

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS119>)

Статья поступила в редакцию 07.02.2019; опубликована 29.03.2019

Ссылка для цитирования этой статьи:

Поляков В.Ю., Данг Нгок Тхань Ударное взаимодействие колеса и рельса на мостах высокоскоростных магистралей // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/15SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS119

For citation:

Poliakov V.Yu., Dang Ngoc Thanh (2019). Wheel-rail impact interaction on the high-speed railroad bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS119

УДК 624.21:625.1:656.2.08:656.2.022.846

ГРНТИ 67.03.03

Поляков Владимир Юрьевич

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Профессор кафедры «Мосты и тоннели»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: pv55@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=842509

Данг Нгок Тхань

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Аспирант

Ударное взаимодействие колеса и рельса на мостах высокоскоростных магистралей

Аннотация. Рассматривается взаимодействие подвижного состава высокоскоростных железных дорог и мостового полотна пролетных строений мостов. Отмечается важность адекватной модели взаимодействия колеса (механизма) и рельса (конструкции). Эта модель обязательно должна включать рельс и мостовое полотно в виде плит безбалластного пути. В статье приводятся результаты численных экспериментов с проходом перспективного подвижного состава через мост на высокоскоростной магистрали, на котором применены унифицированные пролетные строения для магистрали Москва – Казань. Показано, что в случае резонансных колебаний пролетных строений возникает угроза схода колес с рельса из-за падения вертикального усилия в контакте колеса и рельса до 0, что означает отрыв от рельса. Кроме того, за отрывом колеса следует удар, сопоставимый по величине с ударами при недопустимых на высокоскоростной магистрали дефектах колес и рельса, ведущих к излому рельса – наиболее распространенной причине схода подвижного состава. Усилия удара эквивалентны удару колеса с плоской выбоиной («незакатанный ползун»), и могут превышать 300 кН при статическом усилии 85 кН. Вертикальное контактное усилие возрастает после отрыва от 0 до максимальной величины за 0,002–0,004 с. Результаты численных экспериментов показывают, что именно резонанс пролетных строений ведет к ударному взаимодействию колес с рельсом. Снижение жесткости промежуточного рельсового скрепления снижает

вертикальное усилие при ударе, но риск схода из-за разгрузки колес при колебаниях в системе «мост – путь – поезд» сохраняется.

Ключевые слова: высокоскоростные магистрали; мост; пролетные строения; резонанс; безопасность движения; взаимодействие колеса и рельса; удар

Введение

Ударное взаимодействие колеса и рельса приводит к серьезнейшим последствиям. Так, в результате многолетних наблюдений установлено, что поперечный излом рельса является наиболее распространенной причиной схода подвижного состава с долей 15,3 % от всех случаев схода [1]. В классификации дефектов рельса [2] поперечный излом по рис. 4 связывается с ударным воздействием колес с дефектами поверхности катания (плоские выбоины, ползуны), хотя в России излом не является наиболее распространенной причиной изъятия рельсов. Необходимо отметить, что указанные дефекты колес, а также рельсов на высокоскоростной магистрали (ВСМ) недопустимы: за рубежом поезда ВСМ перед выходом из депо тщательно обследуются, рельсы регулярно подвергаются шлифовке для недопущения коротких неровностей на поверхности катания.

В исследованиях проблемы взаимодействия подвижного состава и пути (мостового полотна) велика роль адекватной модели системы, которая обязательно должна включать рельс. В отсутствие рельса в модели делать выводы об усилии в контакте колесо-рельс, очевидно, бессмысленно, так же, как и вводить в расчет упругое рельсовое скрепление и демпфирование в нем. Тем не менее, такие выводы делаются, что совершенно не соответствует природе рассматриваемых колебаний. Значительно более гибкий по сравнению с пролетным строением рельс отделен от балки упруго-вязкими подрельсовыми опорами, и связан с колесом очень жестким контактом, в результате чего колебания подсистемы «колесо-рельс» происходит с частотой, на порядок большей, чем первые собственные частоты балок, определяющие ее колебания.

Резонанс пролетных строений

Рассмотрим возможность ударного взаимодействия колеса и рельса при проходе высокоскоростного поезда через мосты.

Численные эксперименты проводились на модели [3; 4], включающей рельс, плиты безбалластного мостового полотна и пути, пролетные строения, подвижной состав, модель которого учитывает колебания подпрыгивания и галопирования. Основные свойства подвижного состава, достаточные для моделирования колебаний, представлены в технических требованиях [5]. Рассматривался поезд обычного формирования (10 вагонов) и сдвоенный (20 вагонов). Предполагалось, что колеса и рельсы идеально ровные (круглые) и не имеют каких-либо дефектов на поверхности катания.

Особенностью унифицированных пролетных строений, спроектированных для ВСМ Москва-Казань (технический проект), являются сравнительно низкие значения собственных частот колебаний, вследствие чего резонанс этих пролетных строений [6] происходит на скоростях движения меньше расчетных (420 км/ч), определенных в СТУ [7]. Рассматриваемые пролетные строения соответствуют указанным СТУ, в соответствии с которыми требуемый диапазон частот пролетных строений должен находиться в интервале 3–7 Гц для балок 34,2 м (таблица). Критические скорости V_{cr} (м/с) получаются умножением длины волны возбуждения (длины вагона, 24,85 м [5]) на значение соответствующей собственной частоты.

Таблица

Требования СТУ [7] к первым собственным частотам f_1 и критические скорости V_{cr} , соответствующие этим частотам

L, м	f_1 min, Гц	f_1 max, Гц	V_{cr} , min, км/ч	V_{cr} , max, км/ч
23.6	3.73	9.23	333	824
34.2	2.97	6.91	265	617
50	2.35	5.16	210	461

Составлено авторами

Как видно из таблицы, минимальные критические скорости значительно меньше расчетной скорости 420 км/ч [7], что создает угрозу резонанса пролетных строений при скоростях движения менее расчетных. Критические скорости для балок 23,6 м, 34,2 м и 50 м составили соответственно 585, 391, 280 км/ч. Рассматриваемые пролетные строения являются унифицированными, т. е. применяемыми всюду на линии ВСМ, при разных скоростных режимах и ускорениях поезда, поэтому избежать резонанса не удастся. Резонанс пролетных строений ведет к ударному взаимодействию колеса и рельса. На рис. 1 представлены диаграммы колебаний середины пролетного строения полной длиной 34,2 м при проходе 10-вагонного перспективного состава для ВСМ (аналог Сапсан). Видно, что скорость 400 км/ч является околорезонансной, на скорости 380 км/ч резонанс менее выражен, а на скорости 360 км/ч резонанс отсутствует – наблюдаются биения при вынужденных колебаниях, при которых амплитуда при проходе поезда сначала возрастает, затем убывает, оставаясь ограниченной и менее максимальной резонансной в 1,5 раза. Каждый пик колебаний на всех диаграммах соответствует проходу очередного вагона.

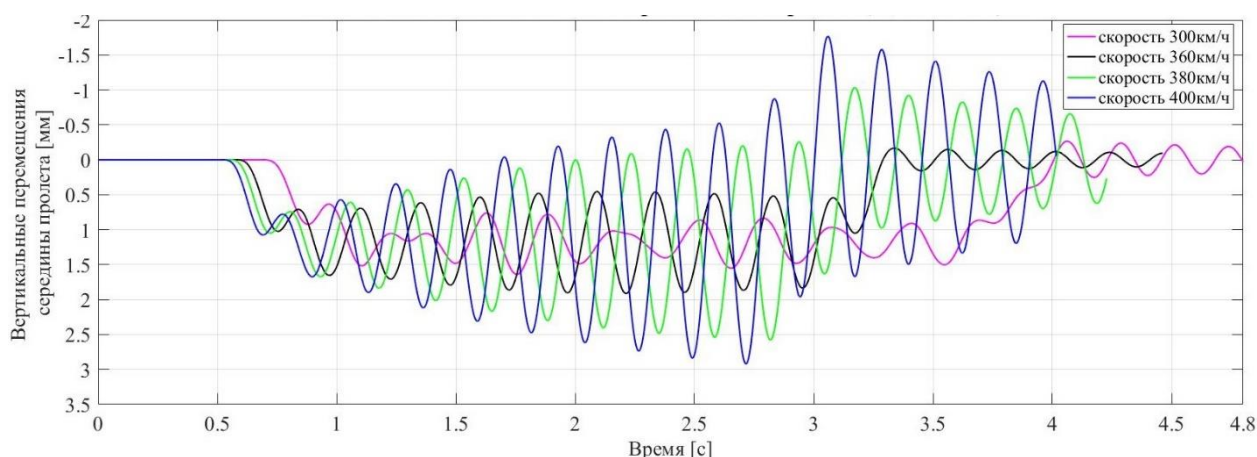


Рисунок 1. Колебания середины пролетного строения 34,2 м при различных скоростях поезда (составлено авторами)

Важно отметить, что при резонансных колебаниях соблюдается ограничение на предельный прогиб балки – 2 см – в соответствии с [7]. Однако, как будет показано далее, условия взаимодействия при выполнении этого ограничения неудовлетворительны, поскольку предельный прогиб в [7] определен не по условию безопасности, а по условию комфорта пассажиров (ускорению в кузове вагона).

Моделирование взаимодействия колес с рельсом

На рис. 2–11 представлены диаграммы усилия в контакте разных колес поезда и рельса в зоне мостового перехода, включая подходы. Движение на всех диаграммах происходит слева направо.

Проход первых вагонов даже с критической, резонансной скоростью не представляет проблемы [8], поскольку колебания пролетных строений еще невелики (рис. 1). Под вагоном №10 (рис. 2) колебания пролетного строения уже настолько значительны, что наблюдается не только недопустимое по сходу (менее 26,6 кН) падение усилия в контакте [8], но и отрыв колеса от рельса, причем за мостом. Отрыв колеса после прохода моста объясняется значительно большей общей жесткостью пути на насыпи, чем на мосту: деформации пролетного строения, достигающие нескольких миллиметров, на порядок больше деформаций основной площадки земляного полотна (доли миллиметра). Возбужденное проходом через мост колеблющееся колесо, попадая на жесткое подрельсовое основание, начинает отрываться от рельса, «отскакивать». Необходимо отметить, что с развитием резонанса отрыв колеса от рельса начинается уже на пролетном строении, например, для вагона №12 (рис. 5).

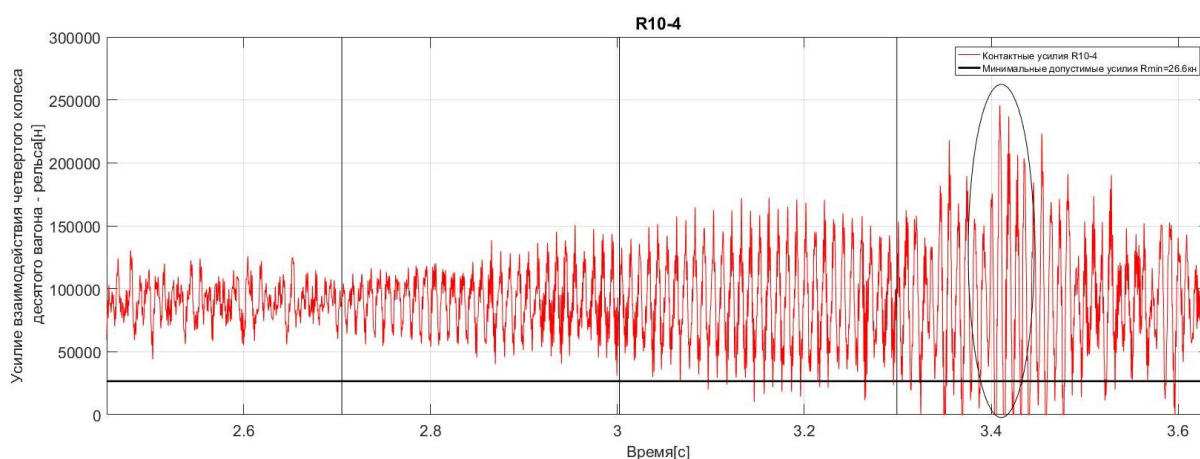


Рисунок 2. Отрыв колеса 4 вагона №10 после прохода моста (составлено авторами)

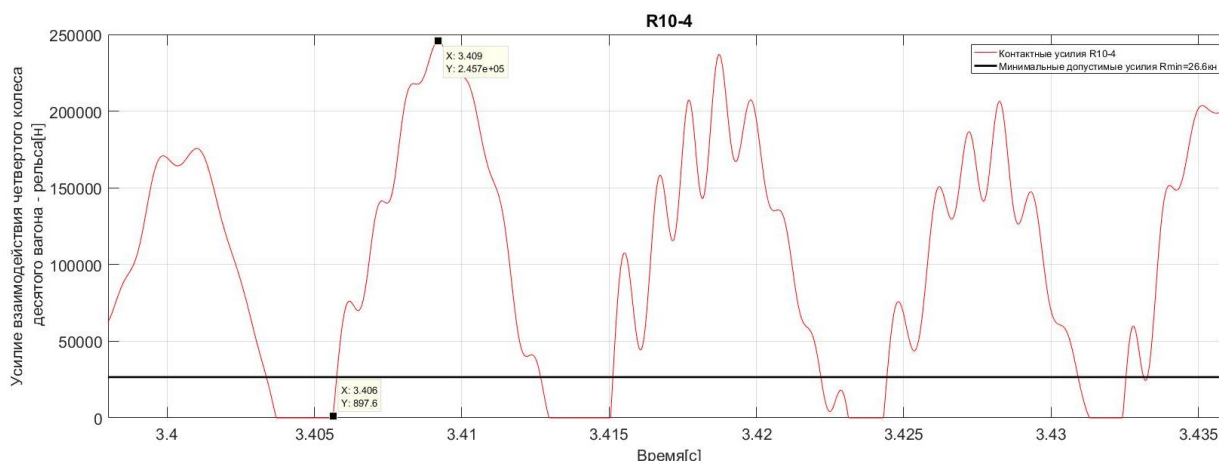


Рисунок 3. Неоднократный отрыв колеса 4 вагона №10 после прохода моста (увеличенный фрагмент, отмеченный на рис. 2) (составлено авторами)

Как видно из рис.4 воздействие колеса на рельс после отрыва возрастает от 0 до 247,7 кН за 0,004 с, что квалифицируется как удар, при котором максимальное усилие превышает статическое значение почти в 3 раза! Еще более значительный удар производит колесо 2 вагона №11 (рис. 6–8): 303 кН за 0,002 с (рис. 8), что в 3,5 раза больше статического значения. Оценка этого ударного воздействия дается далее. Отметим здесь, что описанное ударное воздействие отмечается в случае резонанса пролетных строений. Если движение осуществляется со скоростью, существенно отличающейся от критической, то усилие в контакте того же колеса 2 вагона №11 оказывается приемлемым (рис. 9). Уменьшение

колебаний усилия на пролетных строениях объяснено ранее уменьшенной жесткостью подрельсового основания на мосту по сравнению с подходами. В итоге можно констатировать, что именно резонансные колебания пролетных строений вызывают ударное взаимодействие колеса и рельса. Необходимо отметить, что спроектированные пролетные строения соответствуют условиям проектирования [7] по прогибам пролетных строений. Это свидетельствует о необходимости корректировки норм.

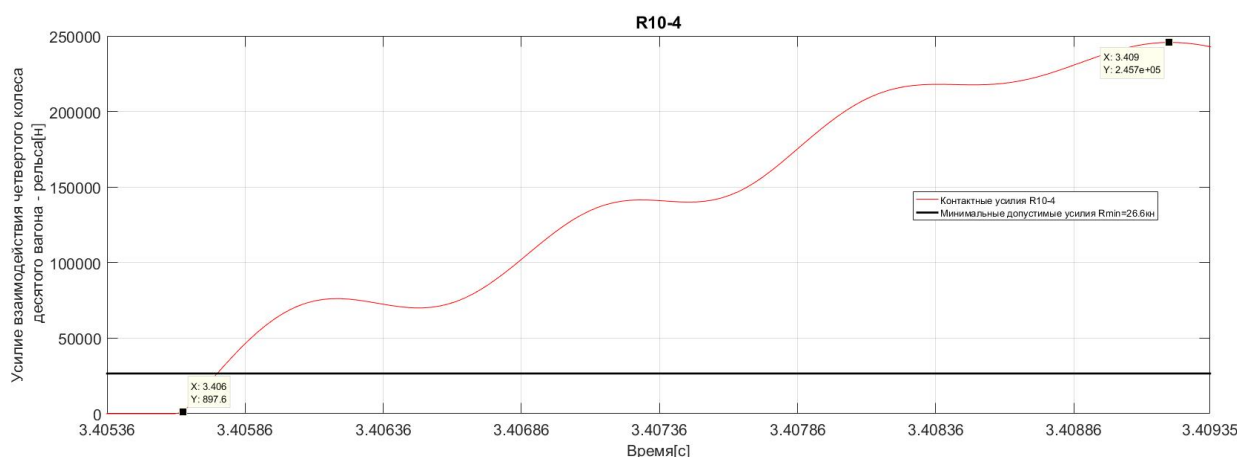


Рисунок 4. Удар колеса 4 вагона №10 в интервале 3,405–3,409 с в течение 0,004 с (составлено авторами)

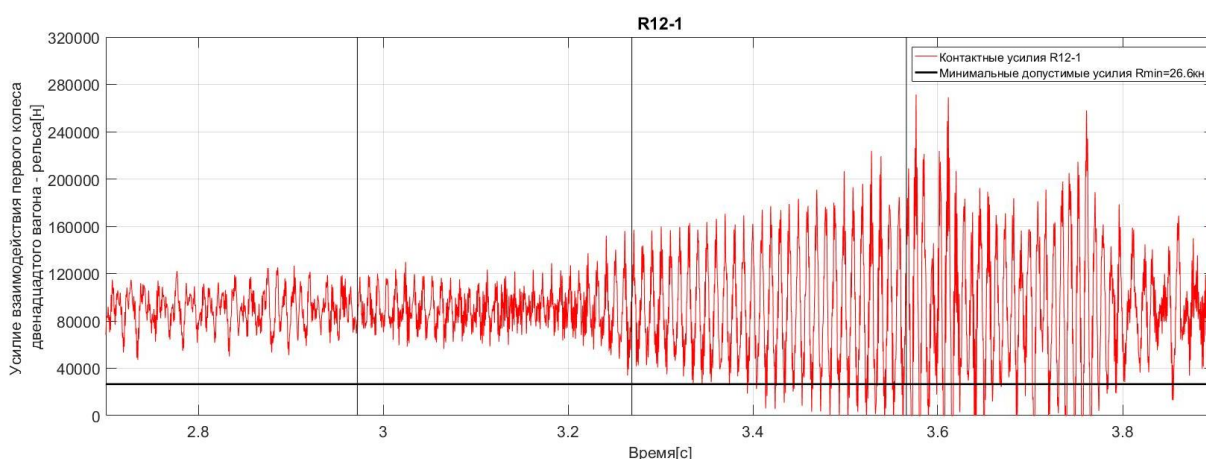


Рисунок 5. Отрыв колеса 1 вагона №12 начинается еще на мосту (составлено авторами)

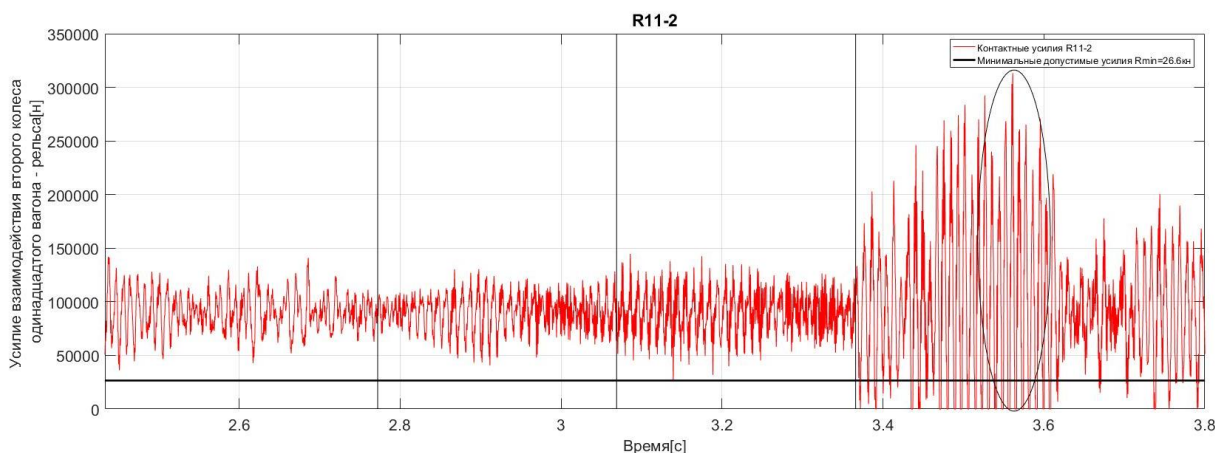


Рисунок 6. Отрыв колеса 4 вагона №10 (составлено авторами)

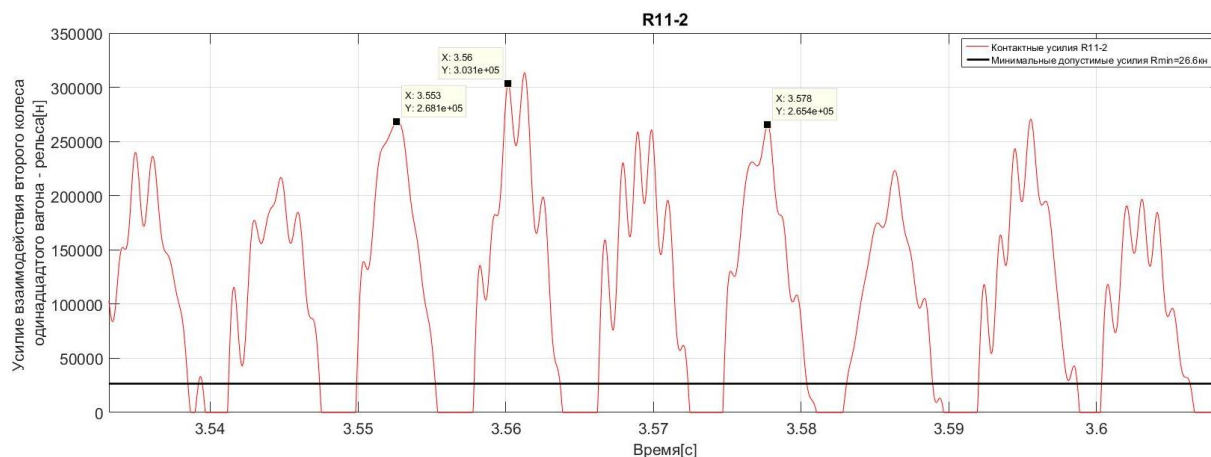


Рисунок 7. Неоднократный отрыв колеса 2 вагона №11 после прохода моста (увеличенный фрагмент, отмеченный на рис. 6) (составлено авторами)

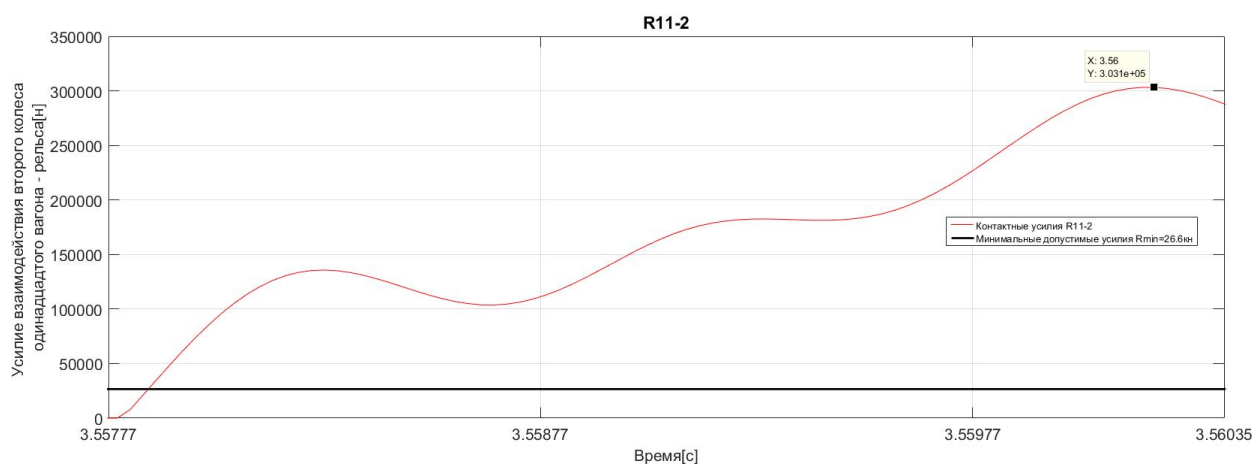


Рисунок 8. Усилие в контакте колеса 2 вагона №11 возрастает от 0 до 303 кН за 0,002 с (составлено авторами)

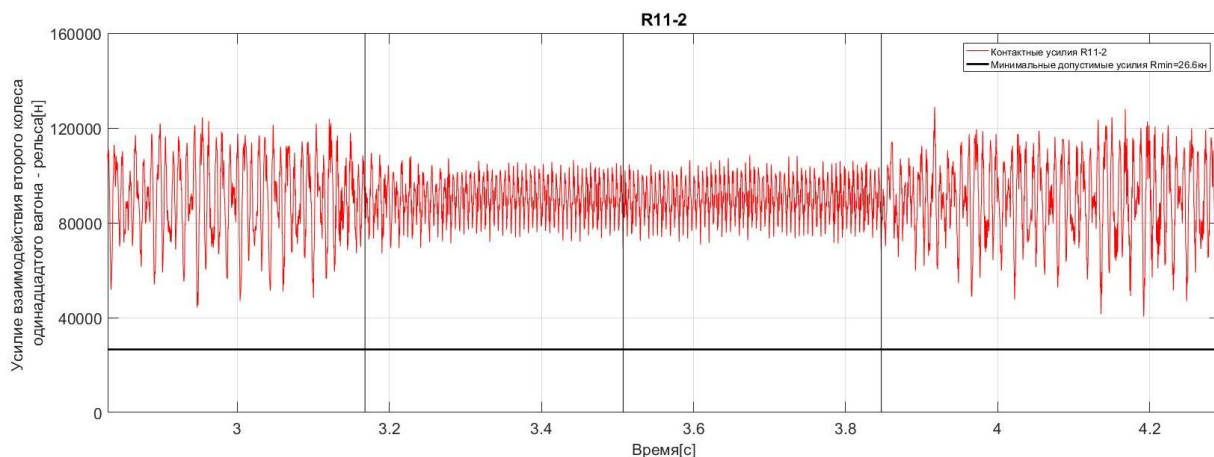


Рисунок 9. Усилие в контакте колеса 2 вагона №11 при скорости, меньше критической (составлено авторами)

Рисунок 9 указывает на важную тенденцию для снижения ударного взаимодействия, связанную с жесткостью подрельсового основания. Рассмотрим взаимодействие колеса и рельса при минимальных значениях жесткости прокладок в промежуточном рельсовом

скреплении, предусмотренных нормативным документом¹ – 50 МН/м (рис. 10–11). Можно отметить, что снижение жесткости подрельсового основания значительно снижает максимальные усилия при ударе (до 154 кН, что, однако, в 1,8 раза больше статического значения), при этом не происходит отрыв колеса. Однако, несмотря на снижение жесткости основания до минимума, вертикальное усилие в контакте падает ниже допустимого предела 26,6 кН [8].

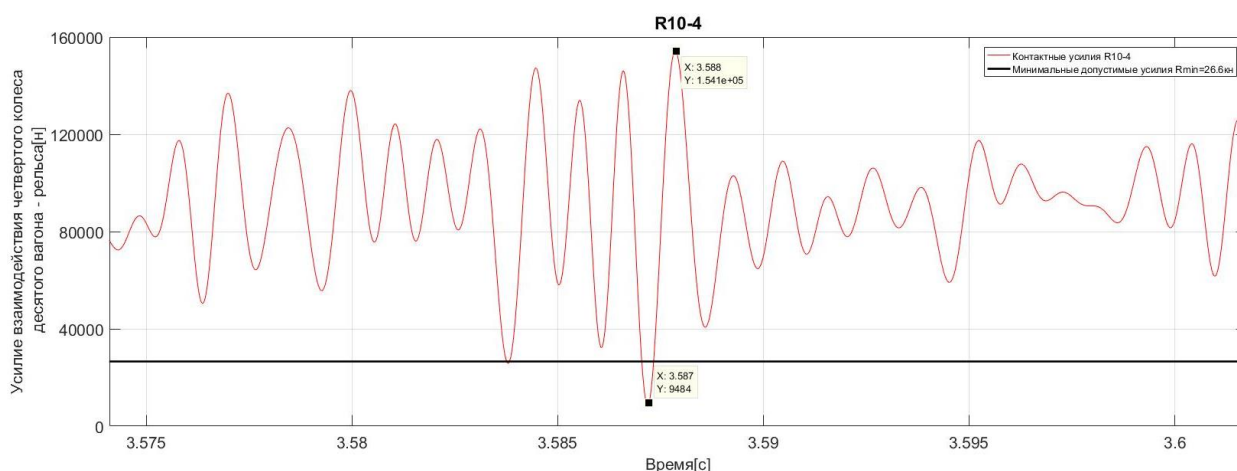


Рисунок 10. Взаимодействие колеса и рельса при минимальной жесткости подрельсовых прокладок (составлено авторами)

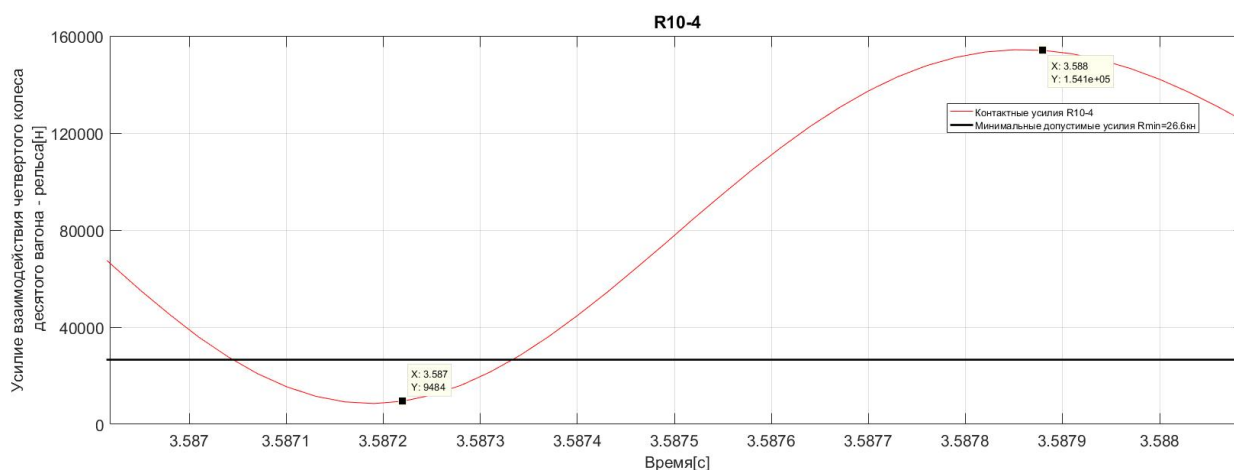


Рисунок 11. Снижение жесткости подрельсового основания уменьшает ударное взаимодействие, но не отменяет риск схода (составлено авторами)

Таким образом, отрыв колеса от рельса представляет собой значительный риск для безопасности движения. Насколько серьезны выявленные удары? В исследовании [9] приведены результаты натурных измерений и численного моделирования прохода колеса с «закатанным ползуном», при этом ударное воздействие характеризуется ростом контактного усилия от 0 до 250 кН за примерно 0,005 с. А в [10] приводится информация о росте максимального усилия с увеличением скорости от 100–120 кН при скорости 40 км/ч до 350 кН при скорости 160 км/ч. С другой стороны, наличие короткой неровности на рельсе глубиной 0,2 мм приводит к росту контактного усилия с 50 кН до 297 кН за время удара. Моделировалось прохождение поезда Синкансен 300 на скорости 250 км/ч на плитном пути [11] (осевая нагрузка

¹ ГОСТ 34078-2017 Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017.

11,315 т). Таким образом, ударное взаимодействие колеса и рельса при проходе мостов на высокоскоростных железных дорогах может быть эквивалентно ударам от взаимодействия колес или рельса с недопустимыми дефектами при резонансе пролетных строений.

Заключение

Обнаруженные ударные воздействия при численном моделировании прохода высокоскоростного поезда через мост с критической скоростью, вызывающей резонанс пролетного строения, сопоставимы с ударом от дефектов колес и рельса, недопустимых на ВСМ. Именно с целью недопущения указанных дефектов на зарубежных ВСМ осуществляется тщательный мониторинг состояния поверхностей катания колес и рельсов, производится регулярная шлифовка рельсов. Резонанс пролетных строений ведет к ударному взаимодействию даже при идеальном состоянии колес и рельсов. Несмотря на выполнение норм проектирования пролетных строений, в которых не рассматривается устойчивость колеса на рельсе для балочных пролетных строений, резонанс следует считать недопустимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christopher P.L. Barkan et al. Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2289, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 154–163. DOI: 10.3141/2289-20.
2. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева и др. М.: Транспорт, 1999. – 405 с.
3. Поляков В.Ю. Численное моделирование взаимодействия подвижного состава с мостовыми конструкциями при высокоскоростном движении // *Строительная механика и расчет сооружений*, 2016. № 2. С. 54–60.
4. Поляков В.Ю., Данг Нгок Тхань. Взаимодействие подвижного состава и пути в зоне мостов на ВСМ. В кн. *Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XIV Международная научно-техническая конференция: труды / РЖД, МИИТ*. – М.: 2017, с. 143–153.
5. *Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав для ВСМ. Изменение №1. Технические требования*, утв. Первым вице-президентом ОАО РЖД А.С. Мишариным 14.04.2017. – М., 2017.
6. Поляков В.Ю. Антирезонанс пролетных строений железнодорожных мостов при высокоскоростном движении // *Транспортное строительство*, №10, 2018, с. 2–5.
7. *Специальные технические условия «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству»*. Изменение №1 / В.Н. Смирнов и др. – С.-Пб: ПГУПС, 2016.
8. Поляков В.Ю., Тхань Д.Н. Безопасность движения и динамические свойства мостового полотна на ВСМ. *Вестник ВНИИЖТ*, 2018, №6, с. 357–363.
9. Wanming Zhai et al. Dynamic effects of vehicles on tracks in the case of raising train speeds // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit* March, 2001. – pp. 125–135.
10. Newton S.G., Clark R.A. An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles // *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1979, 21, pp. 287–297.
11. Xinwen Yang et al. Effect of track irregularity on the dynamic response of a slab track under a high-speed train based on the composite track element method // *Applied Acoustics* 99 (2015), pp. 72–84.

Poliakov Vladimir Yur'evich

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia
E-mail: pvy55@mail.ru

Dang Ngoc Thanh

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia

Wheel-rail impact interaction on the high-speed railroad bridges

Abstract. The paper describes interaction of high-speed rolling stock and railroad bridge deck and proves the importance of adequate model of wheel (mechanism) and rail (structure) interaction. The model must consist of a rail and slabs of the ballastless deck. The paper characterizes the results of computer simulation of perspective rolling stock passing through high speed railroad bridge, that contains the uniform bridge superstructure for Moscow – Kazan line. The paper shows that in case of resonant bridge superstructure vibration the risk of derailment is high because of the decline of the wheel-rail contact force down to zero, which means wheel uplift. Moreover, the impact of the wheel is the result of uplift and the impact value is similar to the impact from impossible damages of wheels or rail on high speed railroad in consequence of which rail breaking occur. This rail breaking is the most frequent reason of derailment. The impact forces are equivalent to the impact of the fresh flat of the wheel and may be more than 300 kN while static force is equal to 85 kN. The vertical contact force is rising from zero to maximum value for 0.002 to 0.004 s after uplift. The computer simulation results show that it is the bridge superstructure resonance, which leads to impact interaction. The rail fasteners rigidity decline causes vertical interaction force decrease during the impact but the derailment risk still exists during vibration of “bridge – track – train” system.

Keywords: high speed lines; bridge; bridge decks; resonance; traffic safety; wheel – rail interaction; impact

REFERENCES

1. Christopher P.L., Barkan and etc. (2012). Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates. *Journal of the Transportation Research Board*, 2289, pp. 154–163. DOI: 10.3141/2289-20.
2. Yakovleva T.G. and etc. (1999). *Zheleznodorozhnyy put'*. [*Railroad track.*] Moscow: Transport press, p. 405.
3. Poliakov V.Y. (2016). Computational modeling of the vehicle-structure interaction on high-speed railways. *Structural Mechanics and Designing*, 2, pp. 54–60 (in Russian).
4. Poliakov V.Y., Thanh D. (2017). Vzaimodeystvie podvizhnogo sostava i puti v zone mostov na VSM. V knige: *Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti.* [*The rolling stock and track interaction in bridge zone on HSR. In the book: The contemporary problems of design, construction and upkeep the railroad track.*] Moscow: RZD, MIIT, pp. 143–153.
5. (2017). Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav dlya VSM. Izmenenie №1. Tekhnicheskie trebovaniya, utverzhennyye Pervym vitse-prezidentom OAO RZHD A.S. Misharinym 14.04.2017. [*High-speed railway rolling stock for high-speed rail. Change number 1. Technical requirements approved by the First Vice-President of Russian Railways A.S. Misharin 04/14/2017.*] Moscow.
6. Polyakov V.Yu. (2018). Antiresonance of railroad bridge span structures in high-speed traffic. *Transport Construction*, 10, pp. 2–5 (in Russian).
7. Smirnov V.N. and etc. (2016). Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya «Sooruzheniya iskusstvennye uchastka Moskva – Kazan' vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali Moskva – Kazan' – Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu». Izmenenie №1. [*Special technical conditions "Artificial structures of the Moscow-Kazan high-speed railway line Moscow-Kazan-Yekaterinburg. Technical norms and requirements for design and construction. Change No. 1.*] Saint Petersburg: Petersburg University of Communications.
8. Polyakov V.Yu., Tkhan' D.N. (2018). Traffic safety and dynamic properties of the bridge bed on the high-speed rail. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 6, pp. 357–363 (in Russian).
9. Wanming Zhai and etc. (2001). Dynamic effects of vehicles on tracks in the case of raising train speeds. *Journal of Rail and Rapid Transit March*, pp. 125–135.
10. Newton S.G., Clark R.A. (1979). An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 21, pp. 287–297.
11. Xinwen Yang and etc. (2015). Effect of track irregularity on the dynamic response of a slab track under a high-speed train based on the composite track element method. *Applied Acoustics*, 99, pp. 72–84.