ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21.014.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-154-166

С.В. ЕФИМОВ, К.О. ЖУНЕВ,

Сибирский государственный университет путей сообщения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

На сети железных дорог России продолжается активное внедрение инновационных тяжеловесных вагонов с нагрузкой на ось 25–27 тс и организация движения грузовых поездов повышенной массы и длины. Новые условия эксплуатации сооружений неизбежно приводят к необходимости оценки несущей способности, долговечности, скорости накопления усталостных повреждений и надежности этих конструкций. Кроме того, для железнодорожных мостов важными контролируемыми параметрами являются динамические характеристики (частоты и формы собственных колебаний, скорость их затухания, динамическая жесткость).

В статье рассмотрены особенности динамического взаимодействия неоднородных по структуре и разных по общему весу и длине поездов с мостовым сооружением методом численного моделирования в программном комплексе Midas Civil. Верификация расчетной модели осуществлена по динамическим параметрам пролетных строений (частотам собственных колебаний), которые были определены при обследовании моста с использованием системы Тензор-МС.

В результате расчетов был проведен модальный анализ конечно-элементной модели железнодорожного моста, позволивший установить низшие формы собственных колебаний. На основании численного моделирования взаимодействия подвижного состава с несущими конструкциями установлены неблагоприятные скорости движения поездов, приводящие к нарастанию амплитуды колебаний пролетных строений и опор, а также к увеличению динамического коэффициента несущих конструкций с учетом конструктивных особенностей сооружения и состава подвижной нагрузки.

Ключевые слова: метод конечных элементов; численное моделирование; подвижная нагрузка; динамическое воздействие; экспериментальные исследования; железнодорожный мост; сталежелезобетонное пролетное строение; сварное пролетное строение.

Для цитирования: Ефимов С.В., Жунев К.О. Моделирование динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожных мостов // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020.
Т. 22. № 6. С. 154–166.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-154-166

S.V. EFIMOV, K.O. ZHUNEV,
Siberian State Transport University

FINITE ELEMENT MODEL OF DYNAMIC TRAIN-BRIDGE INTERACTION

Innovative heavy wagons with a 25–27 tf axle load and the freight train movement organization having a higher weight and length are being put into operation in Russia. New operating conditions of railway bridges require an assessment of bearing capacity, durability, accumulation rate of fatigue damage and reliability. The important parameters are the dynamic properties of railway bridges (frequencies and modes of natural vibrations, decay rate, dynamic stiffness).

The aim of this work is to determine the dynamic interaction of trains having different structure, weight and length with a railway bridge using numerical modeling in the midas Civil bridge software. The proposed model is verified by the dynamic parameters of spans (natural vibration frequencies), which are determined during the bridge inspection using a Tensor-MS system.

The modal analysis is given to the finite element model. The lowest natural modes of the bridge are determined. Based on numerical simulation of the interaction between the train and the bridge unfavorable speed of trains is calculated leading to an increase in the oscillation amplitude of the bridge span as well as in the bridge dynamic coefficient with regard to the design features of the train structure and composition.

Keywords: finite element model; numerical simulation; moving load; dynamic load; experimental research; railway bridge; steel-reinforced concrete span; weld-fabricated span.

For citation: Efimov S.V., Zhunev K.O. Modelirovanie dinamicheskogo vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i zheleznodorozhnykh mostov [Finite element model of dynamic train-bridge interaction]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 154–166.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-154-166

Введение

В последние годы на сети железных дорог России происходит постепенное увеличение скоростей движения, осевых нагрузок и массы поездов в связи с реализацией стратегии развития железнодорожного транспорта [1]. Подобное изменение режима эксплуатации искусственных сооружений приводит к необходимости оценки несущей способности, долговечности, скорости накопления усталостных повреждений и надежности этих конструкций [2, 3]. Совершенствованию методов определения и контроля этих параметров на всех этапах жизненного цикла сооружения уделяют большое внимание как в России [3–5], так и за рубежом [6–8]. Результатом таких исследований становится, как правило, корректировка рекомендаций и норм по содержанию сооружений с учетом изменившихся условий эксплуатации.

Кроме того, в условиях увеличения скоростей движения и массы железнодорожных нагрузок для конструкций большой протяженности, малого соб-

ственного веса и низкой изгибной жесткости важными контролируемыми параметрами являются динамические характеристики (частоты и формы собственных колебаний, скорость их затухания, динамическая жесткость), которые отражают особенности работы системы «сооружение – подвижная нагрузка». В связи с этим растет интерес к научным исследованиям в области взаимодействия железнодорожного подвижного состава с металлическими мостами [9–13]. Главной задачей таких исследований является выявление неблагоприятных режимов движения и параметров состава, приводящих к резонансным явлениям. Наиболее эффективным инструментом для анализа динамического взаимодействия подвижной нагрузки и искусственного сооружения в настоящее время является численное моделирование [14].

Настоящая работа направлена на определение неблагоприятных режимов движения и параметров железнодорожного состава, приводящих к нарастанию амплитуды колебаний пролетных строений и опор, при помощи численного моделирования взаимодействия подвижной нагрузки и несущих конструкций моста в программном комплексе Midas Civil [15].

Методы

В качестве объекта исследования выбран мост, эксплуатируемый на Забайкальской железной дороге, через р. Ангарака на 13 км обхода Северомуйского тоннеля (рис. 1). В плане мост расположен в кривой малого радиуса (менее 300 м). Несущие конструкции моста представлены пятью сталежелезобетонными пролетными строениями расчетной длиной 33,6 м и комбинированными двухъярусными опорами со стоечной верхней частью и массивной нижней. Трехмерная модель сооружения была построена с учетом его фактического планово-высотного расположения и помимо пролетных строений и опор включала элементы верхнего строения пути (рис. 2). Пролетные строения и опоры сооружения аппроксимировали балочными элементами. В качестве материала главных балок пролетных строений была использована сталь 15ХСНД, в качестве материала плиты балластного корыта и промежуточных опор – бетон В30. Береговые опоры в модели были заменены шарнирно неподвижными (опора № 0) и шарнирно подвижными (опора № 5) связями. Опирающие пролетных строений на промежуточные опоры смоделировано при помощи двухузловых связей.

Для исследования особенностей взаимодействия сооружения с различными подвижными составами расчетная модель была загружена двумя неоднородными поездами, состоящими из 71 вагона общим весом 4300 т и 102 вагонов общим весом 7100 т (рис. 3). Воздействие подвижной нагрузки было смоделировано при помощи массива единичных сил, меняющих свои координаты во времени. Единичные силы прикладывали к балочным элементам, имитирующим рельсы верхнего строения пути. Скорость прохождения поездов по модели сооружения варьировалась и составляла 20, 40 и 60 км/ч. При динамическом расчете в модели были учтены демпфирующие особенности реальной конструкции, полученные по результатам вибродиагностики.

Верификацию расчетной модели производили по частотным характеристикам собственных колебаний элементов, как основным динамическим парамет-

Рис. 1. Общий вид сооружения

Рис. 2. Общий вид модели

Рис. 3. Схема поезда общим весом 7100 т

Рис. 4. Измерительная система Тензор-МС для вибродиагностики

Для количественной оценки динамических параметров были определены фактические и расчетные значения динамического коэффициента¹. Расчетное значение динамического коэффициента для сталежелезобетонного пролетного строения определяли по формуле

$$1 + \mu = 1 + \frac{18}{30 + \lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина загрузки пролетного строения, м.

Результаты

Пример получаемых виброграмм для сталежелезобетонных пролетных строений моста приведен на рис. 5, а результат выделения спектра частот отражен на рис. 6. На графиках зеленым цветом показаны вертикальные колебания, красным – горизонтальные поперечные, синим – горизонтальные продольные. Всплески амплитуд на виброграммах соответствуют моментам приложения возбуждающих воздействий.

Определяющими, судя по амплитуде, являются вертикальные колебания пролетных строений. Зафиксированные амплитуды горизонтальных (поперечных и продольных) колебаний пролетных строений существенно ниже вертикальных. Логарифмический декремент затухания колебаний сталежелезобетонных пролетных строений на основной собственной частоте, определенный по результатам вибродиагностики, составляет 0,18. Сводные данные по измеренным частотам собственных колебаний пролетных строений представлены в таблице.

¹ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. Москва: Минрегион, 2011. 347 с.

Рис. 5. Виброграмма колебаний пролетного строения № 2

Рис. 6. Спектр частот колебаний пролетного строения № 2

Динамические параметры пролетных строений

Номер пролетного строения	Частота собственных колебаний, Гц			
	вертикальная		горизонтальная (поперечная)	горизонтальная (продольная)
	фактическая	расчетная		
1	4,9	4,9	4,3	4,7
2	4,8		4,6	4,9
3	4,7		4,4	3,8
4	4,7		5,3	4,0
5	4,7		5,8	3,8

Из данных таблицы следует, что расчетная частота собственных колебаний пролетных строений (4,9 Гц) достаточно хорошо согласуется с измеренными частотами. Следовательно, можно утверждать о соответствии работы расчетной модели реальной конструкции, а также о возможности исследования динамической работы сооружения на основе разработанной модели.

В результате динамического расчета конечно-элементной модели, учитывающей демпфирующие свойства, логарифмический декремент вертикальных колебаний пролетных строений составил 0,17, что совпадает со значениями, полученными по результатам вибродиагностики (0,18). Модальный анализ модели моста позволил установить, что первой (низшей) формой колебаний являются поперечные колебания с частотой около 2,5 Гц. При этом наибольшие поперечные перемещения наблюдаются у опоры № 3 (рис. 7). Продольные колебания сооружения с наибольшей амплитудой происходят с частотой около 4,0 Гц.

Рис. 7. Деформированный вид модели:

а – при поперечных колебаниях; б – при продольных колебаниях

В результате моделирования воздействия подвижных нагрузок на сооружение были определены вертикальные перемещения пролетных строений, продольные и поперечные перемещения верхних ярусов промежуточных опор. На рис. 8, 10, 12 приведены графики прогибов пролетного строения № 2, продольных и поперечных перемещений опоры № 3 при проходе поезда общим весом 7100 т с разными скоростями.

Рис. 8. Прогибы пролетного строения при проходе поезда с разными скоростями

На рис. 9, 11, 13 приведены спектры частот вертикальных колебаний пролетного строения № 2, продольных и поперечных колебаний опоры № 3.

Рис. 9. Спектр частот вертикальных колебаний пролетного строения при проходе поезда с разными скоростями

Рис. 10. Продольные перемещения опоры при проходе поезда с разными скоростями

Рис. 11. Спектр частот продольных колебаний опоры при проходе поезда с разными скоростями

Рис. 12. Поперечные перемещения опоры при проходе поезда с разными скоростями

Рис. 13. Спектр частот поперечных колебаний опоры при проходе поезда с разными скоростями

Закключение

Анализ результатов загрузки модели неоднородными по структуре и разными по общему весу и длине поездами не выявил существенных изменений в спектре частот вынужденных колебаний. Увеличение динамических коэффициентов элементов конструкции при увеличении общего веса поезда с 4300 до 7100 т также не было зафиксировано. Однако было установлено, что на величину амплитуд колебаний пролетного строения и опор оказывает влияние скорость движения временной нагрузки.

Амплитуда вертикальных колебаний пролетных строений максимальна при скорости движения 40 км/ч. При этом значение динамического коэффициента увеличивается на 20 % относительно расчетного и составляет 1,59. Выделение спектра частот показало, что при движении поезда со скоростью 40 км/ч частоты вертикальных колебаний пролетных строений составляют 5,4 Гц. При увеличении скорости движения до 60 км/ч или уменьшении до 20 км/ч амплитуда колебаний уменьшается, динамический коэффициент становится равным 1,19. Очевидно, что при скоростях 30–40 км/ч частота приложения внешних нагрузок от проходящего поезда приближается к частоте собственных вертикальных колебаний пролетного строения (4,9 Гц), усиливая динамическое воздействие движущейся нагрузки.

Амплитуды колебаний опор максимальны при движении временной нагрузки со скоростями 20 и 40 км/ч. При этом динамический коэффициент составляет 1,48, а амплитуда поперечных перемещений верха опоры достигает 0,5 мм. Выделение спектра частот показало, что при движении поезда с этими скоростями частоты колебаний конструкции находятся в диапазоне 2,6–5,4 Гц. Увеличение скорости до 60 км/ч приводит к снижению динамического коэффициента до 1,28. Очевидно, что в диапазоне скоростей 20–40 км/ч частота приложения внешних нагрузок от проходящего поезда совпадает с частотами соб-

ственных продольных и поперечных колебаний опор (2,5 и 4,0 Гц соответственно), усиливая динамическое воздействие движущейся нагрузки.

Таким образом, модальный анализ конечно-элементной модели железнодорожного моста, с высокой достоверностью отражающей динамические характеристики реального сооружения, позволил установить низшие формы собственных колебаний. На основании численного моделирования взаимодействия подвижного состава с несущими конструкциями была установлена возможность совпадения частот вынуждающей силы с частотами собственных колебаний сооружения при определённых скоростях движения нагрузки. Расчет показал, что в диапазоне скоростей 20–40 км/ч происходит нарастание амплитуды перемещений пролетных строений и опор. Увеличение скорости движения подвижной нагрузки до 60 км/ч существенно снижает ее динамическое воздействие на элементы конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голикова Ю.А. Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта в России // Вестник СИБИТа. 2015. № 3. С. 32–37.
2. Гапанович В.А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 9–15.
3. Бокарев С.А., Мурованный Ю.Н., Прибытков С.С., Усольцев А.Н. Условия обеспечения движения тяжеловесных поездов по искусственным сооружениям // Железнодорожный транспорт. 2017. № 7. С. 64–67.
4. Бокарев С.А., Прибытков С.С., Ефимов С.В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 3. С. 169–183.
5. Глушков С.П., Соловьев Л.Ю., Соловьев А.Л. Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2. С. 63–71.
6. Кирян В.И., Мальгин М.Г. Пути обеспечения нормативного ресурса пролетных строений мостов // Вестник Днепровского национального университета железнодорожного транспорта. 2011. № 39. С. 55–60.
7. Viswanath K., Kumar R. Fatigue analysis of railway steel bridge // International journal of engineering and technology. 2018. V. 7. P. 1098–1101.
8. Kossakowski P.G. Fatigue strength of an over one hundred year old railway bridge // The Baltic journal of road and bridge engineering. 2013. V. 8. P. 166–173.
9. Дьяченко Л.К., Смирнов В.Н. Динамическое взаимодействие высокоскоростного подвижного состава и пролетных строений мостов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 11. С. 16–21.
10. Жунев К.О. Динамическое воздействие подвижной нагрузки на сварные пролетные строения // Наука и практика в решении стратегических и тактических задач устойчивого развития России : материалы конференции. 2019. С. 9–12.
11. Sun Y.Q., Cole C., Spiriyagin M., Dhanasekar M. Vertical dynamic interaction of trains and rail steel bridges // Electronic journal of structural engineering. 2013. V. 13. P. 88–97.
12. Zhai W., Han Z., Chen Z., Ling L., Zhu S. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review // International journal of vehicle mechanics and mobility. 2019. V. 57, P. 984–1027.
13. Smirnov V.N., Shestakova E.B., Chizhov S.V., Antonyuk A.A., Lediaev L.A., Indeykin I.A., Ev-tukov E.S. Dynamic interaction of high-speed trains with span structures and flexible support // Magazine of Civil Engineering. 2017. V. 76. P. 115–129.
14. Круговова Е.А. Оценка влияния колебаний моста на динамику поезда в программном комплексе «Универсальный механизм» // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 6. С. 16–23.

15. *Midas Civil. Getting Started*. MIDAS IT, 2015. 240 p.
16. Бондарь Н.Г., Козьмин Ю.Г., Ройтбурд З.Г., Тарасенко В.П., Яковлев Г.Н. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1984. 272 с.
17. Бокарев С.А., Яшинов А.Н., Снежков И.И., Слюсарь А.В. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 9. С. 25–26.
18. Князев Б.А., Черкасский В.С. Дискретное преобразование Фурье – как это делается // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. № 4. С. 74–86.

REFERENCES

1. Golikova Yu.A. Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossii [Problems and prospects of railway transport in Russia]. *Vestnik SIBITa*. 2015. V. 3. Pp. 32–37. (rus)
2. Gapanovich V.A. Voprosy vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhe-lovesnom dvizhenii [Train-bridge interaction in heavy traffic]. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2016. V. 10. Pp. 9–15. (rus)
3. Bokarev S.A., Murovannyi Yu.N., Pribytkov S.S., Usoltsev A.N. Usloviya obespecheniya dvizheniya tyazhelovesnykh poezdov po iskusstvennym sooruzheniyam [Conditions for heavy train operation on engineering structures]. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2017. V. 7. Pp. 64–67. (rus)
4. Bokarev S.A., Pribytkov S.S., Efimov S.V. Ostatochnyi resurs zhelezobetonnykh proletnykh stroenii zheleznodorozhnykh mostov [Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 2. No. 3. Pp. 169–183. (rus)
5. Glushkov S.P., Solov'ev L.Yu., Solov'ev A.L. Eksperimental'naya otsenka dolgovechnosti svarnykh metallicheskiykh proletnykh stroenii mostov metodom infrakrasnoi termografii [Infrared thermography of weld-fabricated bridge durability]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2018. V. 2. Pp. 63–71. (rus)
6. Kiryan V.I., Mal'gin M.G. Puti obespecheniya normativnogo resursa proletnykh stroenii mostov [Ways to ensure the bridge span life]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta*. 2011. V. 39. Pp. 55–60. (rus)
7. Viswanath K., Kumar R. Fatigue analysis of railway steel bridge. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. V. 7. Pp. 1098–1101.
8. Kossakowski P.G. Fatigue strength of an over one hundred year old railway bridge. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2013. V. 8. Pp. 166–173.
9. D'yachenko L.K., Smirnov V.N. Dinamicheskoe vzaimodeistvie vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava i proletnykh stroenii mostov [Dynamic interaction of train and railway bridge spans]. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2018. V. 11. Pp. 16–21. (rus)
10. Zhunev K.O. Dinamicheskoe vozdeistvie podvizhnoi nagruzki na svarnye proletnye stroeniya [Dynamic effect of moving load on welded spans]. *Materialy konferentsii "Nauka i praktika v reshenii strategicheskikh i takticheskikh zadach ustoychivogo razvitiya Rossii" (Proc. Sci. Conf. 'Science and Practices of Sustainable Development in Russia')*. Saint-Petersburg, 2019. Pp. 9–12. (rus)
11. Sun Y.Q., Cole C. Spiryagin M., Dhanasekar M. Vertical dynamic interaction of trains and rail steel bridges. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2013. V. 13. Pp. 88–97.
12. Zhai W., Han Z., Chen Z., Ling L., Zhu S. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2019. V. 57. Pp. 984–1027.
13. Smirnov V.N., Shestakova E.B., Chizhov S.V., Antonyuk A.A., Lediaev L.A., Indeykin I.A., Ev-tukov E.S. Dynamic interaction of high-speed trains with span structures and flexible support, *Magazine of Civil Engineering*. 2017. V. 76. Pp. 115–129.
14. Krugovova E.A. Otsenka vliyaniya kolebaniy mosta na dinamiku poezda v programmnom komplekse 'Universal'nyi mekhanizm' [Bridge fluctuations and train dynamics calculated in Universal Mechanism software]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2012. V. 6. Pp. 16–23. (rus)
15. *Midas Civil. Getting Started*. MIDAS IT, 2015. 240 p.
16. Bondar' N.G., Koz'min Yu.G., Roitburd Z.G., Tarasenko V.P., Yakovlev G.N. Vzaimodeistvie zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom [Bridge-train interaction]. Moscow: Transport, 1984. 272 p. (rus)

17. Bokarev S.A., Yashnov A.N., Snezhkov I.I., Slyusar' A.V. Malogabaritnye avtomatizirovannye sistemy dlya diagnostiki ISSO [Small automated systems for engineering structure diagnostics]. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2007. V. 9. Pp. 25–26. (rus)
18. Knyazev B.A., Cherkasskii V.S. Diskretnoe preobrazovanie Fur'e – kak eto delaetsya [Fast Fourier transform – calculation and interpretation]. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika*. 2008. V. 4. Pp. 74–86. (rus)

Сведения об авторах

Ефимов Стефан Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, esvmt@mail.ru

Жунев Кирилл Олегович, аспирант, Сибирский университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, junev.kirill@yandex.ru

Authors Details

Stefan V. Efimov, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, esvmt@mail.ru

Kirill O. Zhunev, Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, junev.kirill@yandex.ru