



Оптимизация переходных зон мостов на ВСМ



Владимир ПОЛЯКОВ

Vladimir Yu. POLYAKOV

Optimization of Bridge Transition Zones on High-Speed Railways (HSR)

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 62)

В статье рассматриваются проблемы долговечности и стабильности в профиле мостового полотна и подходах к мосту, а также безопасности на этих участках при скоростях движения до 400 км/ч. Теория оптимального управления динамическими процессами в системе «мост-путь-экипаж» позволяет синтезировать конструкции, предполагающие сравнительно равномерное воздействие на подрельсовое основание в зоне моста, при этом среднее значение нагрузки на балласт максимально приближено к заданному. Оптимальные конструкции обеспечивают достаточное усилие в контакте колеса и рельса, что приводит к существенному повышению безопасности движения.

Ключевые слова: железнодорожный мост, взаимодействие поезда с мостом, ВСМ, безопасность движения, стабильность пути.

Поляков Владимир Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Переходной участок в месте сопряжения мостов с земляным полотном, как известно, является проблемной зоной. Подход к мосту и сход с него – различные зоны по условиям воздействия. На рис. 1 приведены результаты высокоточного нивелирования профиля пути в местах сопряжения безбалластного мостового полотна с насыпью на одном из путепроводов окружного отделения Московской железной дороги. Шпалы с номером «0» расположены на шкафных стенках устоев, положительные номера – на въезде, отрицательные – на съезде с пролетного строения. Методика измерений изложена в [1].

1.

Осадки традиционного пути на подходах привели к образованию значительной геометрической неровности профиля и скрытой неровности (отметки основания шпал). Эти неровности вызваны двумя факторами – практически безосадочным подрельсовым основанием на мосту с безбалластным полотном и колебаниями экипажей, вызванными деформациями пролетного строения под нагрузкой. Первый фактор привел к тому, что в отсутствие

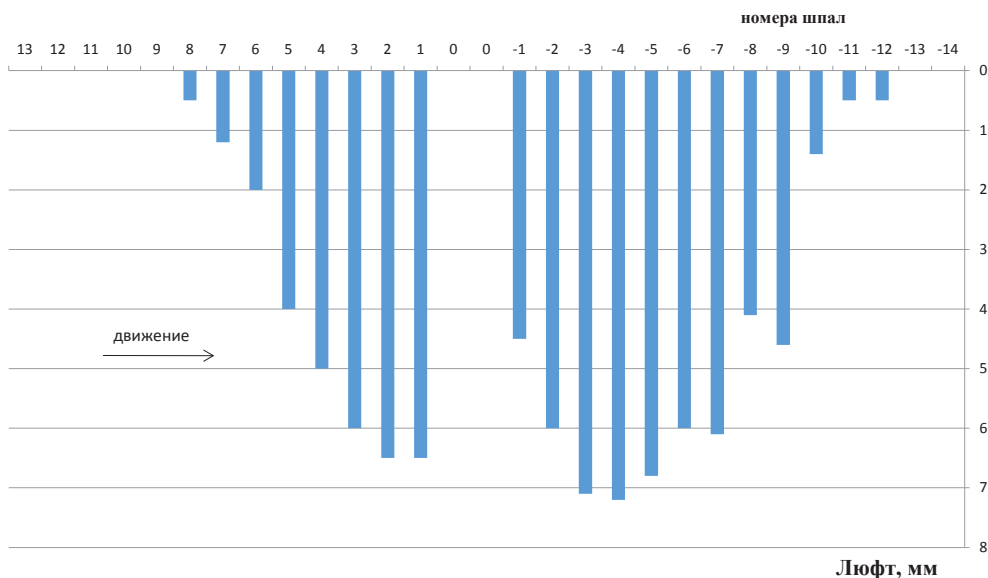


Рис. 1. Глубина скрытых неровностей в зоне моста.

нагрузки рельс на протяжении нескольких метров участков примыкания просто висит в воздухе, не опираясь на балласт, под шпалами образуются так называемые люфты, величина которых приведена на рис. 1. Колесо вагона фактически движется по скрытой неровности, которая значительно глубже.

Второй фактор определяет различия неровностей на въезде и съезде моста. Если на въезде неровность сравнительно короткая и значения люфтов монотонно возрастают по мере приближения к мосту, то на съезде неровность длиннее из-за колебаний вагонов, вызванных колебаниями пролетного строения. В [2] показано, что изменчивость нагрузки на подрельсовое основание за пролётным строением носит колебательный характер, так как это вызвано колебаниями экипажа. Отметим, что к моменту обследования пропущенный после капремонта тоннаж составил всего 100 млн т брутто.

Образование предмостовой ямы — результат осадок пути на балласте, и рост люфтов носит монотонный характер. Поведение поезда после схода с моста полностью определяется колебаниями пролётного строения и устройством мостового полотна. Величины люфтов под шпалами изменяются в соответствии с колебаниями

элементов экипажа, которые возбуждаются при прохождении через колеблющееся пролётное строение. Поэтому при решении проблемы зоны сопряжения необходимо рассматривать весь участок мостового перехода, включая и пролётные строения, для разработки переходных конструкций до и после моста и увеличения долговечности узла сопряжения мостов и земляного полотна.

Другой важный вывод — необходимо снижать воздействие на подрельсовое основание ниже величины, при которой начинается образование неупругих остаточных деформаций в подрельсовом основании. В соответствии с [3] такой критический уровень нагрузки на подрельсовую опору (подкладку) составляет около 31 кН.

Для формулировки требований к конструкциям переходного участка достаточно рассмотреть однопролётный мост, который, конечно, содержит все необходимые элементы — подход к мосту, колеблющееся пролетное строение и сход с него. При разработке требований к конструкциям применялась теория оптимальных динамических процессов в системе «мост-путь-экипаж». Отметим, что из всех критериев оптимальности [6] наиболее эффективным для обеспечения стабильности пути, предотвращения остаточных дефор-



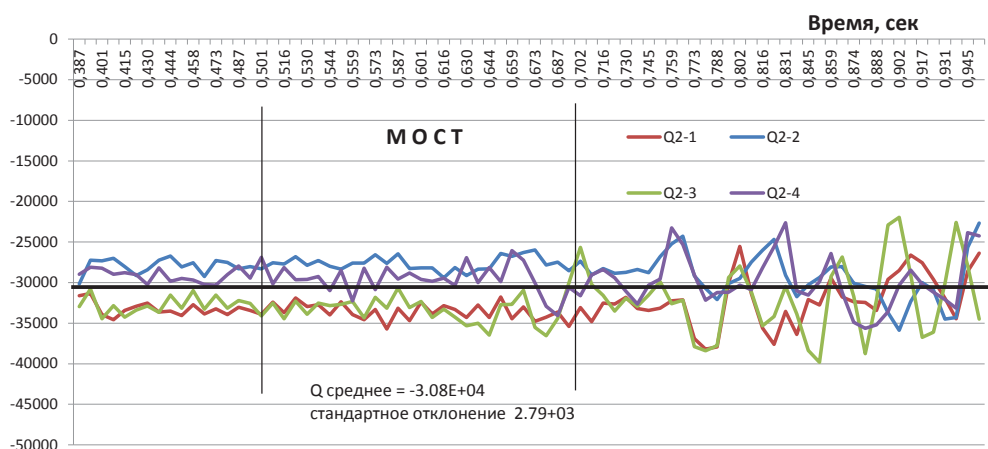


Рис. 2. Нагрузка на подрельсовую опору от поезда ЭВС-2 до оптимизации.

маций балласта будет критерий минимального отклонения нагрузки на подрельсовое основание от заранее заданной величины Q :

$$D = \int_L \int_T (\gamma(x) \delta(x) U'(y_r - y_b) - Q)^2 dx dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $U(x, t) = \gamma(x) \delta(x) U'$ ($y_r - y_b$) — реакция подрельсового основания, $\delta(x)$; $\gamma(x)$ — управляющие функции, моделирующие изменение жёсткости основания по длине соответственно от изменения шага шпал и изменения жёсткости подрельсовой опоры, которая зависит как от толщины сжимаемого слоя (от бесконечной на насыпи до ограниченной на пролётном строении или нулевой на безбалластном мостовом полотне), так и жёсткости прокладки в узле скрепления или прокладки на нижней поверхности шпалы; $y_p = y_p(x, t)$ — функция вертикального перемещения рельса; y_b — то же для пролётного строения; L — длина расчётного участка, включающего искусственное сооружение и подходы к нему; T — время пребывания состава на расчётном участке; Q — среднее заданное значение нагрузки на подрельсовое основание непосредственно под колесами по всей длине участка перехода и за всё время прохождения состава.

В подинтегральном выражении (1) записано подлежащее минимизации среднеквадратическое отклонение усилий $U(x, t)$ от заданного значения Q . Управляющие функции $\delta(x) = U3$, $\gamma(x) = U2$, составляющие минимум функционалу качества (1), подлежат определению в процессе оптимизации взаимодействия в системе «мост—путь—экипаж».

Достижение минимума интегрального критерия качества будет означать относительно равномерное воздействие на подрельсовое основание под всеми колесами поезда, причем максимально приближенное к заданной величине средней нагрузки Q . Такая постановка позволяет избежать значительных локальных перегрузок, ведущих к расстройству пути в профиле и накоплению остаточных деформаций, указанных на рис. 1.

2.

Вначале рассмотрим поведение в системе «мост—путь—экипаж» в отсутствие каких-либо специальных конструкций пути на подходах и при наличии мостового полотна при эпюре железобетонных шпал 1840 шт./км, имеющего загрязнённый и увлажнённый балласт, пролётное строение железобетонное, коробчатого сечения полной длиной 23,6 м. При синхронном нагружении двух путей наблюдаются наибольшие колебания пролётного строения, а значит, и экстремальное взаимодействие в системе. Амплитуда колебаний пролётного строения, а значит, и воздействие на подрельсовое основание за мостом при увлажнённом загрязнённом балласте оказались на 7 % больше, чем при чистом сухом балласте. Далее будем рассматривать именно такие условия.

На рис. 2 показаны диаграммы нагрузки на подкладки под колесами второго вагона состава ЭВС-2, проходящего по мосту с пролетным строением 23,6 м на скорости 400 км/ч. Здесь и далее: вертикальная ось —

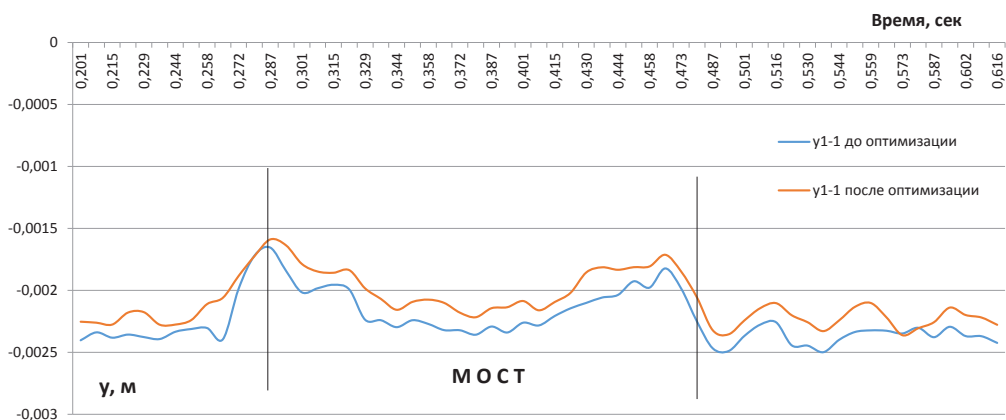


Рис. 3. Колебания первого колеса первого вагона.

нагрузка на подкладку (H), горизонтальная — время t (сек) для второго колеса второго вагона ($t = 0$ при входе этого колеса на расчётный участок), расчётный вагон состава движется слева направо. Для таких пролетных строений установившиеся колебания с амплитудой 0,918 мм наблюдаются уже при проходе второго вагона. И это является причиной значительных колебаний подвижного состава и перегрузок пути за пролётным строением, в то время как скачок жёсткости при входе на мост остаётся незамеченным. Нагрузка на подрельсовую опору за мостом достигает 40 кН, а на мосту и перед ним составляет около 35 кН при среднем значении на всем участке мостового перехода 30,8 кН.

Отмеченный выше «незаметный» вход колеса второго вагона на пролетное строение, который выражается в отсутствии заметного увеличения нагрузки на первую подрельсовую опору на мосту, нуждается в комментариях.

Колебания первого колеса первого вагона (рис. 3) соответствуют «классическому» представлению о взаимодействии в системе «мост—путь—экипаж» при статической постановке и сравнительно небольших скоростях. Как видно из рис. 3, до начала колебаний пролётного строения как до оптимизации, так и после первое колесо реагирует на изменение жёсткости подрельсового основания при переходе с насыпи на мост, что выражается в довольно резком уменьшении прогиба рельса под этим колесом, возбуждении колебаний колеса (оно «подпрыгивает»). Видно также, как пролетное строение деформируется под первой

тележкой, и колесо следует по деформированному профилю. Оптимизация сглаживает переход, возбуждаемые при входе колебания колеса заметно меньше. Однако в дальнейшем колебания в системе в значительной степени определяются колебаниями пролётного строения, а не изменением жёсткости подрельсового основания. На рис. 4 перемещение колеса в момент 0,523 с вызвано не скачком жёсткости, а фазой колебаний пролётного строения [8].

Как уже указывалось, при нагрузке на подкладку более 31 кН начинают проявляться остаточные деформации и цель оптимизации — их недопущение. Отметим, что указанные значения нагрузок неизбежно приведут к появлению неупругих (остаточных) деформаций в балласте, и это станет причиной возбуждения дополнительных колебаний неподдрессоренных масс, расстройств пути в профиле и ухудшения взаимодействия в системе «мост—путь—экипаж», что недопустимо.

Оптимизация приводит к значительным изменениям во взаимодействии в системе «мост—путь—экипаж» (рис. 5). Оптимальная управляющая функция U_2 , связанная с распределением жесткости прокладок под рельсами (или с устройством подкладок на подошве шпалы), изменяющая жёсткость подрельсовой опоры, указана на рис. 6. Такое распределение жёсткости сравнительно легко реализуется на практике.

Из рис. 5 видно, что среднее значение нагрузки на подрельсовое основание значительно ниже стандартного отклонения



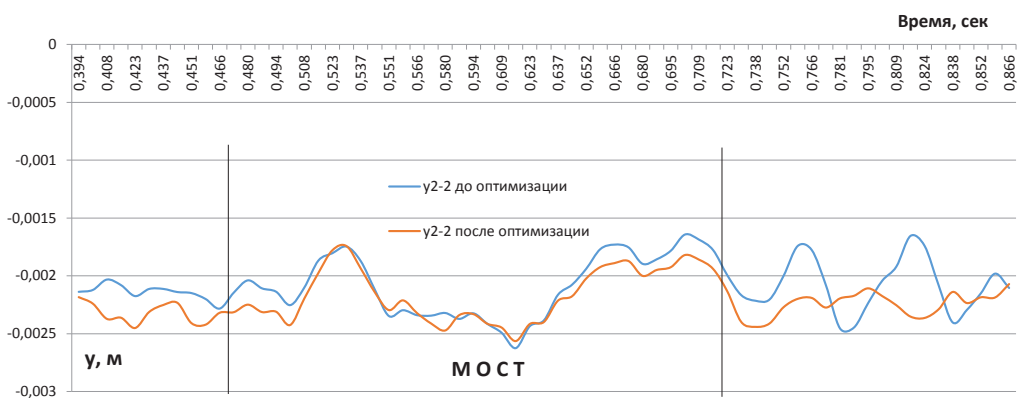


Рис. 4. Колебания второго колеса второго вагона.

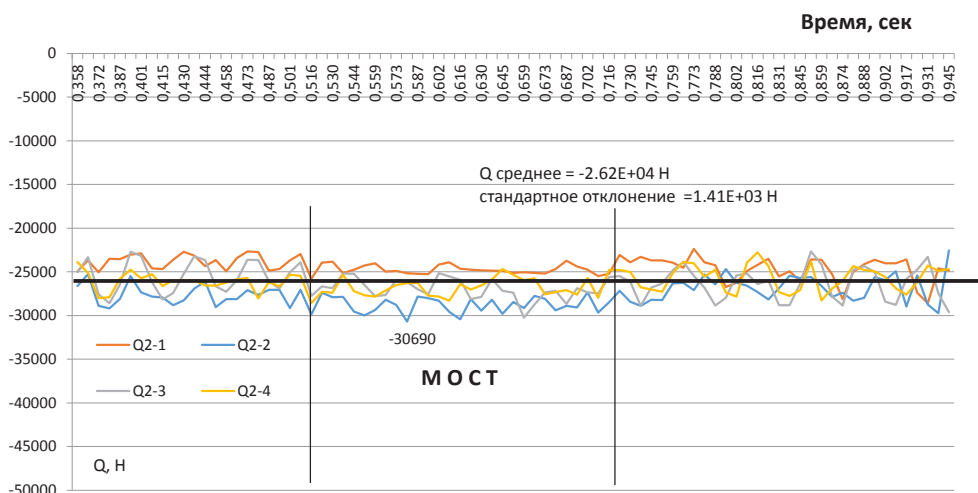


Рис. 5. Нагрузка после оптимизации.

в 3,6 раза. Но главное — максимальное значение нагрузки снижено до 30,7 кН, что теоретически исключает появление неупругих остаточных деформаций под шпалой (порог образования остаточных деформаций балласта — 31 кН). Необходимо отметить, что указанный порог нагрузки до появления остаточных деформаций получен для железобетонных шпал на щебеночном балласте. Предлагаемое решение предполагает использование упругих подкладок на нижней поверхности шпал, что заметно повысит этот порог.

Применение специальной конструкции мостового полотна начинается на шпале № 20 (рис. 6). До этой точки $U_2 = 1$, что соответствует обычной конструкции пути: шпалы с эпюрой 1840 шт./км, прокладки с жесткостью 90 кН/мм, балласт загрязнен и увлажнен. Отличие от обычной конструк-

ции состоит в том, что к шпале № 20 контрельс (пакет контруголок) после челнока приведен в максимально близкое положение к рабочему рельсу ($U_1 = 0,85$) и дальнейшее изменение этого положения будет подавляться вплоть до шпалы № 120. За этой шпалой начинается сведение контрельсов в челнок и подкладки имеют стандартную жесткость.

3.

Чрезвычайно важно, что оптимизация процесса взаимодействия приводит к существенному повышению минимального вертикального усилия в контакте колеса и рельса: $R_{min} = 24,55$ кН. В [7, 8] показано, что при значении этого усилия менее 23,814 кН устойчивость колеса на рельсе и безопасность движения не обеспечиваются при любом сколь угодно малом вре-

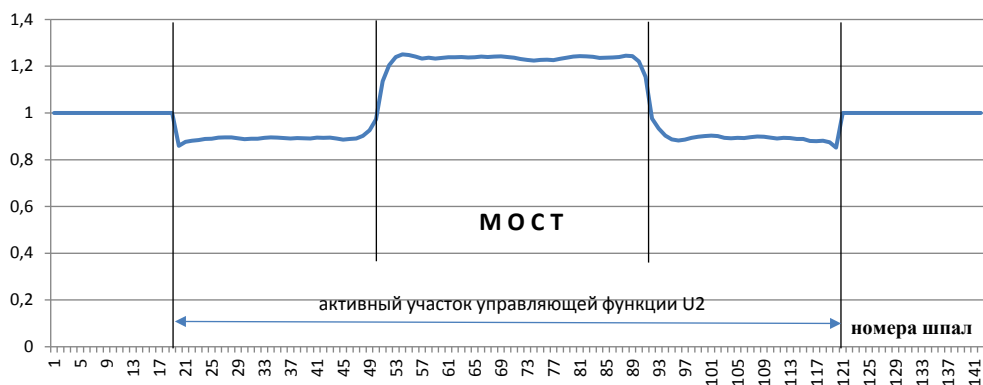


Рис. 6. Функция $U2 = u(x)$, доставляющая минимум функционалу качества.

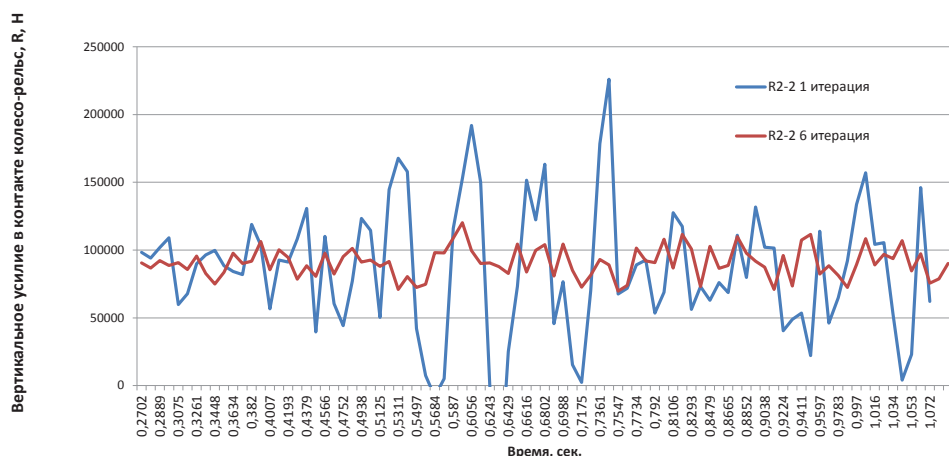


Рис. 7. Пример диаграммы вертикального усилия в контакте колеса и рельса при оптимизации.

мени действия критического значения вертикальной проекции усилия в контакте. При этом до оптимизации фиксируется отрыв колеса от рельса. Пример диаграммы усилий в контакте колеса и рельса на рис. 7: на 1-й итерации зафиксирован отрыв колеса, на 6-й итерации взаимодействие колеса и рельса введено в безопасный диапазон.

Процесс оптимизации представлен на рис. 8. На нем D — значение интегрального функционала качества (1) (уменьшено на 11 порядков для удобства отображения на одной диаграмме), и этот параметр подлежит минимизации; R_{min} — минимальное значение вертикального усилия в контакте всех колес и рельса.

Из рис. 8 видно, что уже на второй итерации удается значительно уменьшить

интегральный функционал качества (1), который представляет собой интеграл по времени прохода состава через расчётный участок суммы среднеквадратических отклонений нагрузки на опору от заданного значения Q под всеми колесами поезда. На второй итерации уже не наблюдается отрыв колеса от рельса — за все время прохождения поезда R_{min} не менее 14,2 кН, а к 9-й итерации R_{min} возрастает до приемлемого значения 24,6 кН.

На первый взгляд решение, предлагаемое теорией оптимального управления, парадоксально — на подходах следует заметно снизить жёсткость пути, а на пролётном строении, наоборот, увеличить. Однако такое решение объясняется необычно жесткими пролётными строениями для ВСМ Москва–Казань. Например, прогиб



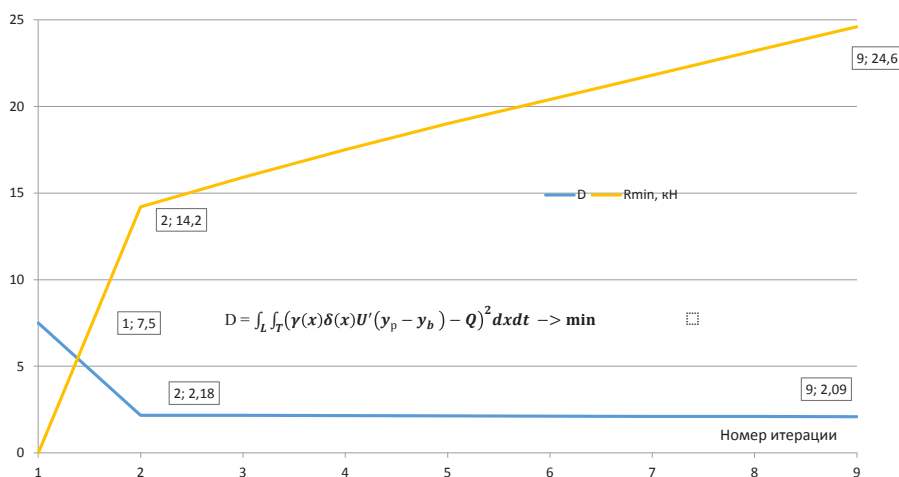


Рис. 8. Эволюция критерия качества D и минимального усилия прижатия колеса в процессе оптимизации.

пролётного строения в процессе колебаний не превышает 1 мм, и он близок к прогибу рельса на земляном полотне. Уменьшение жёсткости пути на подходах позволяет при очень высоких скоростях уменьшать взаимодействие колеса и рельса, особенно от возбуждения колебаний по разным причинам, в том числе проходя через колеблющееся пролётное строение. Здесь уместно отметить, что жёсткость прокладок на безбалластном пути, практически полностью формирующая жёсткость пути, на китайских ВСМ составляет 25 кН/мм [9], что значительно ниже жёсткости применяемых в РЖД прокладок — в среднем 90 кН/мм.

Увеличение жёсткости пути выравнивает деформации рельса на «мягком» подходе и на самом пролётном строении, при этом колесо «не замечает» пролётное строение.

Нетрудно увидеть: для достижения оптимального результата требуются сравнительно простые конструктивные меры — контррельс (пакет контруголков) располагается максимально близко к рабочему рельсу на всем протяжении перехода, эпюра шпал остается неизменной (1840 шт./км). Для управления жёсткостью подрельсовых опор нужны прокладки различной жёсткости, причем они укладываются по простой схеме.

Рассмотрим вопросы безопасности движения подробнее. 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 тяжёлыми последствиями, особенно в зоне моста. В [8] рекомендовалось значение вертикального усилия в контакте колеса и рельса не менее 23,8 кН. На рис. 9 и 10 показаны диаграммы вертикального усилия в контакте колеса и рельса второго вагона в составе ЭВС-2 до и после оптимизации. Как видно, до оптимизации усилие не только неоднократно падает ниже безопасного значения, но и происходит отрыв колеса от рельса. Оптимизация сглаживает взаимодействие колеса и рельса, это взаимодействие становится «спокойнее»: вертикальное усилие не менее 40 кН.

Выводы

Для решения проблемы переходных участков на подходах к мостам необходимо рассматривать весь участок мостового перехода, включая пролётные строения, которые оказывают существенное влияние на колебания вагонов за мостом.

Прикладная теория оптимального управления позволяет найти вполне реализуемые решения для значительного снижения средней нагрузки на подрельсовое основание, неравномерности воздействия на него. При этом максимальное значение нагрузки удастся сделать ниже

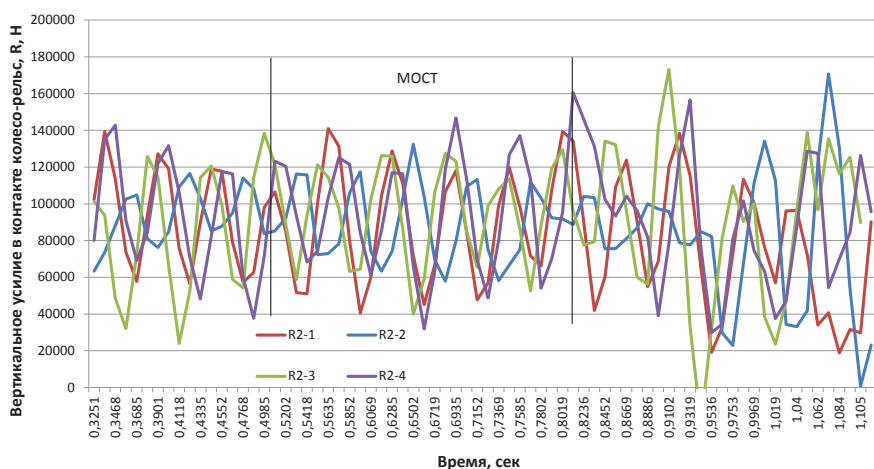


Рис. 9. Усилие в контакте колеса и рельса до оптимизации.

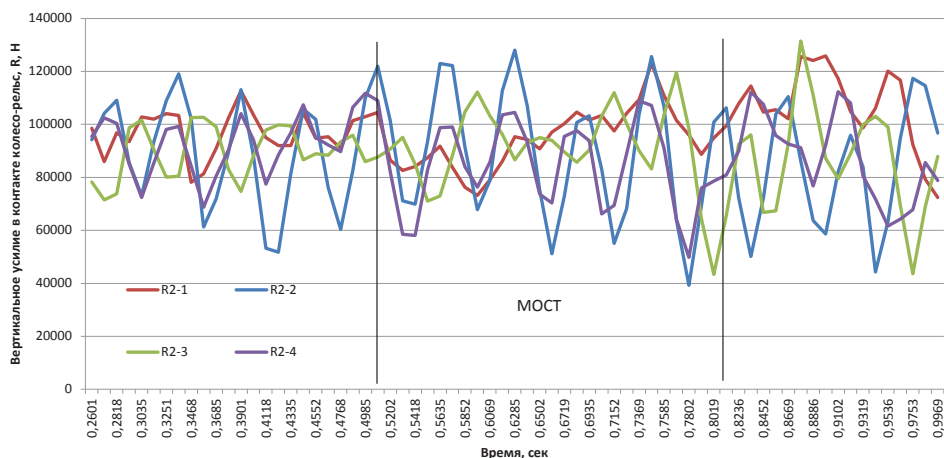


Рис. 10. Усилие в контакте колеса и рельса после оптимизации.

порога появления остаточных неупругих деформаций в балласте. А безопасность движения обеспечить теми же мерами, что и уровень долговечности подрельсового основания.

ЛИТЕРАТУРА

- Клинов С. И., Поляков В. Ю. Методика и результаты определения потайных неровностей пути на подходах к искусственным сооружениям // Межвуз. сб. науч. трудов. – Вып. 759. – М.: МИИТ, 1984. – С. 70–76.
- Поляков В. Ю. Воздействие на путь подвижного состава в зоне моста на ВСМ // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 24–27.
- Гасанов А. И. Расчёт железобетонной шпалы при учете осадочности основания // Труды МИИТ. – Вып. 901. – М., 1996. – С. 47–49.

- Поляков В. Ю. Взаимодействие подвижного состава с элементами мостового перехода при высокоскоростном движении / Дис... док. техн. наук. – М., 1994. – 395 с.
- Поляков В. Ю. Численное моделирование взаимодействия подвижного состава с мостовыми конструкциями при высокоскоростном движении // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
- Поляков В. Ю. Синтез оптимальных пролетных строений для высокоскоростной магистрали // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2016. – № 3. – С. 35–42.
- Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
- Поляков В. Ю. Безопасность при высоких скоростях на мосту // Мир транспорта. – 2014. – № 6. – С. 182–188.
- Wanming Zhai et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 72 (2015), p. 24–36.

Координаты автора: **Поляков В. Ю.** – pvy55@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.04.2017, принята к публикации 05.07.2017.

