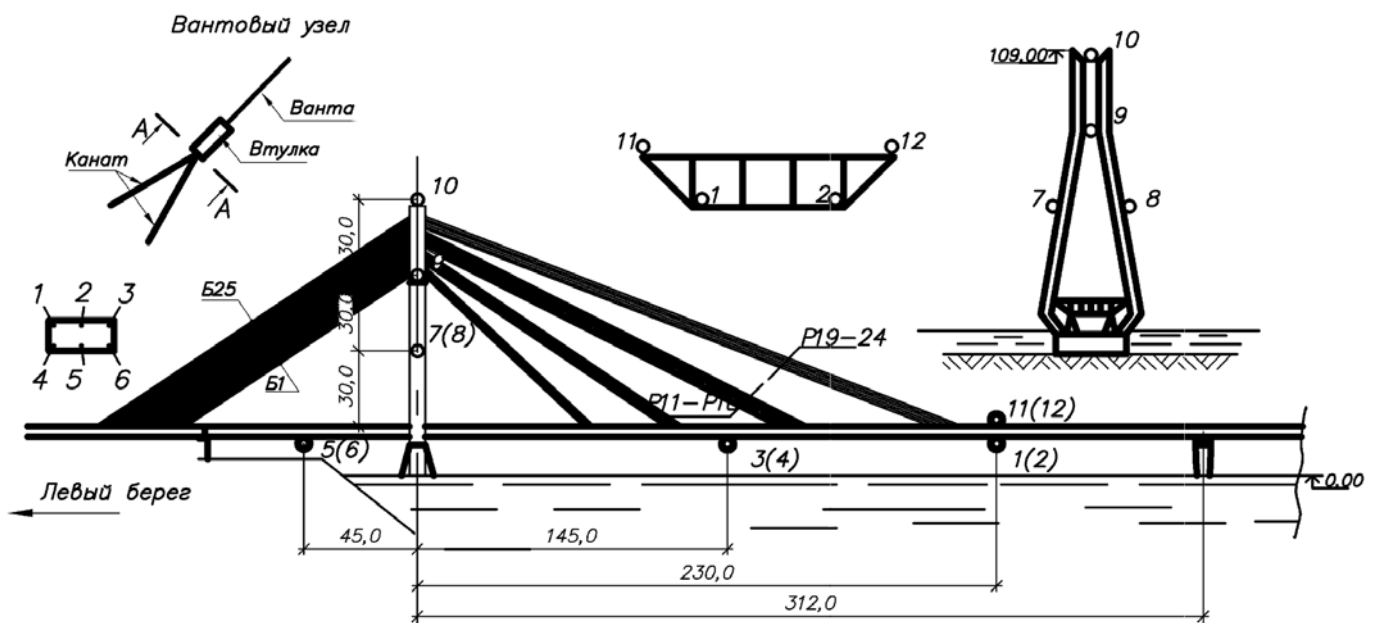


Рис. 2. Схема моста и расстановки измерительных приборов

- изучение реакции сооружения на три вида динамических воздействий: подвижной проектной нагрузки, ветра и пешеходов;
- уточнение действительных значений усилий в выборочной группе вант и анализ изменений этих значений за семь лет эксплуатации моста.

Испытаниям предшествовал предварительный осмотр металлических конструкций пролетного строения и пилона. Для проведения экспериментальных работ была разработана измерительная система, обеспечивающая получение экспериментальных данных о параметрах внешних воздействий и реакции на них сооружения.

Параметры колебаний руслового пролетного строения и пилона из-за воздействия ветра, движущегося автотранспорта и потока пешеходов измерялись специально разработанной виброизмерительной системой, включающей: вибродатчики сейсмического типа С5С, шунтовую коробку, блок формирования характеристик вибродатчика БФХ и магнитоэлектрический осциллограф, укомплектованный интегрирующими гальванометрами.

Контроль скорости и направления ветрового потока осуществлялся: на пролетном строении – анеморумбометром типа М47, на оголовке пилона – сигнальным анемометром типа М95.

Усилия в пучках канатов определялись геодезическим методом измерений, основанным на измерении стрелы провисания канатов с помощью 2-секундного теодолита. В соответствии с этой методикой усилия в пучке канатов (ванте) определялись по следующей аналитической зависимости (рис. 3):

$$N = H / \cos \beta; \quad H = ql^2 / (8f),$$

где N – усилие в пучке канатов; H – горизонтальный распор; q – погонная масса пучка канатов; l – проекция длины каната на горизонтальную ось; f – провис пучка канатов; α – измеряется после построения касательной; β_0 – угол наклона пучка канатов; S – расстояние от центра теодолита до нижней точки каната; φ – угол между касательной в точке измерения усилия и линией, соединяющей концы отрезка каната; $\beta = \beta_0 - \varphi$ в нижней точке; $\beta = \beta_0 + \varphi$ – в верхней.

Усилия в отдельных канатах вантовой системы моста измерялись накладным динамометром системы ЛИИЖТа.

Колебания вант в ветровом потоке регистрировались вибродатчиком типа ОСП и счетчиком импульсов, синхронизированным с электросекундомером.

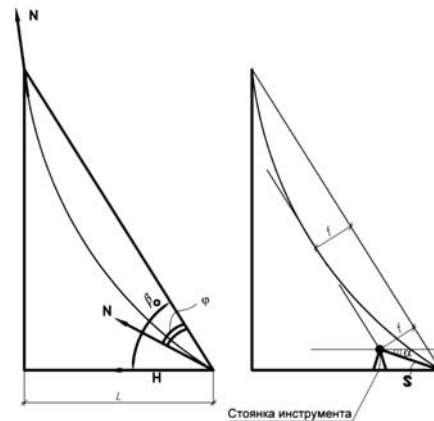


Рис. 3. Схема определения усилия в пучке канатов

Исследование метрологических характеристик средств измерений дало основание считать, что полученные составляющие суммарных погрешностей измерений обеспечивали достоверность определения динамических характеристик конструкций и усилий в вантовой системе, определяющих действительные параметры динамической работы пролетного строения моста. Их величины составляли: погрешности определения частот колебаний – 0,1 %, амплитуд колебаний – 10 %, абсолютная погрешность спектрального анализа – 0,04... 0,05 Гц, погрешность измерений усилий в вантах – 7 %.

Программа испытаний формировалась таким образом, чтобы выявить раздельное влияние каждого из перечисленных факторов временного воздействия на динамическое поведение моста. Содержание этой программы в части видов воздействий, числа и времени регистрации (реализации записей колебаний) нашло отражение в таблице 1.

Таблица 1

Общие сведения об организации динамических испытаниях моста

| Серия опытов | Кол-во опытов (реализаций) в серии | № датчиков (рис. 2) | Вид воздействия | Характеристика колебательных процессов | Время реализации (мин) |
|--------------|------------------------------------|---------------------|----------------------|--|------------------------|
| 1 | 7 | 1...5; 10 | Авто-движение | Колебания в плоскости моста | 5 |
| 2 | 2 | 1, 2, 5, 6, 11, 12 | То же | То же | 7 |
| 3 | 2 | 1...5; 9 | Ветер, авто-движение | То же | 12 |
| 4 | 4 | 1, 4...9, 10 | То же | То же | 6 |
| 5 | 2 | 1, 4...9, 10 | Ветер | То же | 5 |
| 6 | 5 | 1, 4...9, 10 | Толпа | То же | 5 |
| 7 | 2 | 1, 4...9, 10 | Ветер | Колебания из плоскости моста | 8 |
| 8 | 2 | 1, 3, 5, 7, 9, 10 | Ветер | То же | 3 |

Колебания элементов конструкций возбуждались реальными потоками подвижной автомобильной нагрузки в часы пик, естественным ветровым потоком и реальными потоками движущихся пешеходов во время праздничной демонстрации.

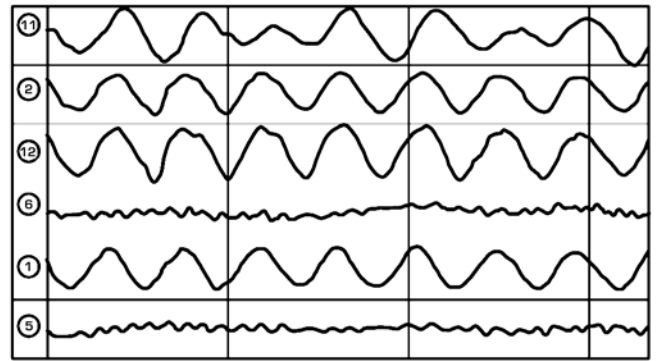
Как показали результаты выполненных экспериментов, временная нагрузка, вызванная неупорядоченным движением транспорта, практически не отражается на значениях собственных частот колебаний моста. Отметим также, что при указанной плотности потока пешеходов частоты собственных колебаний сооружения практически не изменяются. Кроме того, их движение вызывает колебания пролетного строения только по одной или нескольким низким собственным формам.

Результаты обработки записей колебаний вантового пролетного строения и пилона позволили получить следующие основные спектральные характеристики реализованных динамических процессов, характеризующих поведение моста при реальных, зафиксированных в процессе выполнения экспериментальных работ, нагрузках и воздействиях: математическое ожидание; дисперсию; среднее квадратичное отклонение; частоты и соответствующие им максимальные амплитуды колебаний.

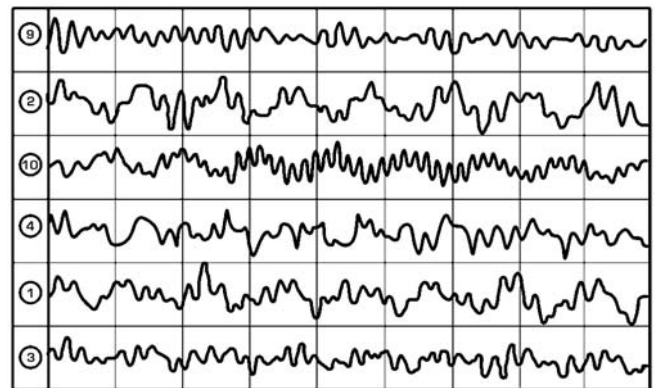
Наиболее характерные осциллограммы и спектральные характеристики колебательных процессов приведены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Детальный анализ всех спектрограмм в части определения спектра частот и соответствующих им амплитуд колебаний в порядке доминирования энергии колебательных процессов приведен в таблице 2. С помощью анализа осциллограмм представляется возможным, с учетом амплитудно-частотной характеристики разработанной виброизмерительной аппаратуры, идентифицировать низшие формы колебаний при различных воздействиях. Это, в свою очередь, позволило сравнить расчетные значения динамических параметров, полученных в ряде проектных и научно-исследовательских организаций, с экспериментальными данными (табл. 3.).

Заслуживает внимания факт соответствия низшей формы преимущественным колебаниям пилона в плоскости моста. Этим обстоятельством объясняется отсутствие собственных колебаний данной формы в расчетах института «Днепрпроектстальконструкция», где в качестве расчетной схемы применялась многопролет-



а



б

Рис. 4. Фрагмент записи колебаний пролетного строения: а, б – в плоскости моста при движении автотранспорта и потока пешеходов соответственно

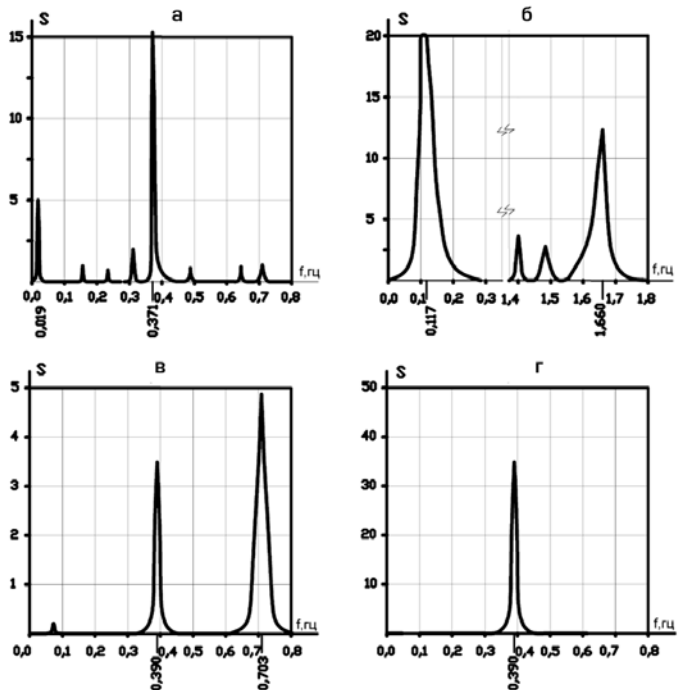


Рис. 5. Частотный спектр колебаний, измеренных: а – в точке 1; б – в точке 5; в – в точке 9; г – в точке 10

ная балка на упруго-податливых опорах и влияние пилона не учитывалось.

Таблица 2

Выборочные значения частот и амплитуд колебаний

| Серия опытов | Вид воздействия | Характеристика колебательных процессов | № датчиков | Результаты измерений | | | | | |
|---------------------------|---|--|------------|----------------------|--------|------------|-------|-------------|-------|
| | | | | Основной тон | | Второй тон | | Высшие тона | |
| | | | | f, Гц | A, мм | f, Гц | A, мм | f, Гц | A, мм |
| №1 Всего реализаций 9 | Автодвижение | Колебания в плоскости моста | 1 | 0,39 | 0,278 | – | – | – | – |
| | | | 2 | 0,39 | 0,27 | – | – | – | – |
| | | | 5 | 0,156 | 0,07 | 1,484 | – | 1,679 | – |
| | | | 6 | 0,156 | 0,09 | 1,484 | – | – | – |
| | | | 11 | 0,39 | 0,227 | 0,664 | – | – | – |
| | | | 12 | 0,39 | 0,315 | 0,703 | – | – | – |
| №2 Всего реализаций 16 | Автодвижение + ветер | Колебания в плоскости моста | 1 | 0,40 | 0,228 | – | – | – | – |
| | | | 2 | 0,40 | 0,249 | – | – | – | – |
| | | | 3 | 0,40 | 0,114 | 0,693 | – | – | – |
| | | | 4 | 0,40 | 0,128 | 0,693 | – | 0,712 | – |
| | | | 5 | 0,175 | 0,067 | – | – | – | – |
| | | | 9 | 0,40 | 0,016 | 0,732 | – | 0,693 | – |
| №3 Всего реализаций 7 | Ветер 10...12 м/с | Колебания в плоскости моста | 1 | 0,39 | 0,048 | – | – | – | – |
| | | | 2 | 0,39 | 0,052 | – | – | – | – |
| | | | 3 | 0,371 | 0,025 | 1,562 | 0,028 | 2,4 | – |
| | | | 4 | 0,39 | 0,012 | 1,66 | 0,023 | 1,99 | – |
| | | | 9 | 1,66 | 0,0057 | 0,39 | – | 1,914 | – |
| | | | 10 | 0,39 | 0,008 | 2,636 | – | – | – |
| №4 Всего реализаций 19 | Толпа. Частота шага – 1,7... 1,9 Гц, плотность потока 70... 140 кг/м ² | Колебания в плоскости моста | 1 | 0,39 | 0,038 | 0,644 | 0,034 | 0,8 | 0,027 |
| | | | 2 | 0,39 | 0,041 | 0,0664 | 0,039 | 0,8 | 0,029 |
| | | | 3 | 0,781 | 0,04 | 1,64 | 0,042 | 0,664 | 0,04 |
| | | | 4 | 0,664 | 0,047 | 1,64 | 0,044 | 0,8 | 0,039 |
| | | | 9 | 1,66 | 0,01 | 1,972 | | 0,683 | |
| | | | 10 | 0,39 | 0,007 | 1,445 | | | |
| №5 Всего Реализаций 6 | Ветер 8–13 м/с | Колебания из плоскости моста | 1 | 0,664 | 0,0034 | 0,8 | | 0,39 | |
| | | | 3 | 0,664 | | 0,39 | | 0,8 | |
| | | | 5 | 1,503 | | 0,664 | | 0,8 | |
| | | | 7 | 1,406 | 0,0023 | 1,503 | | 0,664 | |
| | | | 9 | 1,503 | | 1,406 | | 0,664 | |
| | | | 10 | 1,484 | 0,013 | 0,39 | | 1,367 | |

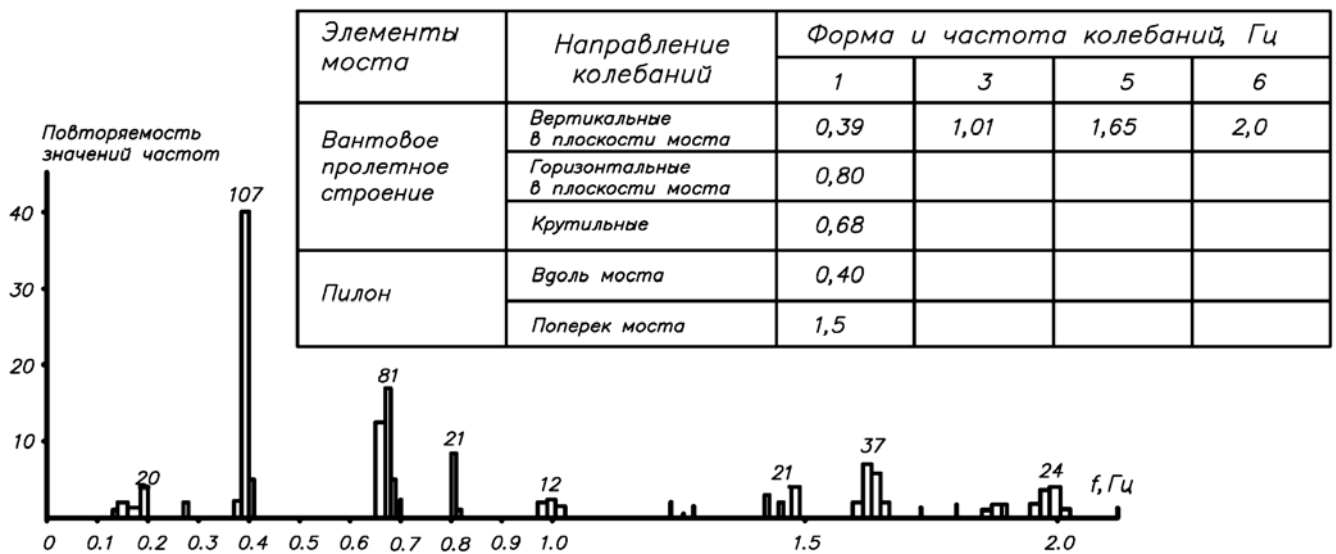


Рис. 6. Динамический паспорт (спектр колебаний) вантового моста через р. Даугава

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных значений динамических параметров

| Вид колебаний | Форма колебаний | Расчетные значения | | | | Экспериментальные значения | |
|----------------|-----------------|--------------------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|
| | | ДнепрПСК | | ЦНИИС | | | |
| | | T, с | f, Гц | T, с | f, Гц | T, с | f, Гц |
| Вертикальные | 1 | — | — | 2,23 | 0,448 | 2,56 | 0,39 |
| | 2 | 0,615 | 0,619 | 1,74 | 0,575 | — | — |
| | 3 | 0,946 | 1,057 | 0,96 | 1,042 | 0,99 | 1,01 |
| | 4 | 0,834 | 1,198 | 0,77 | 1,299 | — | — |
| | 5 | 0,654 | 1,529 | 0,61 | 1,639 | 0,61 | 1,65 |
| | 6 | 0,566 | 1,768 | 0,52 | 1,923 | 0,50 | 2,0 |
| | 7 | 0,472 | 2,118 | 0,44 | 2,273 | 0,45 | 2,23 |
| | 8 | — | — | 0,36 | 2,778 | 0,38 | 2,63 |
| | 9 | — | — | 0,32 | 3,125 | — | — |
| Горизонтальные | 1 | 1,641 | 0,61 | 0,96 | 1,042 | 1,25 | 0,8 |
| | 2 | 0,41 | 2,44 | 0,34 | 2,941 | — | — |
| | 3 | 0,182 | 5,491 | 0,18 | 5,556 | — | — |
| | 4 | 0,102 | 9,756 | 0,12 | 8,333 | — | — |
| Крутильные | 1 | 0,752 | 1,331 | — | — | 1,47 | 0,68 |
| | 2 | 0,376 | 2,661 | — | — | — | — |
| | 3 | 0,251 | 3,992 | — | — | — | — |
| | 4 | 0,188 | 5,332 | — | — | — | — |

В ходе анализа результатов испытаний получен спектр частот колебаний моста (рис. 6), который можно рассматривать как динамический паспорт сооружения. Численные значения экспериментально полученного спектра частот колебаний моста в этом случае принимаются в качестве исходных данных при интегральном анализе состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации, т.е. мониторинге технического состояния моста.

Анализ осциллограмм в части наличия сдвига фазы колебаний в точках 1, 3 и 11 пролетного строения по отношению к колебаниям в точках 2, 4, 12 и 7, 9, 10 позволяет с известной степенью достоверности предположить наличие в исследуемом сооружении локального источника поглощения энергии в виде нарушения контакта асфальтобетонного слоя со стальным ортотропным настилом верхней стороны пролетного строения (см. рис. 4).

Диссипативные свойства пролетного строения оцениваются по известной методике при анализе участков осциллограмм, соответствующих затухающим процессам колебаний после прохождения по пролетному строению автотранспорта или пешеходов.

Вычисленные значения логарифмического декремента колебаний находятся в интервале $\delta = 0,025...0,04$. Меньшие значения относятся к крутильным колебаниям и колебаниям из плоскости моста, а большие – к колебаниям в плос-

кости моста, что можно объяснить, в основном, колебаниями железобетонного пилона.

Выполненные экспериментальные исследования (динамические испытания) и их детальный анализ позволили сформулировать следующие основные выводы.

1. Колебания элементов конструкций моста, вызванные эксплуатационными динамическими воздействиями, можно отнести к умеренным, не вызывающим опасений с точки зрения усталостной прочности. Исключение составляют наблюдаемые вибрации вант двух средних лучей при действии подвижной нагрузки, влияющие на усталостный ресурс как проволок, так и оплетки.

2. При имевшей место плотности потока пешеходов частоты собственных колебаний сооружения практически не изменяются от частоты шага людей на мосту. Кроме того, такое движение вызывает колебания пролетного строения только по одной или нескольким низшим собственным формам.

3. Спектральные характеристики колебаний пролетного строения, полученные в результате эксперимента, можно рассматривать как динамический паспорт сооружения и принимать его за основу динамической интегральной оценки (диагностики) и анализа состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации.

Надійшла 04.11.2015 р.