

УДК 624.21.042.8

ЛИ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ, магистрант,

lilremb0@gmail.com

КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,

профессор,

kaf_most@mail.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

К ВОПРОСУ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ СО СКВОЗНОЙ СТЕНКОЙ*

В результате динамических испытаний сталежелезобетонной балки со сквозной стенкой были выявлены особенности её работы и напряженно-деформированного состояния в процессе изменения динамических характеристик. Впервые в процессе испытания моделей балок в натуральную величину, имеющих сквозную стенку и работающих совместно с железобетонной плитой на металлическом поддоне, были получены динамические характеристики, такие как коэффициент затухания ε , декремент колебания δ , частота f и амплитуда собственных и вынужденных колебаний A , отражающих все стадии работы сталежелезобетонной конструкции пролетного строения моста. Установлены закономерности изменения частотных характеристик балки со сквозной стенкой, работающей без плиты проезжей части, а также с железобетонной плитой проезжей части на металлическом поддоне.

Ключевые слова: балка со сквозной стенкой; пролетное строение моста; динамическое нагружение; виброкомплекс; прочность стали; спектральный анализ.

DMITRIY V. LEE, Undergraduate Student,

lilremb0@gmail.com

VLADIMIR M. KARTOPOL'TSEV, DSc, Professor,

kaf_most@mail.ru

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

TOWARDS THE DYNAMIC BEHAVIOR OF TRUSS BRIDGE SPANS

The paper presents a study of dynamic load testing composite reinforced concrete braced girder. The results demonstrate its performance and the stress and strain state during the dynamic property change. For the first time, such dynamic properties as attenuation and damping coefficients, eigen frequency and amplitude have been obtained for full-size braced girders that describe all stages of the behavior of the composite reinforced concrete braced girder of the bridge span. The laws of frequency properties change have been established for the braced girder operating without a roadway slab as well as with the reinforced concrete roadway slab on a metal pallet.

* Материал статьи подготовлен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-98006.

Keywords: braced girder; bridge span; dynamic load; vibration machine; steel strength; spectral analysis.

В настоящее время на территории Российской Федерации налажено производство сталей с различным пределом прочности, высокой пластичностью, хладо- и коррозиестойчивостью [1]. В связи с тем, что сталь высокой прочности все еще остаётся очень дорогим материалом для изготовления мостовых конструкций, целесообразно использовать её только для наиболее напряженных элементов, например для нижних поясов балок (рис. 1). Несмотря на увеличение стоимости конструкции, применение стали высокой прочности является выгодным решением, при этом мы уменьшаем вес и габариты такой конструкции [2].

При проектировании и эксплуатации автодорожных мостов помимо действия статической нагрузки необходимо учитывать и динамическую нагрузку. Основными параметрами динамической работы пролетных строений являются частота и форма собственных и вынужденных колебаний, коэффициент затухания колебаний. В большей степени воздействие динамической нагрузки приходится на пролетные строения мостов, чем на опоры.

В настоящее время при статическом расчете вводится динамический коэффициент, определяющий характер воздействия временной нагрузки. Изменение интенсивности нагрузок, скоростей, применение новых материалов и конструкций также позволяют изменить динамическую работу пролетных строений. Профессором Z. Shoukry был рассмотрен вопрос о распределении нормальных напряжений в сквозной стенке балки [3].



Рис. 1. Балка со сквозной стенкой

Теоретическое значение периода собственных колебаний невесомого элемента при нагрузке Q имеет следующее выражение:

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{y_{ст}}{g}}, \quad (1)$$

где $y_{ст}$ – прогиб элемента при статическом действии нагрузки весом Q ; g – ускорение силы тяжести.

Если обозначить через q величину нагрузки, которая вызывает единичное перемещение элемента, то

$$y_{ст} = \frac{Q}{q} = 1 \text{ и } T = 2\pi \sqrt{\frac{Q}{g \cdot q}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{q}}, \quad (2)$$

где m – масса приложенной нагрузки.

Величина q зависит от вида деформации и статической схемы конструкции.

Известно, что характерным свойством колебания пролетных строений мостов является затухание колебаний, т. е. $a_{k-1} > a_k > a_{k+1}$. Причиной затухания является рассеяние энергии колебательного движения на внутреннее трение или преодоление сопротивления в соединениях элементов конструкции.

При затухании из-за внутреннего трения зависимость между двумя соседними амплитудами будет

$$a_k = a_{k+1} \cdot e^{-\varepsilon \cdot T_c}. \quad (3)$$

При этом процесс затухания описывается параболической функцией (рис. 2).

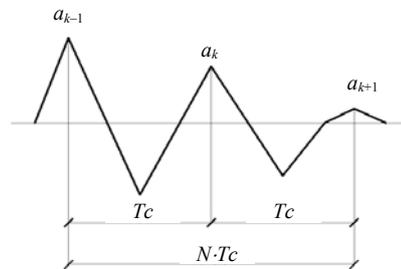


Рис. 2. Затухание колебательного процесса

Общее уравнение затухания колебания имеет вид

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\varepsilon \cdot T_c} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (4)$$

где A_0 и φ_0 – const, которые определяются начальными условиями.

Определение динамических параметров колебательного процесса целесообразно проводить в ходе испытаний на реальных моделях пролетных строений с применением соответствующего аппаратно-программного комплекса [2].

В качестве аппаратно-программного комплекса можно использовать вибродиагностический комплекс «Диамос», состоящий из трех блоков [4].

Блок № 1 – четырехканальная система низкочастотных пьезодатчиков, обеспечивающих регистрацию процесса колебания моделей конструкции в заданных точках. Пьезодатчики крепятся к испытуемой конструкции с целью получения виброграмм.

Блок № 2 – блок микроэлектроники, обеспечивающий усиление и передачу регистрируемых сигналов с датчиков через аналого-цифровой преобразователь в компьютер.

Блок № 3 – блок обработки, представляющий собой персональный компьютер и программное обеспечение BON-QB. С помощью программы производится настройка оборудования комплекса, запись, архивация и обработка результатов измерений во время вибрационных исследований моделей пролетных строений.

Динамические испытания конструкции преследуют цель в определении частот и периода собственных колебаний. Для возбуждения колебательного процесса пролетное строение подвергают динамической нагрузке. В качестве нагрузки может быть удар груза в виде бетонных блоков весом от 300 кг до 2 т, который сбрасывается с высоты 0,5–2 м на проезжую часть. В месте падения груза устраивают песчаную подушку толщиной 10–20 см во избежание повреждения плиты проезда и предотвращения подскока груза. Груз поднимают при помощи крана или другими имеющимися средствами. Сбрасывание груза повторяется несколько раз с целью получения необходимого количества виброграмм для определения динамических характеристик пролетного строения. Обработка виброграмм, основанная на разработанном программном обеспечении, позволяет проводить исследования для определения основных динамических характеристик (амплитуды, частоты, коэффициента затухания и декремента колебаний). Во второй половине XX в. зарубежные исследователи O.W. Blodgett [5], F. Faltus [6], J.E. Bower [7] обобщили и сформулировали методику расчета сквозных балок с использованием расчетной модели в виде фермы Виренделя. Для определения коэффициента затуханий, декремента колебаний и частоты собственных колебаний справедливы следующие зависимости:

$$\text{коэффициент затухания } \varepsilon = \frac{1}{t_k - t_n} \ln \frac{A_a}{A_K}; \quad (5)$$

$$\text{декремент затухания } \delta = \frac{\varepsilon}{f_C}; \quad (6)$$

$$\text{частота собственных колебаний } f_C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q}{m + m_{\text{прив}}}}, \quad (7)$$

где m – масса приложенной нагрузки; $m_{\text{прив}} = 0,5 \cdot m_K$; $m_K = \frac{Q_K}{g}$ – масса кон-

струкции; Q_K – вес конструкции; $q = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L_p^3}$ – параметр q определяется ста-

тической схемой конструкции и видом деформации.

После проведения испытаний полученные виброграммы последовательно обрабатываются на четырех программах: BONICA-QB, FILTR SPECTR и Microcal ORIGIN. При помощи программы FILTR были отсеяны посторонние шумы, которые искажали истинный вид виброграммы. Посторонние шумы включали в себя колебания от оборудования, людей, находящихся возле стэнда с испытываемой балкой, а также от электрического тока в проводах (рис. 3).

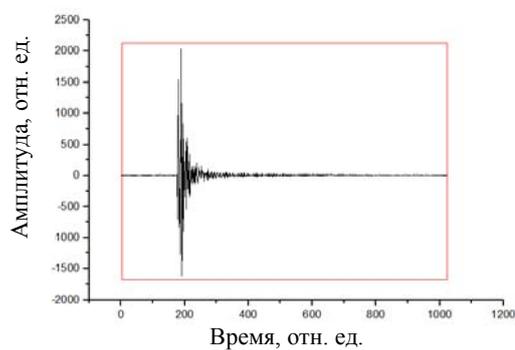


Рис. 3. Виброграмма конструкции с посторонними шумами

Виброграммы, очищенные от посторонних шумов с помощью программы FILTR (рис. 4), обрабатываются в программе СПЕКТР, где идет преобразование в спектрограмму, удобную для анализа главной моды колебаний. В ходе нескольких последовательных действий получили спектрограмму (рис. 5).

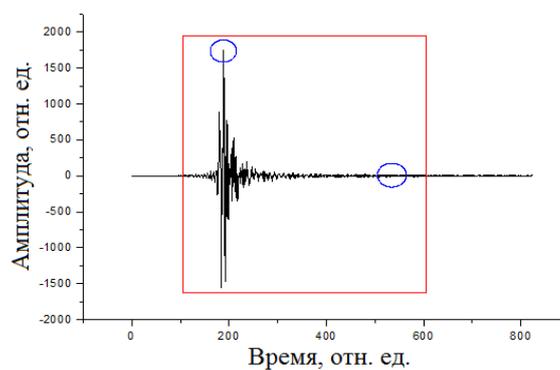


Рис. 4. Виброграмма после фильтрации от посторонних шумов

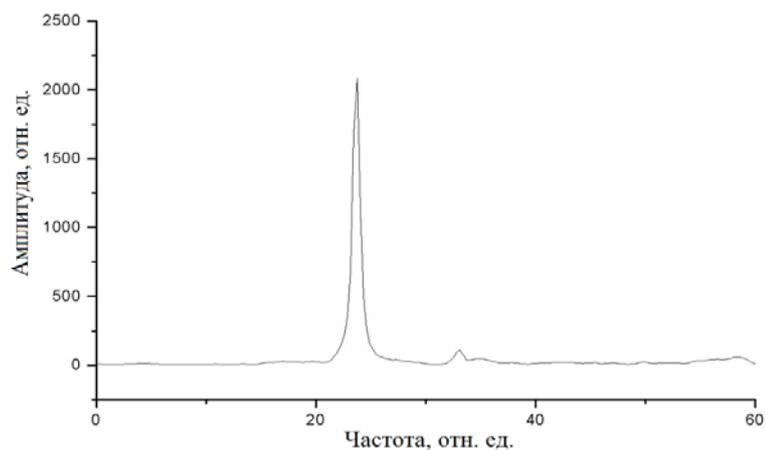


Рис. 5. Спектрограмма частот основных колебаний

Полученные при работе на программах FILTER и СПЕКТР выходные файлы имеют неудобный для работы нередактируемый формат с расширением «dat.». Чтобы устранить этот недостаток, а также для удобного анализа полученных виброграмм, используется программа Origin, работающая на базе Windows. Полученные виброграммы (рис. 6) необходимо проанализировать в такой последовательности:

1. Измеряется частота φ главного или нескольких основных тонов колебаний (значение X 23,7), а также их амплитуды A (значение Y 2083,6) (рис. 6).

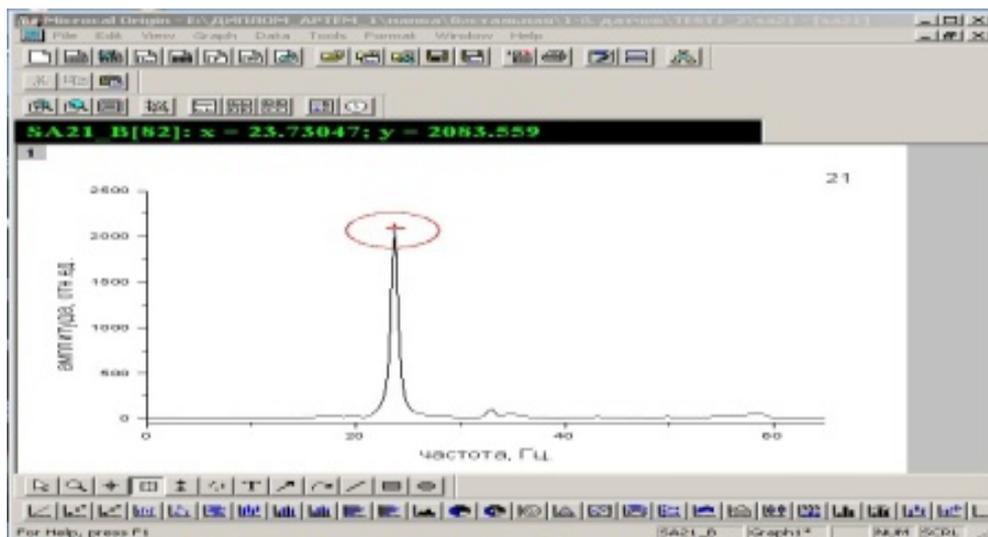


Рис. 6. Спектрограмма частот колебаний

2. Снимаются значения максимальной и минимальной амплитуд (значение по Y) виброграммы, а также время (значение по X) (рис. 7), соответствующее этим амплитудам.

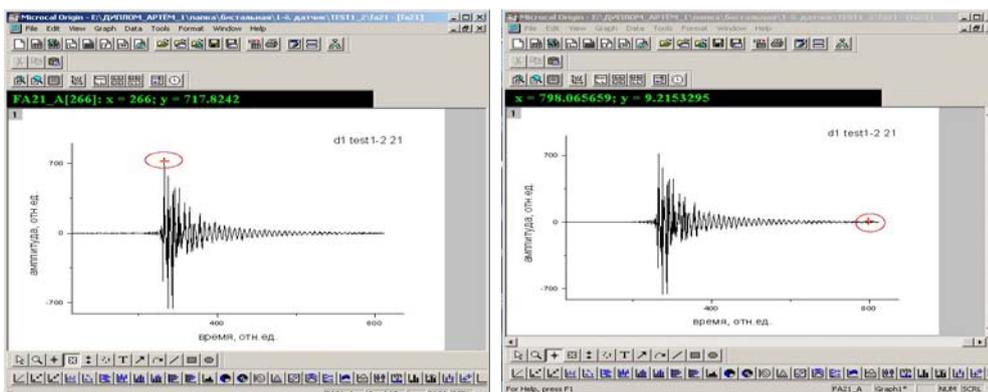


Рис. 7. Виброграмма колебательного процесса

Далее рассчитывается коэффициент затухания:

$$\varepsilon = \frac{1}{t_K - t_H} \ln \frac{A_a}{A_K} = \frac{1}{798,1 - 266} \ln \frac{717,8}{9,2} = 0,00819. \quad (8)$$

Декремент колебания равен

$$\delta = \frac{\varepsilon}{f_C} = \frac{0,00819}{23,7} = 0,000346. \quad (9)$$

По полученным данным динамических характеристик пролетных строений выявлены следующие закономерности:

1. Увеличение массы конструкции привело к снижению собственной частоты колебаний. Добавление железобетонной плиты проезжей части увеличивает не только несущую способность пролетного строения, но и благоприятно отражается на динамических характеристиках конструкции. Таким образом, железобетонная плита играет роль демпфирующего элемента в конструкции пролета.

2. В связи с изменением геометрических параметров пролетного строения (уменьшения момента инерции, потери местной и общей устойчивости) снизилась частота вынужденных колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Картопольцев, В.М.* Металлические мосты с бистальными балками / В.М. Картопольцев. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1992. – 248 с.
2. *Картопольцев, В.М.* Бистальные и бисталежелезобетонные балки пролетных строений / В.М. Картопольцев ; под ред. К.Х. Толмачева. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1986. – 224 с.
3. *Shoukry, Z.* Elastic Flexural Stress Distribution Webs of Castellated Steel Beams / Z. Shoukry // *Welding Journal*. – 1965. – V. 44. – № 5.
4. *Способ* вибрационных испытаний пролетных строений мостовых конструкций: пат на изобретение № RU 2140626 C1 МПК⁶ G01M7/02 / Н.Н. Бочкарев, А.В. Картопольцев ; опубл. 27.10.1999.
5. *Blodgett, O.W.* Design of Welded Structures / O.W. Blodgett. 1996.
6. *Faltus, F.* Contribution au calcul des poutres a ams evidees / F. Faltus // *Acier – Stahl – Steel*, 1966. – № 5. – P. 229–232.
7. *Bower, J.E.* Design of Beams with web openings / J.E. Bower // *Journal of the Structural Division*. ASCE, 1968.
8. *Картопольцев, В.М.* Численное моделирование и экспериментальные исследования динамических характеристик сталежелезобетонного пролетного строения со сквозными балками / В.М. Картопольцев, Н.Н. Бочкарев, А.С. Шендель // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2012. – № 1. – С. 169–175.

REFERENCES

1. *Kartopol'tsev V.M.* Metallicheskie mosty s bistol'nymi balkami [Metal bridges with besteel beams]. Tomsk : TSU Publ., 1992. 248 p. (rus)

2. *Kartopol'tsev V.M.* Bistal'nye i bistalezhelezobetonnye balki proletnykh stroenii [Besteel and besteel composite reinforced concrete beams of bridge spans]. Tomsk : TSU Publ., 1986. 224 p. (rus)
3. *Shoukry Z.* Elastik Flexural Stress Distribution Webs of Castellated Stell Beams. *Welding Journal*. 1965. V. 44. No. 5. (rus)
4. *Bochkarev N.N., Kartopol'tsev A.V.* Sposob vibratsionnykh ispytaniy proletnykh stroenii mostovykh konstruksii [Vibration tests of bridge spans]. Pat. Rus. Fed. N 2140626 C1 IPC G01M7/02. Publ. 27.10.1999.
5. *Blodgett O.W.* Design of welded structures, 1996.
6. *Faltus F.* Contribution an calcul des pourtes a ames evidees. *Acier – Stahl – Steel*, 1966. No. 5. Pp. 229–232.
7. *Bower J.E.* Design of Beams with web openings. *Journal of the Structural Division*. ASCE, 1968.
8. *Kartopol'tsev V.M., Bochkarev N.N., Shendel' A.S.* Chislennoe modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskikh kharakteristik stalezhelezobetonno proletnogo stroeniya so skvoznymi balkami [Numerical modeling and experimental research of dynamic properties of braced girder spans]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2012. No. 1. Pp. 169–175. (rus)