

На правах рукописи



**ДАНГ НГОК ТХАНЬ**

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МОСТОВОГО ПОЛОТНА БАЛОЧНЫХ  
ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ**

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,  
мостов и транспортных тоннелей

Автореферат на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2019 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» на кафедре «Мосты и тоннели»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
Действительный член РИА РФ и РАТ РФ  
**Поляков Владимир Юрьевич**

**Официальные оппоненты:** **Смирнов Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Мосты», профессор;

**Яшнов Андрей Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Мосты», заведующий кафедрой.


**Ведущая организация:** Акционерное общество «Институт Гипростроймост Санкт - Петербург»

Защита состоится 13 ноября 2019 г., в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 999.183.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского университета транспорта, [www.mii.ru](http://www.mii.ru)

Автореферат разослан «08» октября 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

 **Зайцев Андрей Александрович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Безбалластные пути популярны в Китае, а в Европе доминируют традиционные железные дороги с балластом. Однако, при строительстве железнодорожной линии Москва – Казань – Екатеринбург, конструкция безбалластного мостового полотна на сборных железобетонных плитах принята вместо традиционного балластного пути. При этом в России отсутствует опыт строительства и эксплуатации специализированных ВСМ. Плиты являются эффективными и перспективными с точки зрения эксплуатационной надежности и долговечности верхнего строения пути. Согласно специальным техническим условиям проектирования ВСМ на мостах конструкция верхнего строения пути по всей длине сооружения должна быть одинаковой и такой же, как и на подходах к нему. Однако, существует разница в условиях функционирования верхнего строения на мостах, на земляном полотне и по жесткости пути на переходе к мосту и на мосту, которая влечет сложное динамическое поведение конструкции верхнего строения пути, особенно поведение самого мостового полотна.

### **Степень разработанности темы.**

Высокоскоростные железнодорожные пути уже давно построены в ряде стран мира, таких как Япония, Франция, Китай, но в России и во Вьетнаме исследования в этой области еще недостаточны, особенно в области мостового полотна с бетонными плитами. Однако были проведены некоторые исследования в этой области, можно упомянуть следующих исследователей: М.Ф. Вериги, И.И. Иванченко, А.Я. Коган, В.В. Кондратов, В.М. Круглов, Е.Н. Курбацкий, Ю.В. Новак, В.Ю. Поляков, А.А. Савин, В.Н. Смирнов, А.М. Уздин, и др. За рубежом аналогичными исследованиями занимались следующие ученые: Rui Calçada, L.Fryba, Andre Paixao, M. Podwórna, Y. B. Yang, J. D. Yau, Xiaoyan Lei, W.Zhai и другие.

**Цель настоящей работы** – оптимизация динамического взаимодействия подвижного состава, мостового полотна и балочных пролетных строений для обеспечения работоспособного состояния мостового полотна, снижения усилий в нем и безопасного движения по мостам ВСМ.

Работоспособность в данной работе понимается как способность конструкции выполнять требуемые функции (ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения), а также соответствовать нормам.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Развить цифровую модель взаимодействия системы «мост-путь-поезд» для исследования динамики плит безбалластного полотна и оценить достоверность результатов моделирования сравнением с известными результатами.

2. Определить зависимость напряженно-деформированного состояния мостового полотна с плитами и его динамического поведения от конструктивных параметров мостового полотна на ВСМ.

3. Определить условия, обеспечивающие устойчивость движения колеса без отрыва от рельса при вариациях параметров мостового полотна и скорости поезда для безопасного движения по мостам ВСМ.

4. Исследовать ударное взаимодействие колеса и рельса на мостах для недопущения излома рельса.

**Объектом исследования** являются безбалластное мостовое полотно балочных пролётных строений мостов, расположенных на высокоскоростных железнодорожных магистралях в условиях движения поездов со скоростями до 400 км/ч.

**Предметом исследования** является динамическое взаимодействие подвижного состава ВСМ, мостового полотна и балочных пролетных строений

**Методы исследования:** из-за отсутствия в России и Вьетнаме реализованных высокоскоростных линий применялось математическое моделирование, численные эксперименты на цифровой модели поведения динамической системы «мост-путь-поезд»

**Научная новизна** исследования состоит в:

- Постановке проблемы взаимодействия безбалластного мостового полотна с плитами и высокоскоростного поезда, отличающейся выраженным динамическим поведением подрельсового основания в виде балочных пролетных строений мостов

- Развитии математической модели системы «мост-путь-поезд» для плитного безбалластного мостового полотна, отличающейся наличием подрельсовых плит с самостоятельным динамическим поведением, описываемом специальными уравнениями колебаний

- Выявлении взаимосвязи динамики элементов системы «мост-путь-поезд» при плитном безбалластном мостовом полотне с динамическими параметрами мостового полотна и некоторыми конструктивными решениями

- Определении зависимости влияния демпфирования и жесткости промежуточных рельсовых креплений на контактные усилия между рельсом и плитой, плитой и балкой пролетного строения, а также на усилия в контакте колеса и рельса.

**Теоретическая и практическая значимость** полученных результатов.

Обоснована применимость цифровой модели взаимодействия в системе «мост-путь-поезд» для оценки динамического поведения мостового полотна и безопасности движения. Разработаны новые технические решения мостового полотна в части упруго-динамических параметров пути. Практическая значимость заключается в определении параметров мостового полотна (жесткости и демпфировании) которые обеспечивают безопасность движения по устойчивости колеса на рельсе и выявлении параметров колебаний пролетных строений, отрицательно влияющих на работоспособность мостового полотна.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, изложенные в диссертационной работе, выполнены лично автором в процессе научной деятельности и научно-исследовательских работ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Цифровая модель взаимодействия в системе «мост-путь-поезд» для исследования динамики плит безбалластного полотна и оценка достоверности результатов моделирования.

2. Зависимость напряженно-деформированного состояния мостового полотна с плитами и его динамического поведения от конструктивных параметров мостового полотна на ВСМ.

3. Условия, обеспечивающие устойчивость движения колеса без отрыва от рельса при вариациях параметров мостового полотна для безопасного движения по мостам ВСМ.

**Достоверность и обоснованность.** При решении задач используются численные методы в форме общепризнанной аппроксимации дифференциальных уравнений конечно-разностными схемами.

Достоверность исследования подтверждается хорошим совпадением результатов моделирования контрольных задач с ранее опубликованными зарубежными исследованиями для традиционного пути на балласте.

**Апробация работы:** Основные результаты работы доложены и одобрены на следующих конференциях:

1. XIV международная научно-практическая конференция "Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути". Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. 5 - 6 апреля Москва 2017

2. Всероссийской научной конференции "Транспорт России XXI века". г. Москва 9 - 12 октября 2018

3. Международной научно-технической конференции «Современные задачи обеспечения, проектирования, строительства и эксплуатационной надёжности транспортных сооружений», г. Москва, 24-26 апреля 2019

**Публикации:** по материалам исследования опубликовано 4 работы, из которых 3 - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа содержит 98 рисунков, 26 таблицы и список литературы из 84 наименований, в том числе -39 на иностранных языках.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности темы исследования, степень её разработанности, а также теоретическую, практическую значимость и научную новизну. Сформулированы цель и задачи исследования

**В первой главе** представлено развитие высокоскоростных железных дорог, рассмотрены основные конструкции пути на мостах и на подходах на ВСМ. Описаны типы конструкций безбалластного мостового полотна, используемые для высокоскоростных железных дорог в разных странах, приведены преимущества и недостатки каждого типа конструкции. в то же время указаны проблемы переходных участков на подходах к мостам и проведены технические решения по конструкции в этой области, которые будут применяться в некоторых странах в мире при строительстве высокоскоростных железнодорожных путей.

Изложены основные положения и требования норм к устройству пути на мостах и подходах ВСМ некоторых стран в мире, например в России, Европе, Японии. Большинство конструкций мостового полотна предполагают односторонний характер связи подрельсовых плит с основанием (пролетным строением), что требует нелинейной постановки задачи о колебаниях.

Показаны причины железнодорожных происшествий на ВСМ, приведены требования норм различных стран для высокоскоростных магистралей: предельные значения упругих прогибов, смещений и углов поворота по критерию комфорта определены в Японии, в Китае и в Европе. Требования обеспечения комфортности

пассажирам, для обеспечения комфорта пассажиров ограничены вертикальными ускорениями колебания кузова экипажа.

Приводится исторический обзор развития методов расчёта задач взаимодействия системы «мост-путь-поезд».

**В второй главе** приводится моделирование колебаний при безбалластной конструкции мостового полотна.

Разрабатывается цифровая модель со плитами безбалластного пути на упруго-вязком основании с самостоятельным динамическим поведением для моделирования динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения по безбалластному мостовому полотну.

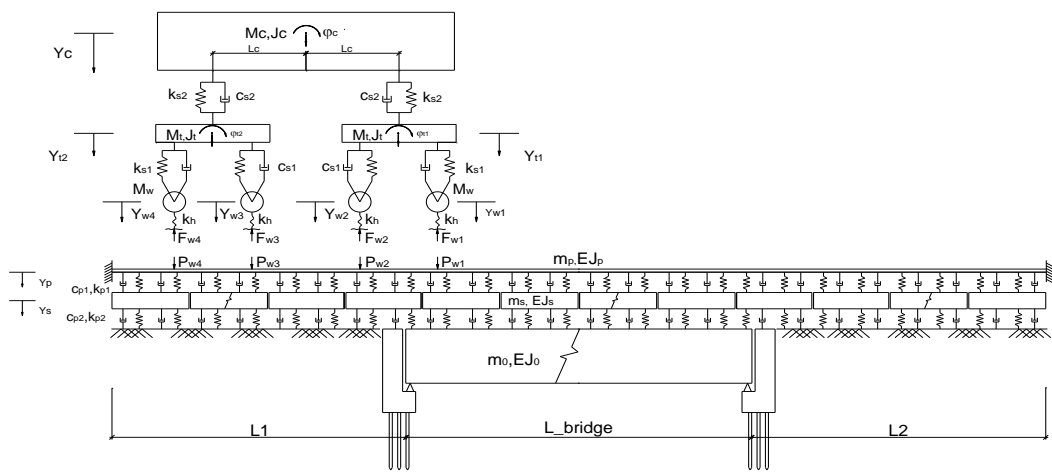


Рисунок 1 – Модель «мост – путь – поезд» для безбалластного пути на плитах

Изложены современные методы для решения динамических задач. Указаны преимущества и недостатки рассмотренных методов при применении. Выбран наиболее подходящий метод для решения задач, упомянутых в диссертации, и показаны условия устойчивости и сходимость результатов.

Приведены дифференциальные уравнения колебаний для экипажа, для рельса и для пролетного строения. Разработана математическая модель колебаний плит на пролетных строениях.

- Дифференциальные уравнения плиты на переходной зоне

$$E_s J_s \frac{\partial^4 y_s(x,t)}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 y_s(x,t)}{\partial t^2} + c_{p2} \frac{\partial y_s}{\partial t} + k_{p2} y_s = c_{p1} \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) + k_{p1} (y_p - y_s) \quad (1)$$

- Дифференциальные уравнения плиты на мосту

$$E_s J_s \frac{\partial^4 y_s(x,t)}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 y_s(x,t)}{\partial t^2} + c_{p2} \left( \frac{\partial y_s}{\partial t} - \frac{\partial y_k}{\partial t} \right) + k_{p2} (y_s - y_k) = c_{p1} \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) + k_{p1} (y_p - y_s) \quad (2)$$

Плиты считаются свободно опертыми на обоих концах стержнями, поэтому граничные условия для плиты:

$$\begin{cases} M_S(t,x=0) = 0 \\ Q_S(t,x=0) = 0 \\ M_S(t,x=L_S) = 0 \\ Q_S(t,x=L_S) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 y_S(t,x=0)}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 y_S(t,x=0)}{\partial x^3} = 0 \\ \frac{\partial^2 y_S(t,x=L_S)}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 y_S(t,x=L_S)}{\partial x^3} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия (при  $t=0$ ) для плиты

$$\begin{cases} y_S(t=0,x) = 0 \\ \frac{\partial^2 y_S(t=0,x)}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 y_S(t=0,x)}{\partial x^3} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Изложены применимые допущения для расчета контактных усилий между колесом и рельсом. Выбрана теория Герца для описания контакта между рельсами и колесами, усилия взаимодействия колеса с рельсом определены как:

$$F_{wm}^j = k_h * (y_{wm}^j(x, t) - y_{pwm}^j(x, t)) \quad (5)$$

где  $k_h$ - коэффициент жесткости на контакте рельса и колес.

$y_{wm}^j(x, t)$  - вертикальное смещение  $m$ -ого колеса в момент времени 'j',

$y_{pwm}^j(x, t)$  вертикальное смещение рельса в положении  $m$ -ого колеса в момент времени 'j'.

Выбрана конечно–разностная аппроксимация уравнений колебаний по явной схеме метода центральных разностей. Эта схема позволяет избежать решения систем нелинейных уравнений на каждом шаге по времени. При этом из-за небольшого шага по времени для обеспечения устойчивости вычислений можно учитывать высокочастотные колебания подсистемы «колесо-рельс».

Сопоставлены полученные результаты численного моделирования по разработанной модели с известными решениями частной задачи позволило установить высокую степень достоверности результатов с помощью разработанной методики. Важно не только количественное совпадение результатов, но и совпадение характера колебаний рельса, что подтверждает достоверность выводов о взаимодействии колеса и рельса. Достоверность также подтверждается устойчивостью метода и затуханием колебаний, вызванных граничными условиями.



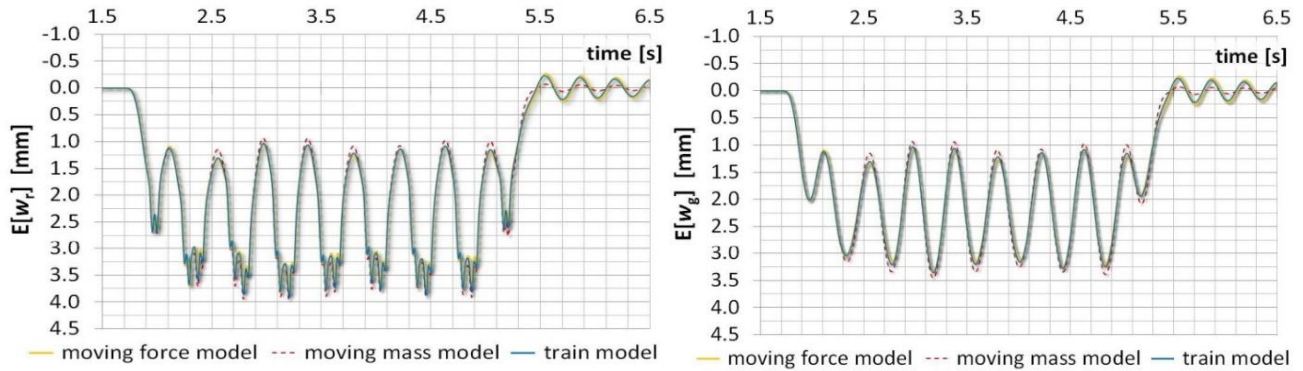


Рисунок 2 – Колебания балки  $E[w_g]$  и рельса  $E[w_r]$  в середине пролетного строения по контрольной задаче

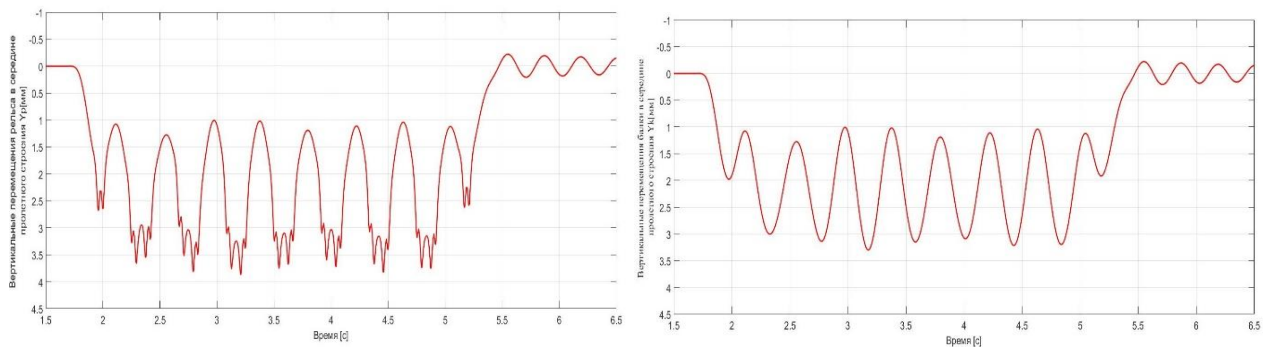


Рисунок 3 – Колебания балки  $E[w_g]$  и рельса  $E[w_r]$  в середине пролетного строения по разработанному методу

Оценивается влияние граничных условия на результаты моделирования. Это влияние заметно на протяжении 30-35м расчетного участка, а затем влияние не наблюдается. Таким образом необходимо рассмотрение подходов к мосту такой длины, при которой влияние граничных условий отсутствует на мосту (на рисунке 4).

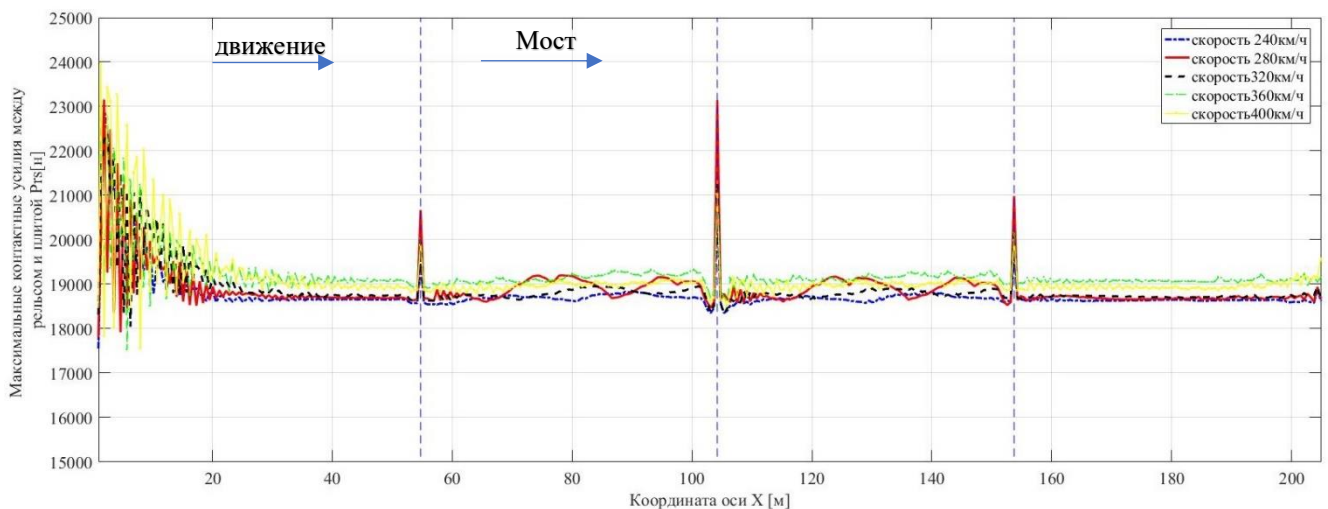


Рисунок 4 – Влияние граничных условий ограничено по длине для разных скоростей.

**В третьей главе** приводятся результаты исследования динамики мостового полотна при высокоскоростном движении.

Одним из важных параметров, сильно влияющих на динамическое поведение пути, является скорость движения поезда. При высоких скоростях движения поезда, частота силового воздействия поезда может совпадать с частотами собственных колебаний, что может привести к возникновению резонансных колебаний конструкций. Такая скорость в данной работе называется критической. Если скорость поезда увеличивается и приближается к критической скорости, возможны очень большие отклонения рельса при этом скорость может привести даже к сходу поезда, что представляет серьезную проблему для безопасности.

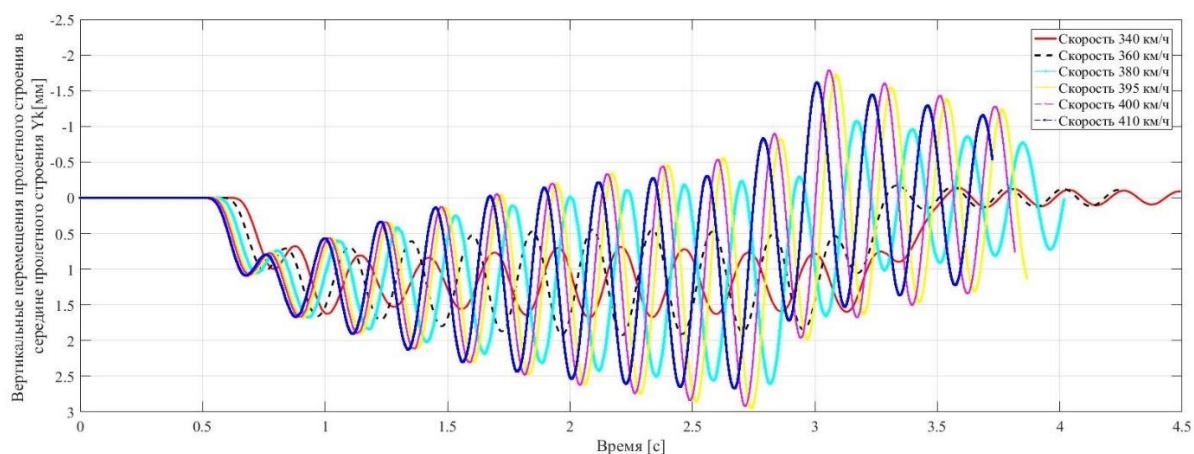


Рисунок 5 – График колебаний середины пролёта балочного железобетонного пролётного строения, при прохождении поезда «Сименс» с разными скоростями.

Из рисунка 5 изменения вертикальных перемещений в середине пролёта можно увидеть, что околорезонансные колебания пролётного строения проявляются при скоростях меньше расчетной по нормам для различной длины пролётных строений.

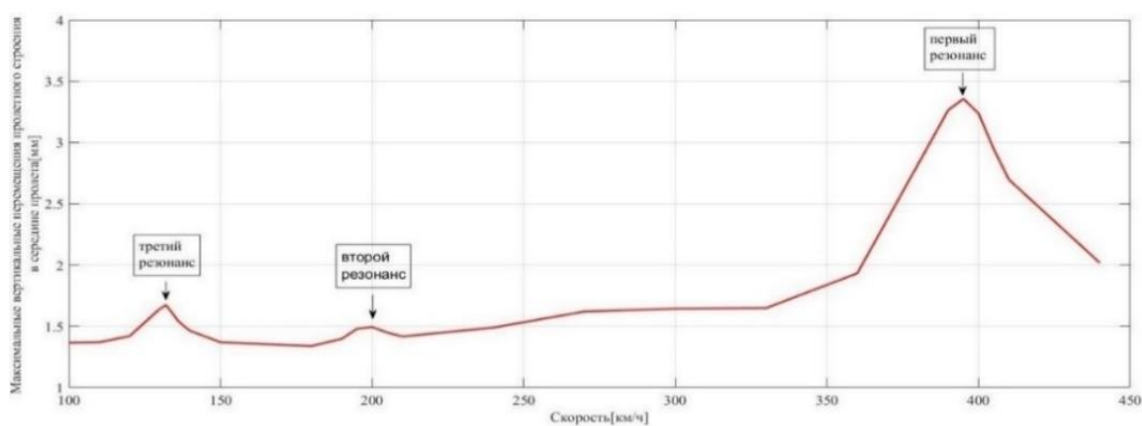


Рисунок 6 – Зависимость максимального перемещения пролётного строения в середине пролёта длиной 34,2 м от скорости поезда.

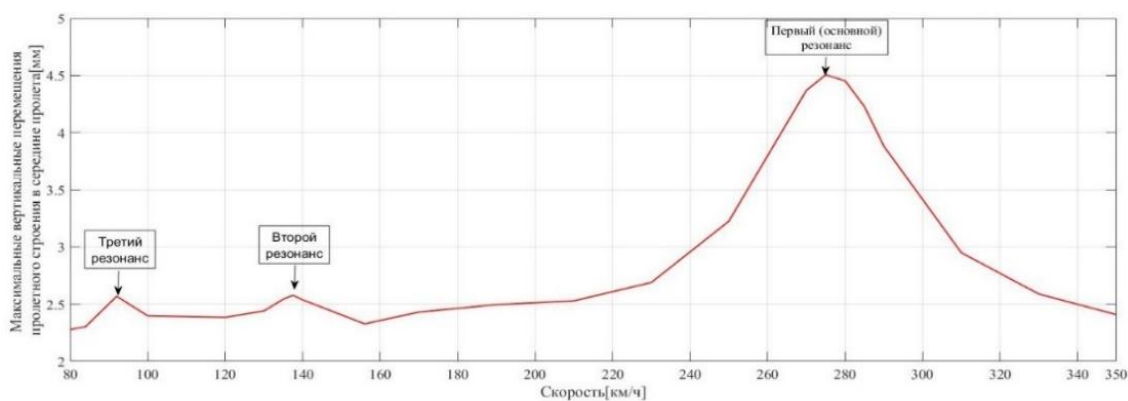


Рисунок 7 – Зависимость максимального перемещения пролетного строения в середине пролета длиной 50 м от скорости поезда.

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости перемещения пролетного строения в середине пролета длиной 34,2 м и длиной 50 м от скорости поезда, можно видеть, что перемещения пролётного строения резко изменяются в зоне пиков, соответствующих резонансным режимам колебаний пролётного строения. Когда первый резонанс возникает, то перемещение пролётного строения достигает максимального значения, и амплитуда колебаний является наибольшей. А для второго и третьего резонанса амплитуда изменения является незначительным. Поэтому первый резонанс называется основным, а второй и третий – кратные резонансы. Кратные резонансы удовлетворительно учитываются правилами для обычных скоростей. Отмечается хорошее совпадение критических скоростей по разработанному методу с аналитическими методами определения собственных частот и критических скоростей.

Рассмотрены зависимости усилия между рельсом и плитой, плитой и балкой с изменением жесткости прокладного слоя под плитой. Для оценки влияния жесткости прокладного слоя, рассмотрим три случая: первый случай – прокладка с минимальной жесткостью  $3,0 \cdot 10^8$  Н/м («мягкий слой»), второй случай – прокладка с максимальной жесткостью  $3,0 \cdot 10^9$  Н/м и третий случай - прокладки с очень большой жесткостью, равной и  $3,0 \cdot 10^{10}$  Н/м (практически отсутствие каких-либо прокладок, кроме слоя цемента). Кроме того, рассматривались разные конструкции соединения верхних и нижних плит безбалластного пути на мосту и подходах: модель с двухсторонними связями применялась в случае прикрепления верхней плиты к нижней (т.е. к балке, поскольку нижняя плита прикрепляется к балке с помощью выпусков арматуры). Модель с односторонними связями применялась в случае свободного опирания верхней плиты на нижнюю (фундаментную) плиту (т.е. балку).

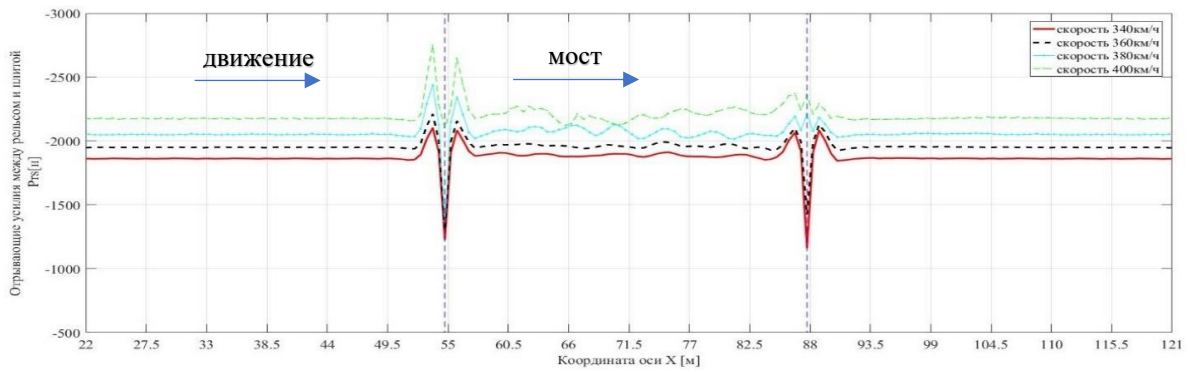


Рисунок 8 – Отрывающие усилия между плитой и рельсом при отсутствии прокладного слоя (односторонние связи) с длиной пролета 34,2 м

В стыке отрывающие усилия между плитой и рельсом (на рис.8) сильно изменяются. Заслуживают внимания усилия, которые могут оторвать дюбель в рельсовой плите или способствовать образованию трещин в месте расположения закладных болтов (анкеров).

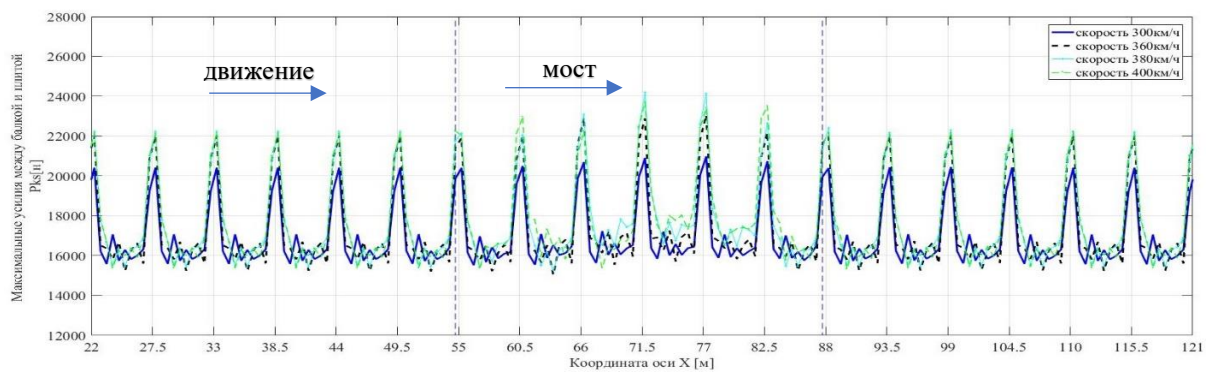


Рисунок 9 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жесткости прокладки под плитой  $3 \cdot 10^8$  Н/м (двусторонние связи) с длиной пролета 34,2 м

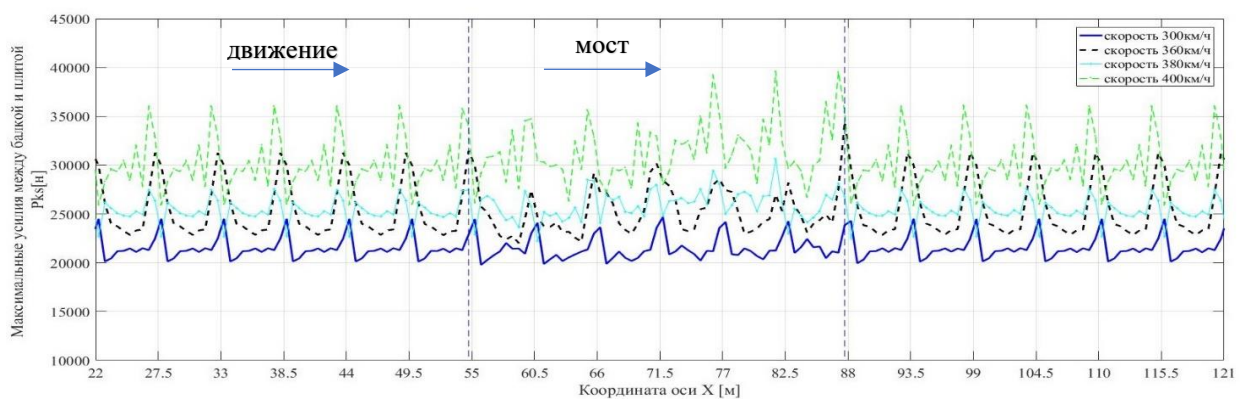


Рисунок 10 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жесткости прокладки под плитой  $3 \cdot 10^9$  Н/м. (двусторонние связи) с длиной пролета 34,2 м. Видно, что при околорезонансной скорости усилия значительно возрастают

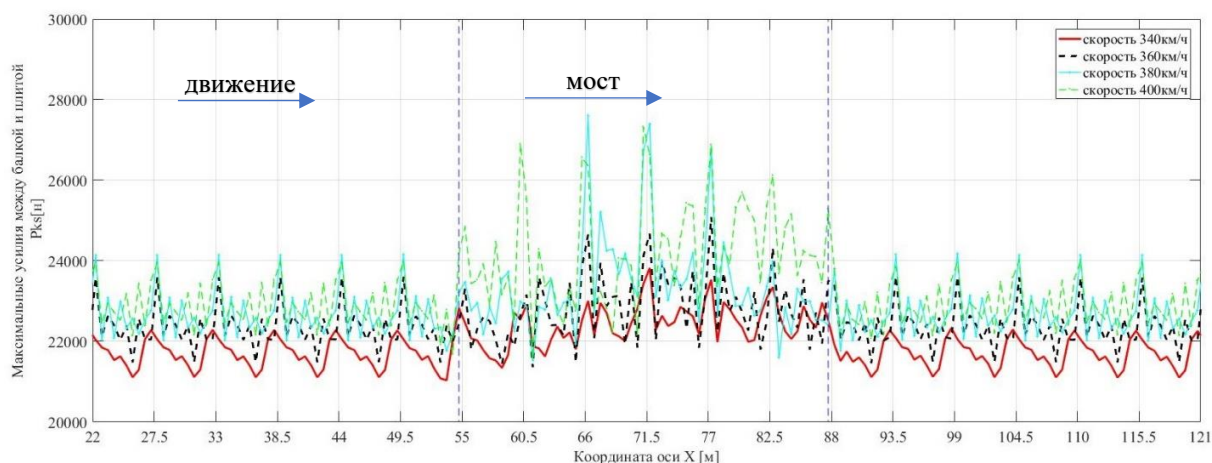


Рисунок 11 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (двусторонние связи) с длиной пролета 34,2м. Мягкий слой между плитой и основанием (рис. 9, 10) делает мост практически незаметным с точки зрения нагрузки на основание плиты. В случае жесткого опирания путевой плиты наблюдается заметный рост нагрузки на основание во всем диапазоне скоростей на 11-12% (рис 11).

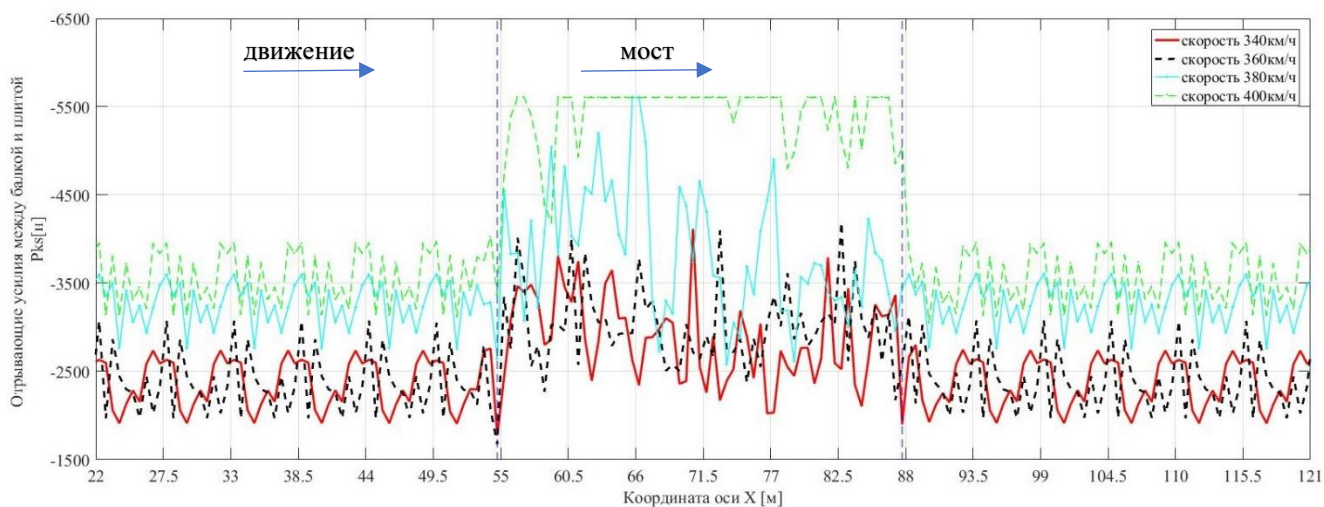


Рисунок 12 – Отрывающие усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (односторонние связи) с длиной пролета 34,2м. Видно, что при околорезонансной скорости усилия значительно возрастают

На рис.12 видно, для односторонних связей жесткость не имеет значения, т.к. предел таких усилий в этом случае – вес плиты. Отрывающие контактные усилия между плитой и балкой не превышает силы тяжести плиты. Кроме околорезонансной скорости 400 км/ч.

На рис. 13 видно, что на скорости 380 км/ч максимальные изгибающие моменты в балке формируются преимущественно первой формой собственных колебаний с максимумом момента в середине пролета.

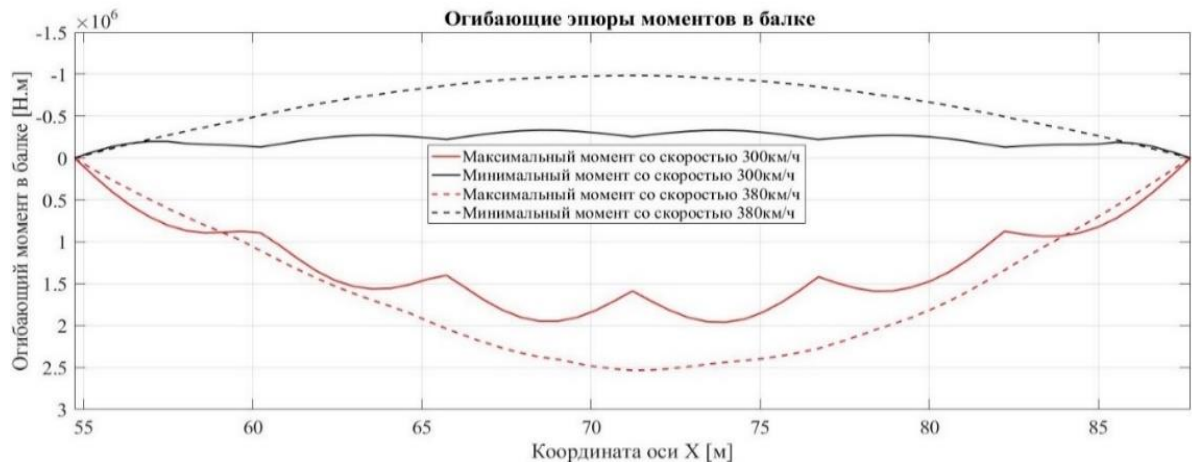


Рисунок 13 – Огибающие эпюры моментов в балке. При скорости 300 км/ч видно влияние старших собственных форм колебаний, которые вызывают значительные перегрузки плит.

При скорости 300 км/ч для определенных балок значительный вклад вносят другие собственные формы с более высокой частотой колебаний.

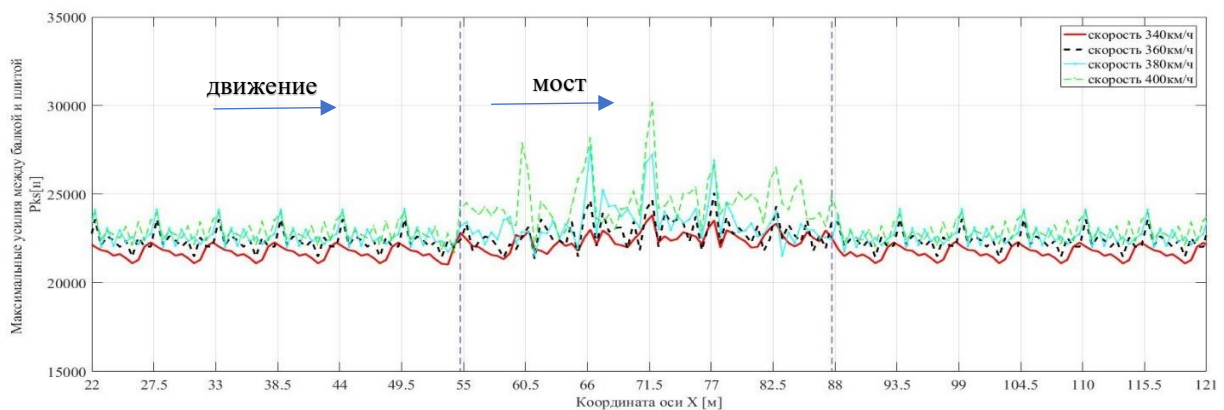


Рисунок 14 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (односторонние связи) с длиной пролета 34,2м. Видно, что при околорезонансной скорости усилия значительно возрастают

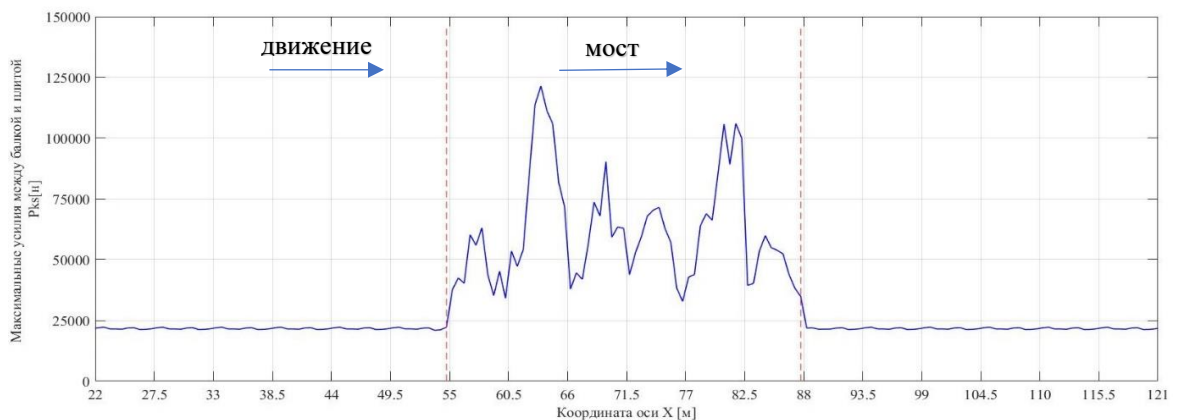


Рисунок 15 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя при скорости 300 км/ч (односторонние связи)

На рис.15 представлена огибающая эпюра усилий между плитой и балкой, где эти усилия превышают максимумы при других скоростях (рис. 14) в четыре раза

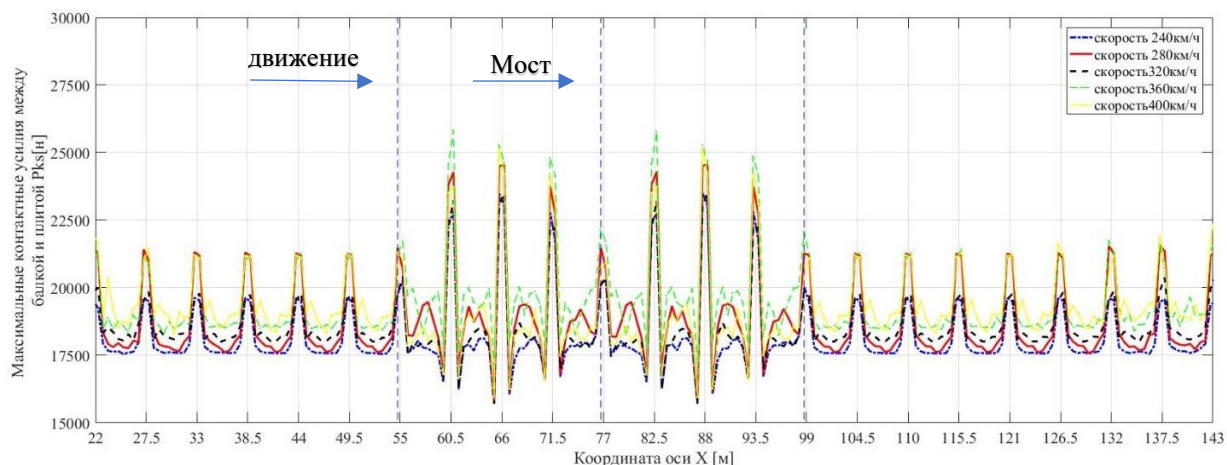


Рисунок 16 – Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (односторонние) с длиной пролета 23,6 м. Показано влияние граничных условий

На рис.16 видно, что граничные условия плиты имеют сильное влияние на значение контактных усилий между плитой и балкой. В граничном положении контактные усилия между плитой и балкой увеличиваются в 14% по сравнению с другим положением.

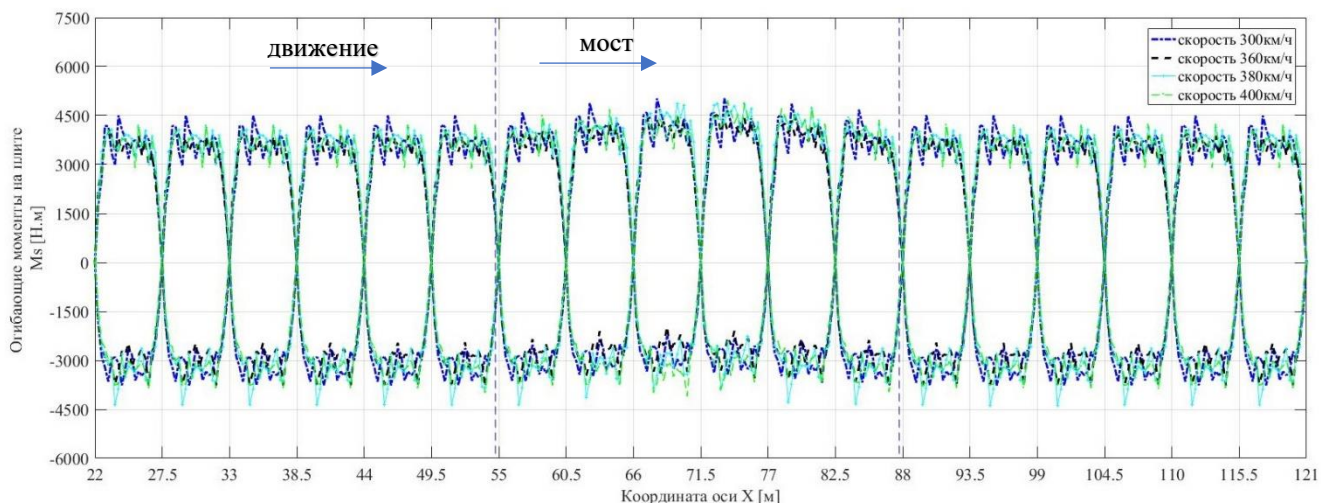


Рисунок 17 – Огибающие моменты на плите с коэффициентом жесткости прокладки под плитой  $3 \cdot 10^8$  Н/м (односторонние связи) с длиной пролета 34,2 м

На рис.17 видно, что характер связи плиты с основанием не оказывает заметного влияния на максимальные изгибающие моменты и поперечные силы в плитах безбалластного пути при минимальной жесткости прокладного слоя

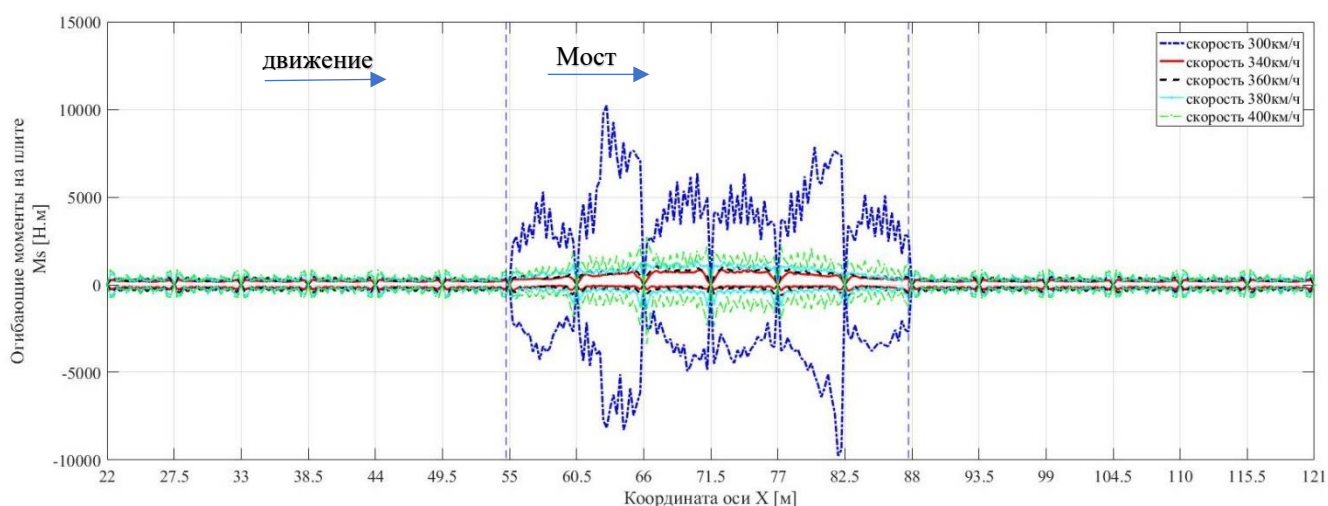


Рисунок 18 – Огибающие моменты плите при отсутствии прокладного слоя (Односторонние связи) с длиной пролета 34,2 м

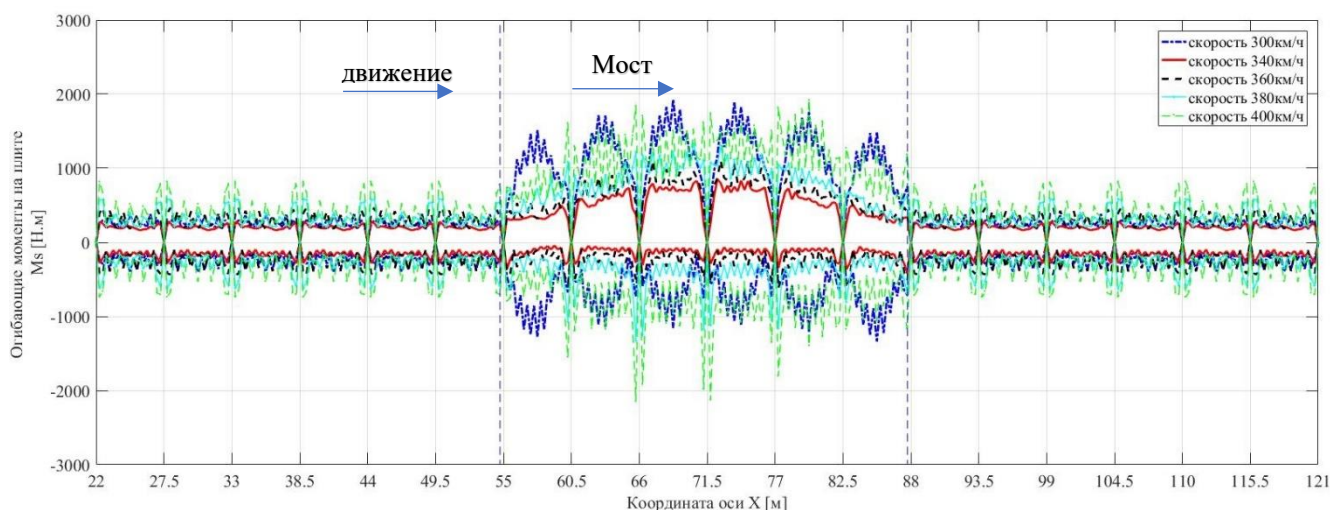


Рисунок 19 – Огибающие моменты плите при отсутствии прокладного слоя (двухсторонние связи) с длиной пролета 34,2 м

На скорости 300 км/ч, при которой в балке развиваются полигармонические колебания, в плитах пути без прокладного слоя (жесткость слоя  $30 \cdot 10^9$ ) изгибающие моменты (рис.18) возрастают примерно в 10 раз до 10 кНм. Применение двухсторонних связей между плитой и балкой значительно снижает эффект таких колебаний (рис.19), но изгибающие моменты примерно в 2 раза больше, чем на земляном полотне.

На рис.20 показаны огибающие эпюры изгибающих моментов в плитах мостового полотна 50м пролетных строений и на подходах. Видно, что изгибающие моменты от подвижной нагрузки в мостовом полотне и для этих пролетных строений значительно больше, чем на насыпи. Особенно выделяются моменты при движении с критической скоростью 280 км/ч, вызывающие резонанс этих пролетных строений.



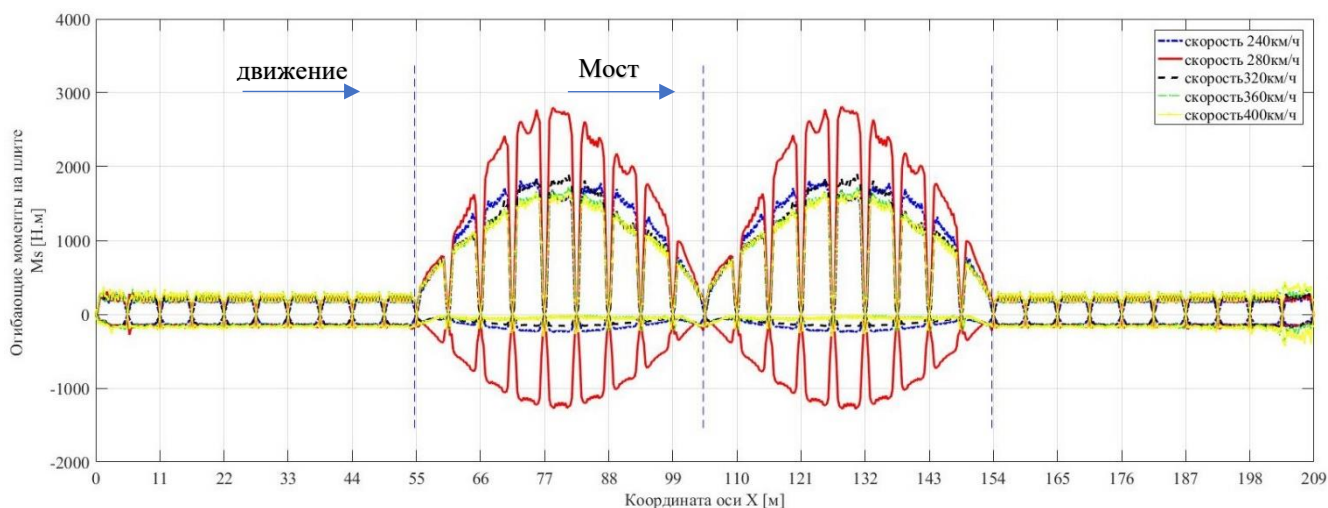


Рисунок 20 – Огибающие изгибающие моменты в рельсовых плитах мостового полотна (балка 50м)

В четвёртой главе выполнен анализ оценки устойчивости колеса на рельсе и безопасности движения по мостам ВСМ.

На безопасность и устойчивость движения колеса влияют многие параметры конструкции. Рассмотрим два параметра мостового полотна — жесткость подрельсового основания (верхнего строения пути) и демпфирование в нем.

На рис. 21– 23 показаны характерные диаграммы усилия в контакте «колесо — рельс» при проходе прототипа поезда для ВСМ из 20 вагонов в результате численных экспериментов на модели с разными демпфированием и разными жесткостями прокладного слоя под рельсом.

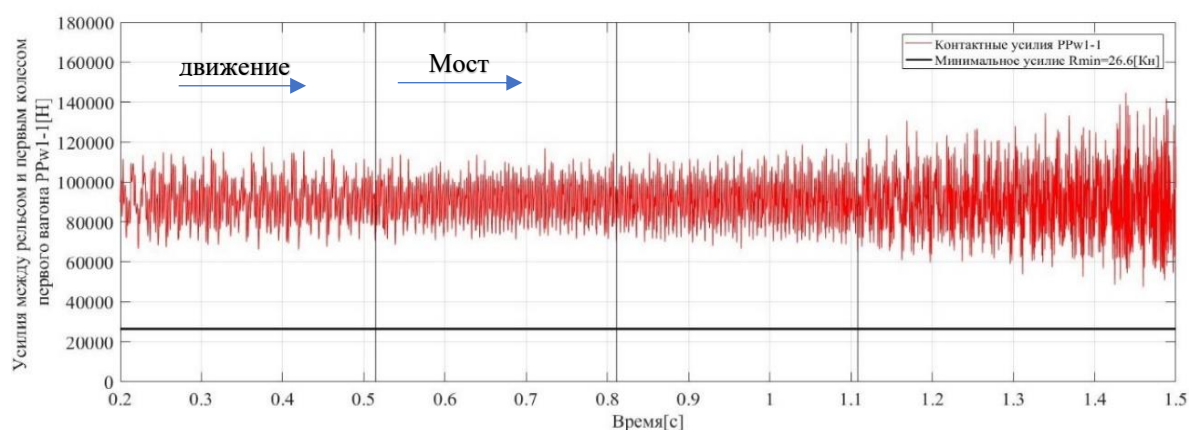


Рисунок 21 – Диаграмма усилия взаимодействия с рельсом первого колеса первого вагона  $K=60$  МН/м,  $C_c=500$  Н\*с/м<sup>2</sup>, до развития резонанса условие безопасности соблюдается всюду. Небольшое демпфирование не является проблемой

На рис.21 представлена диаграмма усилия взаимодействия с рельсом первого колеса первого вагона. Для этого колеса характерно движение по «невозмущенным»

пролетным строениям, деформации которых под одной тележкой сравнительно невелики, поэтому минимальное усилие в контакте  $R_{min}$  всюду удовлетворяет условию безопасности  $R_{min} > 26,6$  кН. За мостом амплитуды колебаний этого усилия нарастают из-за увеличения колебаний пролетных строений под другими вагонами в резонансном режиме, которые через рельс передаются на подходы.

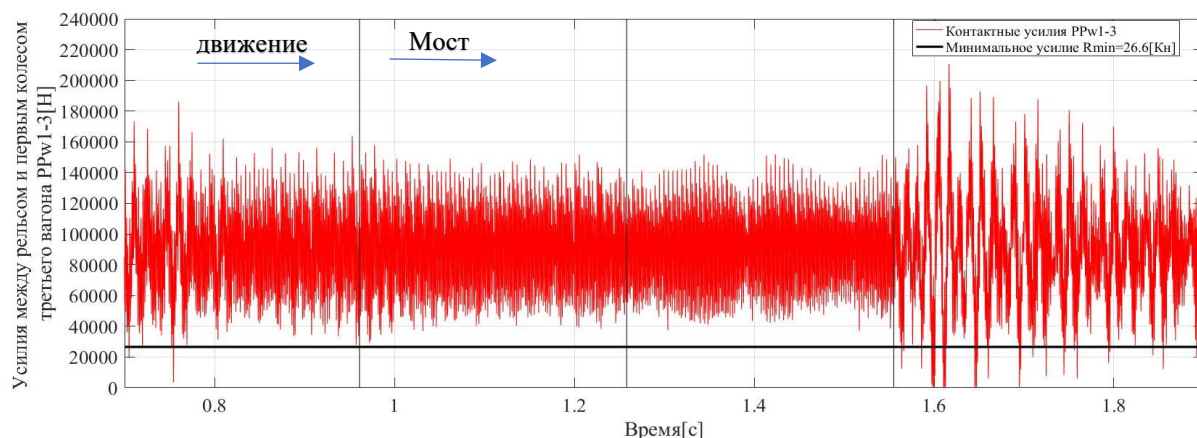


Рисунок 22 – Диаграмма усилия взаимодействия с рельсом первого колеса третьего вагона  $K = 60$  МН/м,  $C_c = 500$  Н\*с/м<sup>2</sup>

На рис.22 видно, нарастающие резонансные колебания пролетных строений приводят к тому, что уже под третьим вагоном усилие в контакте не только падает ниже допустимого предела — 26,6 кН, но и происходит отрыв колеса (усилие падает до 0). Заметен эффект более жесткого пути на участках примыкания насыпи к мосту.

Важность демпфирования в мостовом полотне при возросшей жесткости узла скрепления и слишком оптимистическая оценка безопасности при завышенном демпфировании отображены на рис. 23.

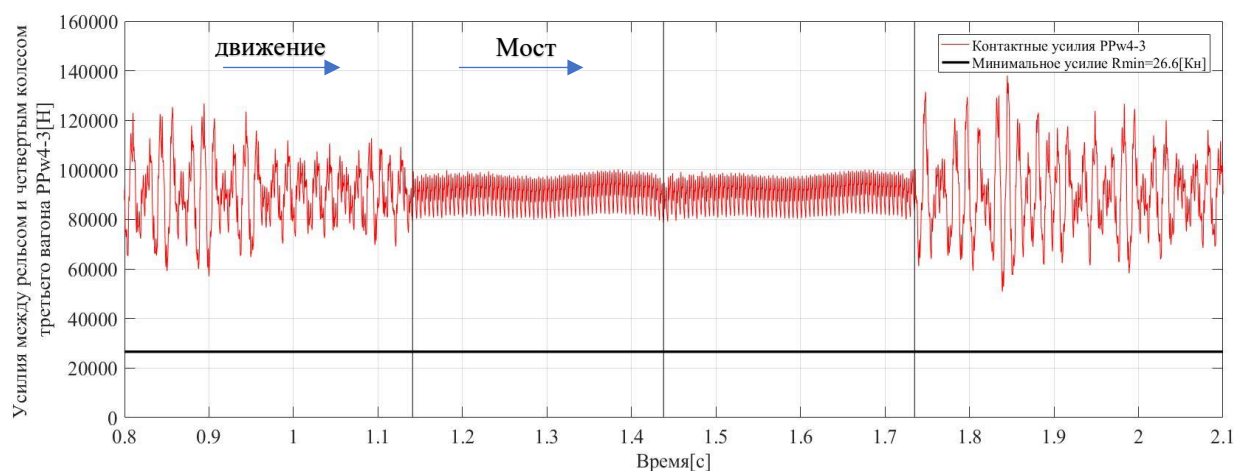


Рисунок 23 – Диаграмма усилия взаимодействия с рельсом четвертого колеса третьего вагона  $K = 80$  МН/м,  $C_c = 23$  кН\*с/м<sup>2</sup>

В диссертации представлена зависимость минимальных усилий взаимодействия колеса-рельса от демпфирования и жесткости прокладки под рельсом и определено значение минимально необходимого демпфирования для различной жесткости узла скрепления.

Рассмотрено ударное взаимодействие колеса и рельса. 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.

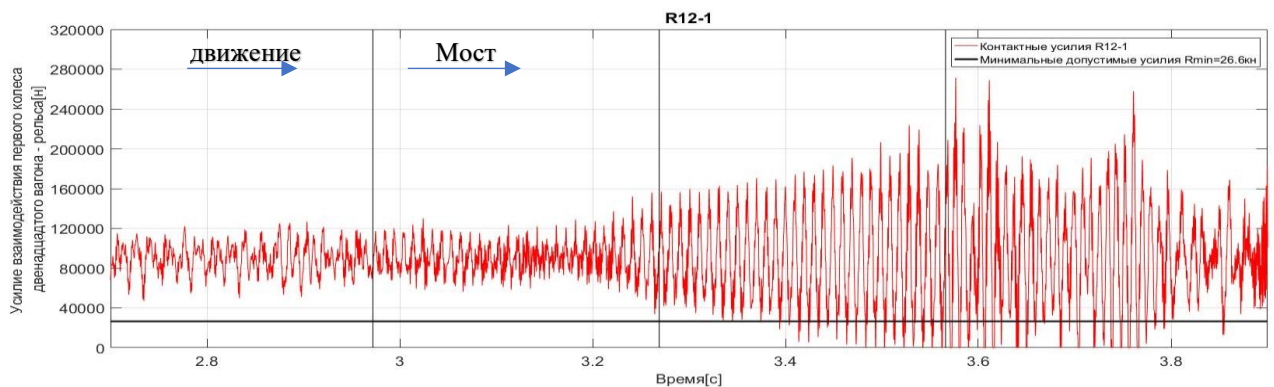


Рисунок 24 – Отрыв колеса 1 вагона №12 начинается еще на мосту

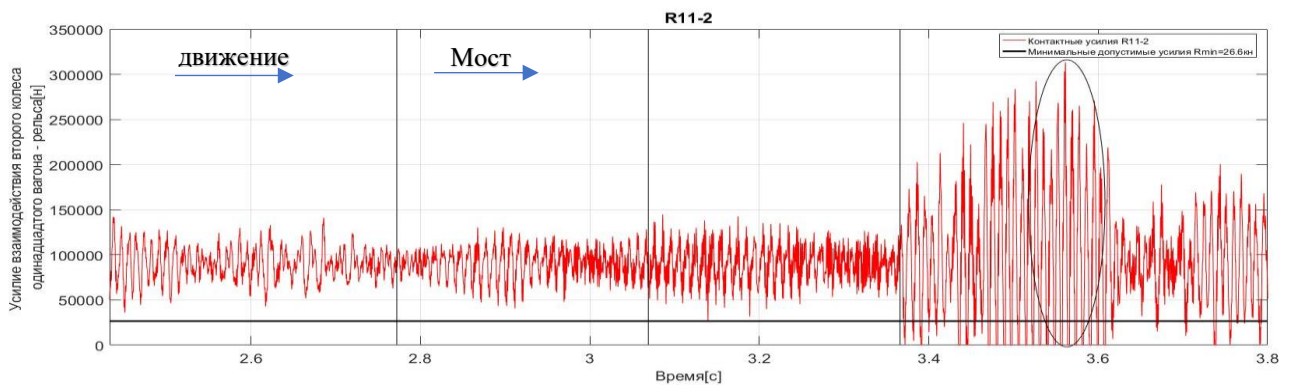


Рисунок 25 – Отрыв колеса 2 вагона №11

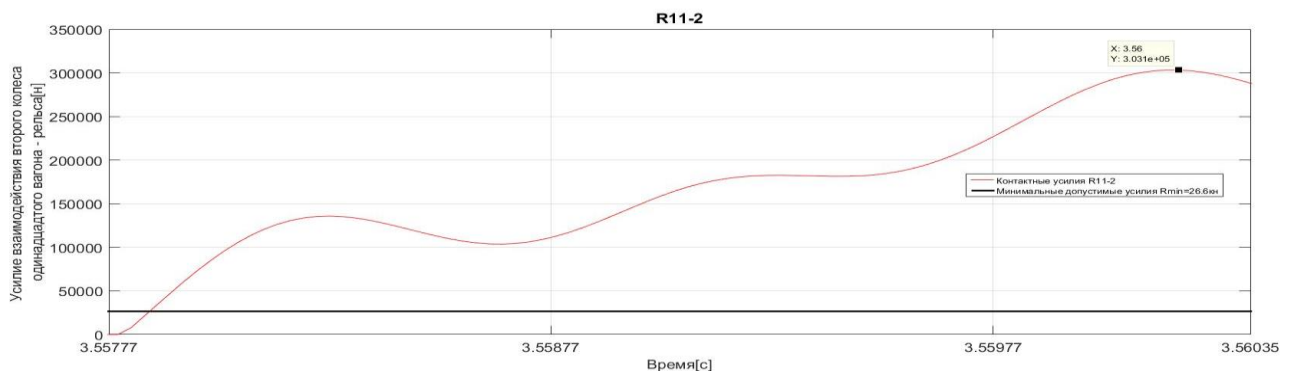


Рисунок 26 – Усилие в контакте колеса 2 вагона №11 возрастает от 0 до 303кН за 0,002с

Как видно из рис.24 воздействие колеса на рельс после отрыва возрастает от 0 до 270кН за 0,004с, 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. 25– 26): 0-303кН за 0,002с (рис.25), что в 3,5 раза больше статического значения.

Как видно, резонансные колебания пролетных строений приводят к ударному воздействию колеса на рельс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Работоспособность в данной работе понимается как обеспечение выполнения требований норм в отношении безопасности движения, равнопрочности и одинаковой стабильности мостового полотна и верхнего строения пути на подходах.

2. Модель взаимодействия в системе «мост-путь-поезд» дополнена плитами безбалластного пути на упруго-вязком основании с самостоятельным динамическим поведением для моделирования динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения по безбалластному мостовому полотну.

3. Для оценки динамики мостового полотна в условиях высокочастотных колебаний колеса и рельса, выбрана конечно–разностная аппроксимация уравнений колебаний по явной схеме метода центральных разностей. Эта схема позволяет избежать решения систем нелинейных уравнений на каждом шаге по времени. При этом из-за небольшого шага по времени для обеспечения устойчивости вычислений можно учитывать высокочастотные колебания подсистемы «колесо-рельс».

4. Граничные условия в виде запрета на вертикальные перемещения и угол поворота рельса в начале и в конце расчетного участка имеют ограниченное влияние на результаты моделирования. Это влияние заметно на протяжении 30-35м расчетного участка, а затем влияние не наблюдается. Таким образом необходимо рассмотрение подходов к мосту такой длины, при которой влияние граничных условий отсутствует на мосту.

5. Резонанс балочных пролетных строений возникает, когда поезд движется с критической скоростью. Критическая скорость зависит от собственной частоты

колебаний балки и длины вагона. Критические скорости на ВСМ с резонансными режимами колебаний пролетных строений могут быть меньше расчетных скоростей.

6. При скоростях меньше критических возможно развитие полигармонических колебаний в балочных пролетных строениях. Такие колебания приводят к многократному росту внутренних усилий в плитах мостового полотна.

7. Внутренние усилия в плитах мостового безбалластного полотна в отсутствие прокладного слоя при полигармонических колебаниях балки в несколько раз превышают усилия при других скоростях. При этом прикрепление плит к балке двусторонними связями или применение упругого прокладного слоя между верхней и нижней плитой серьезно снижает уровень усилий при полигармонических колебаниях. Упругий слой в виде матов между плитами безбалластного пути делает мост практически незаметным с точки зрения нагрузки на основание подрельсовой плиты.

8. Напряженно-деформированное состояние плит верхнего строения пути, его динамическое поведение на мостах и земляном полотне сильно отличаются. Поэтому конструкцию мостового полотна рекомендуется принимать отличной от верхнего строения пути на насыпи. Может быть рекомендовано применение упругих матов в мостовом полотне между верхней и нижней плитой. Могут быть рекомендованы двусторонние связи между плитами пути и балкой, которые значительно уменьшают усилия в рельсовых плитах при отсутствии прокладного слоя между рельсовой и нижней плитами, однако изгибающие моменты от динамической нагрузки в плитах мостового полотна остаются в два раза больше, чем на насыпи подхода к мосту.

9. Анализ динамического поведения верхнего строения пути на мосту и подходах не дает оснований для выделения особенностей переходных участков с насыпи на мост при безбалластном плитном пути. При этом упругие деформации и отсутствие осадок земляного полотна в зоне мостов очень важны, что обеспечивается маленькими допусками на осадку пути.

10. Отрывающие усилия в промежуточных рельсовых скреплениях в мостовом полотне от динамической нагрузки значительно (до 2 раз) больше, чем на земляном полотне, что приведет к снижению срока службы мостового полотна и повышению расходов на его ремонт. Это подтверждает вывод о необходимости специальной конструкции мостового полотна, отличающейся от верхнего строения пути на насыпи.

11. Для оценки условия безопасности поездов в каждой стране применяются разные критерии оценки, и коэффициенты схода ( $P/Q$ ) ограничиваются разными значениями. Однако ни в какой стране не допускается падение усилия колесо-рельс до 0.

12. На мостах ВСМ Москва—Казань отсутствуют многие элементы пути, являющиеся сильными демпферами — земляное полотно, его основание и балласт. Из-за недостатка демпфирующих элементов большое значение приобретают демпфирующие свойства мостового полотна. При движении по мосту с критическими скоростями, вызывающими околорезонансные колебания, возможно падение усилия в контакте «колесо—рельс» до нуля с риском схода. Недостаточное демпфирование представляет угрозу безопасности движения. Отсутствие норм демпфирования в верхнем строении пути требует разработки требований к демпфированию в мостовом полотне. Выявлено, что разработанные требования к демпфированию зависят от вертикальной жесткости узла скрепления, причем с ростом жесткости узла скрепления на 50% демпфирование в нем должно увеличиться более чем в 30 раз.

13. 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.

14. Исследование взаимодействия подвижного состава ВСМ, мостового полотна и балочных пролетных строений на безбалластном основании следует продолжить для трехмерной модели. В будущем результаты диссертации могут найти практическое применение при строительстве первой скоростной железной дороги во Вьетнаме.

**Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:**

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Данг Нгок Тхань. Безбалластное мостовое полотно на ВСМ / В.Ю. Поляков, Данг Нгок Тхань // Мир транспорта. – 2018. – № 2. – С 36 – 55.
2. Данг Нгок Тхань. Безопасность движения и динамические свойства мостового полотна на ВСМ / В.Ю. Поляков, Данг Нгок Тхань // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 6. – С. 357 – 367.
3. Данг Нгок Тхань. Ударное взаимодействие колеса и рельса на мостах высокоскоростных магистралей / В.Ю. Поляков, Данг Нгок Тхань // Транспортные сооружения. – 2019. – №1. <https://ts.today/PDF/15SATS119.pdf>. DOI: 10.15862/15SATS119.

Публикации в других изданиях:

4. Данг Нгок Тхань. Взаимодействие подвижного состава и пути в зоне мостов на ВСМ / В.Ю. Поляков, Данг Нгок Тхань // В кн. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XIV Международная научно-техническая конференция: труды / РЖД, МИИТ. – М.: 2017, – С.143 – 153.

**ДАНГ НГОК ТХАНЬ**

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МОСТОВОГО ПОЛОТНА БАЛОЧНЫХ  
ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ**

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов  
и транспортных тоннелей

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019г. Заказ № \_\_\_\_\_ Формат 60x90/16

Объём 1,5 усл. п.л. Тираж 80 экз.

---

Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)