



# Безопасность при высоких скоростях на мосту



Владимир ПОЛЯКОВ

Vladimir Yu. POLYAKOV

**В статье рассматривается проблема устойчивого движения колес подвижного состава ВСМ в зоне мостового перехода при скоростях до 350 км/ч. Обосновывается применение математической модели, учитывающей в качестве элементов системы подвижной состав, верхнее строение пути, пролетные строения и примыкающий путь на земляном полотне. Показано, что на высокоскоростной железнодорожной магистрали особо необходим комплексный подход к конструкциям как мостовых пролетных строений, так и верхнего строения пути для обеспечения безопасности движения и сохранения динамических свойств инженерных сооружений и используемой техники.**

*Ключевые слова:* железная дорога, поезд ВСМ, мост, пролетные строения, земляное полотно, безопасность движения, математическая модель, инженерный расчет.

*Поляков Владимир Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

Усилие взаимодействия колеса и рельса является важным показателем безопасности движения. При недостаточном вертикальном усилии прижатия колеса к рельсу возможно вкатывание гребня колеса на головку рельса под действием боковых сил, что чревато сходом колеса с рельса. При высоких скоростях движения это приведет к крушению с тяжелыми последствиями, особенно в зоне моста.

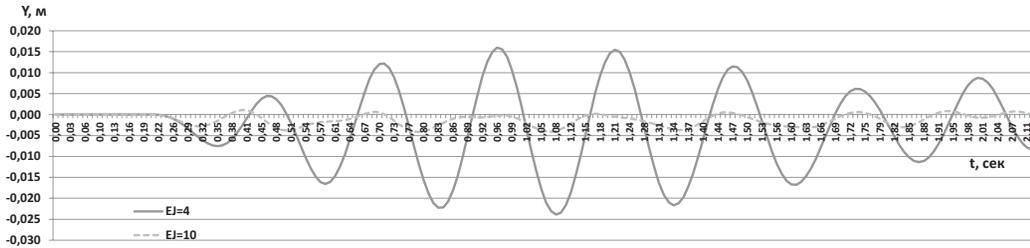
В исследованиях, посвященных мостовым колебаниям пролетных строений, применяется сравнительно простая модель, в которой представлены экипажи и балки пролетных конструкций. Такая модель применяется до сих пор [6] и ее использование при исследовании колебаний пролетных строений можно считать оправданным. Однако отсутствие в модели рельса делает невозможным изучение устойчивости движения колеса и оценку транспортной безопасности. Поэтому в МИИТ была разработана подробная математическая модель, включающая балочные пролетные строения, верхнее строение пути, экипажи с двухступенчатым подвешиванием (система МПЭ) [1,2,3].

Оценка безопасности движения по въезду гребня колеса на рельс предлагается в [1] на основе [4]. Согласно последней

Таблица 1

**Экстремальные значения усилий между колесом и рельсом при проходе через  
однопролетный мост, кН**

Вагон №	1	2	3	4	5	6
Пролетное строение EJ=4						
Rmin	34,5	20,6	15,9	18,4	17,3	31,5
Rmax	116,2	133,0	139,1	161,7	184,4	161,3
Пролетное строение EJ=10						
Rmin	44,3	32,2	17,5	15,5	21,8	27,7
Rmax	115,9	147,7	142,7	148,2	157,2	196,8



**Рис. 1.** Колебания середины пролетного строения 18 м при разной жесткости и скорости 97 м/с.

работе соотношение усилий вертикального и горизонтального взаимодействия колеса и рельса с точки зрения устойчивости должно рассматриваться с учетом времени неблагоприятного сочетания этих усилий, а также других факторов. Установлено [4], что для локомотивов при отношении поперечной силы к вертикальной менее 1,48 безопасность движения обеспечивается независимо от длительности действия неблагоприятного сочетания; показатель более 9,56 означает, что безопасность не обеспечивается при сколь угодно малом времени действия неблагоприятного сочетания. В [1] показано, что та же безопасность, например, для подвижного состава ЭПС-2, возможна при значении вертикальной силы не менее 56,25 кН независимо от времени действия. При вертикальном усилии менее 23,814 кН сход колеса с рельса неизбежен.

Общепризнано, что увеличение жесткости пролетных строений, ведущее к снижению их прогибов под нагрузкой, положительно сказывается на взаимодействии подвижного состава и пути (как верхнего, так и нижнего пролетных строений). На рис. 1, где представлены результаты численных экспериментов прохождения 6-вагонного высокоскоростного поезда через однопролетный мост, видно, что при увеличении коэффициента жесткости пролетного строения в 2,5 раза (коэффициент

жесткости увеличен с 4 до 10) динамические прогибы уменьшаются с 24 мм ( $L/750$ ) до 4,2 мм ( $L/4300$ ).

Собственные частоты первой формы колебаний балочных пролетных строений длиной 18–33 м составляют 4–10 Гц [5], кузова экипажа – 2–3,5 Гц [4], частота возбуждения колебаний достигает 3,8 Гц (при длине экипажа 26 м и скорости 97 м/с). Для одного блока типового пролетного строения длиной 18 м коэффициент жесткости, т. е. произведение модуля упругости на приведенный момент инерции без экспоненциальной части,  $EJ=4$  и первая собственная частота составит 4,3 Гц – этот вариант рассматривается как базовый для сравнения. Аналогичное пролетное строение с  $EJ=10$  имеет первую собственную частоту 6,8 Гц.

Колебания середины пролетного строения различной жесткости при проходе состава из 6 вагонов со скоростью 97 м/с показаны на рис. 1. Как можно заметить, увеличение жесткости пролетного строения привело к повышению частоты первой формы собственных колебаний, удалению режима колебаний от резонансной зоны амплитудно-частотной характеристики пролетного строения и снижению амплитуды колебаний. Означает ли это повышение безопасности движения?

Рассмотрим условия безопасности движения различных экипажей. В таблице 1



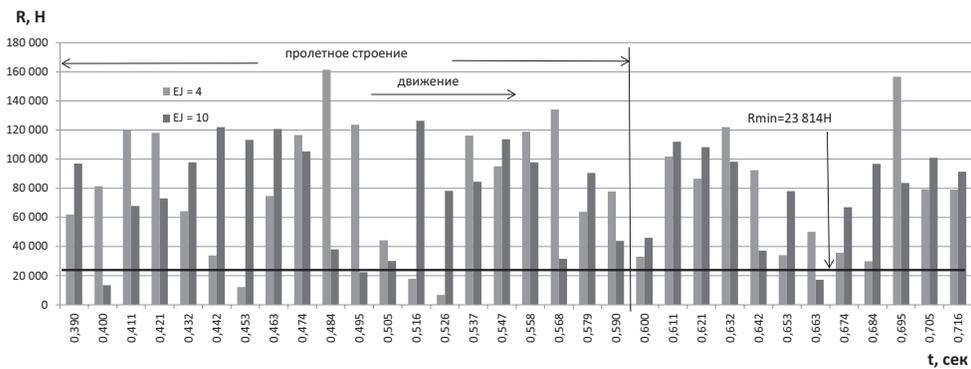


Рис. 2. Усилие в контакте колеса и рельса при разной жесткости балок.

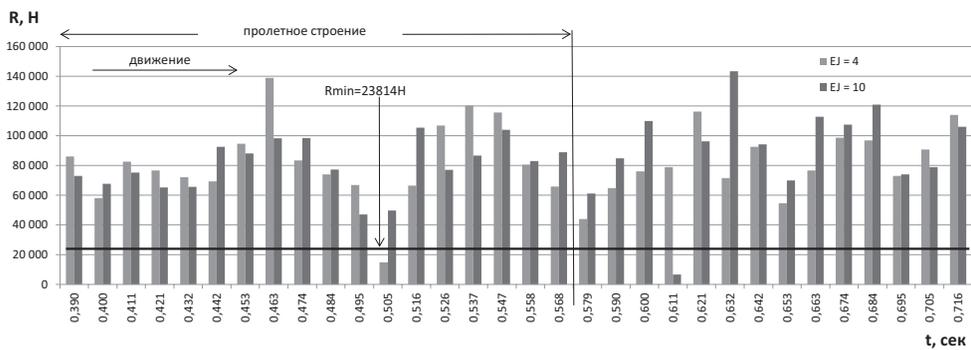


Рис. 3. Усилие в контакте колеса и рельса при разной жесткости балки моста в месте устройства контроля.

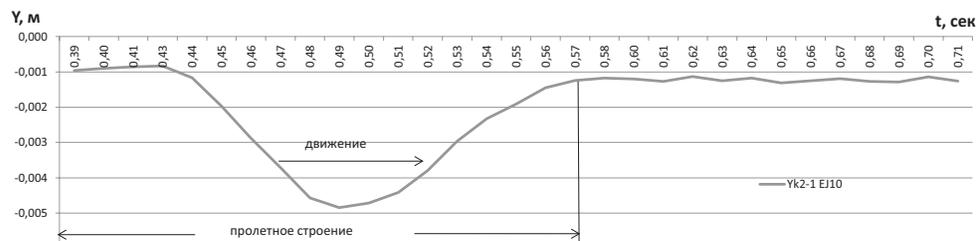


Рис. 4. Колебания колеса №2 при проходе через мост.

представлены данные о максимальных и минимальных значениях вертикального усилия между колесом и рельсом для отдельных единиц состава из 6 вагонов, а на рис. 2 – усилие в контакте одного из колес с рельсом.

Как видно из таблицы, условия безопасности, сформулированные в начале статьи, не соблюдаются для 2–5 вагонов при пролетном строении  $EJ=4$  и 3–5 вагонов при пролетном строении  $EJ=10$ , поскольку усилие между колесом и рельсом оказывается ниже 23,814 кН.

Таким образом, ужесточение норм прогибов пролетных строений само по себе не дает положительного эффекта в смысле безопасности движения. Решение проблемы следует искать в привлечении комплексных динамических параметров пролетных строений и верхнего строения пути.

В [1] разработана теория оптимального управления динамическими процессами с помощью стационарных функций изменения параметров пути по длине моста. Локальное изменение жесткости рельсовой

Таблица 2

**Экстремальные значения усилий между колесом и рельсом при проходе через  
однопролетный мост с ездой по балласту, кН**

Вагон №	1	2	3	4	5	6
Базовый вариант						
Rmin	34,5	20,6	15,9	18,4	17,3	31,5
Rmax	116,2	133,0	139,1	161,7	184,4	161,3
Вариант с контррельсом						
Rmin	47,8	29,4	32,0	38,2	31,7	19,3
Rmax	118,8	119,6	125,0	135,9	138,5	139,7



плети является примером такого управления. Технически увеличение жесткости рельсовой плети достигается установкой контррельсов, имеющих жесткое скрепление со шпалами. При этом в необходимых местах изгибная жесткость контррельса может быть нулевой, если нет стыков.

Применение контррельсов значительно улучшает устойчивость колеса на рельсе (таблица 2). Однако полностью решить проблему безопасности не удастся: для шестого вагона вертикальное усилие взаимодействия колеса и рельса недостаточно, чтобы предотвратить подъем гребня колеса на рельс, ибо оно менее 23,814 кН.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют усилия в контакте одного из колес с рельсом при разной жесткости пролетного строения и колебания колеса при проходе через мост с коэффициентом жесткости балки  $EJ=10$ . Из рис. 3 явствует, что увеличение жесткости пролетного строения заметно уменьшает изменчивость усилия в контакте колеса и рельса, хотя в обоих случаях имеются по одному интервалу времени до 0,01 с, когда нарушаются условия безопасности. Сравнение с рис. 2, где нарушение условий безопасности носит неоднократный характер на интервале до 0,02 с, показывает, что предложенная мера значительно улучшает взаимодействие колеса и рельса.

Рис. 4 демонстрирует устойчивость методов численных экспериментов. Видно, что колебания колеса носят затухающий характер. Заметно также, что при входе на пролетное строение на интервале 0,39–0,44 с подъем колеса (значения  $Y$  менее 1 мм) обусловлен фазой колебаний пролетного строения (см. рис. 1 на этом же интервале).

*Приведенные результаты свидетельствуют, что решение проблемы безопасности высокоскоростного движения может быть достигнуто совместной оптимизацией динамических свойств как пролетных строений, так и верхнего строения пути.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков В. Ю. Взаимодействие подвижного состава с элементами мостового перехода при высокоскоростном движении / Дис... док. техн. наук. – М., 1994. – 395 с.
2. Носарев А. В., Поляков В. Ю. Численное моделирование колебаний в системе «мост-путь-экипаж» // Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 863. / МИИТ. – М., 1992. – С. 3–10.
3. Поляков В. Ю., Жуков К. А. Моделирование колебаний в системе «мост-путь-экипаж» // Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 870. / МИИТ. – М., 1991. – С. 57–65.
4. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
5. Динамика железнодорожных мостов / Н. Г. Бондарь, И. И. Казей, Б. Ф. Лесохин, Ю. Г. Козьмин. – М.: Транспорт, 1965. – 412 с.
6. Иванченко И. И. К формированию норм для мостов на высокоскоростных магистралях железных дорог // Транспортное строительство. – № 1. – 2014. – С. 22–25.

