



Безбалластное мостовое полотно на ВСМ



Владимир ПОЛЯКОВ
Vladimir Yu. POLYAKOV

ДАНГ Нгок Тхань
DANG NGOK TKHAN



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

Данг Нгок Тхань — аспирант кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия / Намдинь, Вьетнам.

Ballastless Bridge Deck for HSR

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 47)

Статья посвящена изучению колебаний безбалластного мостового полотна, бетонных плит, поведения рельсовых скреплений, прокладного слоя под рельсовой плитой высокоскоростной железнодорожной магистрали. Цель исследования — добиться снижения усилий в бетонных плитах и рациональной жёсткости упругих элементов в конструкции несущей системы в зависимости от нагрузки, скоростей движения и особенностей модели «мост—путь—экипаж».

Ключевые слова: железная дорога, безбалластный путь, высокоскоростная магистраль, мостовое полотно, динамические исследования, моделирование, колесо, рельс, экипаж, балка, пролётное строение.

Безбалластное верхнее строение пути широко применяется на ВСМ, в Китае более 80 % высокоскоростных железных дорог — с бетонными плитами [1]. В отличие от традиционного балластного пути с бетонными плитами имеет многие преимущества, включая сохранение геометрических параметров в течение длительного времени и снижение затрат на обслуживание [1–3]. Однако в зоне мостов и других искусственных сооружений он работает в специфических условиях [4], вызванных значительно большими деформациями подрельсового основания из-за колебаний пролётных строений.

Большинство моделей, применяемых для изучения колебаний мостов, ориентировано на исследование динамического поведения поезда или пролётного строения, меньше внимания уделяется колебаниям мостового полотна, особенно плит на нём. В этой статье рассмотрены именно колебания плит мостового полотна, усилия в промежуточных рельсовых скреплениях, изгибающие моменты и поперечные усилия в плитах, а одновременно и влияние жёсткости прокладного слоя под рельсовой плитой, чтобы найти эффективный способ

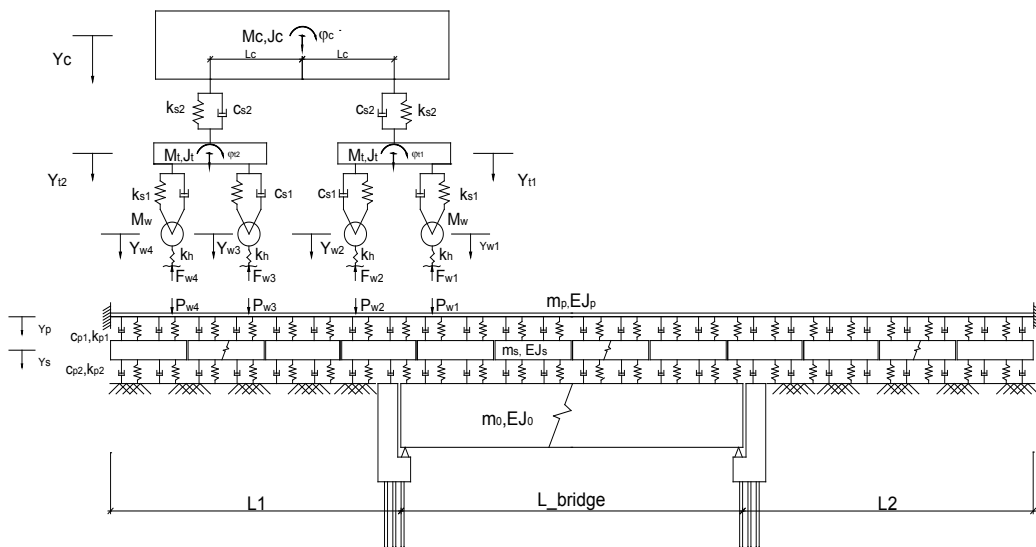


Рис. 1. Общая модель экипажа и моста.

снижения усилий в плитах и рациональное значение жёсткости упругих элементов.

1. МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ

1. Модель экипажа

Необходимость рассмотрения совместных колебаний вагонов, рельса, подрельсовых плит и пролётного строения (т.е. несущей системы [5]) требует разработки уточнённой модели. В ней экипаж и железнодорожный путь считаются симметричными относительно осевой линии. Рассмотрим только вертикальные колебания экипажа, движущегося по участку. При этом принимаем следующие допущения [6]:

1. Кузова, тележки и колеса не деформируемы.
2. Во внимание берутся колебания подпрыгивания и галопирования.
3. Сцепные приборы не препятствуют колебаниям.
4. Экипаж имеет двуступенчатое подвешивание.
5. Плиты безбалластного пути располагаются на пролётном строении или земляном полотне, не перекрывая стык моста и подхода.

Такие допущения соответствуют движению по однопутному пролётному строению или синфазному нагружению двух путей, что предусмотрено специаль-

ными техническими условиями проектирования ВСМ [7].

2. Дифференциальные уравнения

Уравнения колебаний экипажа [8]:

$$[M]\{\ddot{Y}(t)\} + [C]\{\dot{Y}(t)\} + [K]\{Y(t)\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ – матрицы массы, демпфирования и жёсткости экипажа соответственно; $\{Y(t)\}$ и $\{F(t)\}$ – вектор смещения экипажа и динамический вектор нагрузки.

Как показано на рис. 1, на рельс действуют движущиеся силы взаимодействия колеса и рельса, зависящие от времени $P_n(t)$, состоящие из статических P_{sta} и динамических усилий $F_{wn}(t)$.

$$P_n(t) = P_{sta} + F_{wn}(t). \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения колебаний рельса, вагонов и балочного пролётного строения, приведённые в [9], дополнены уравнениями колебаний плит безбалластного пути:

на подходе

$$E_s J_s \cdot \frac{\partial^4 y_s(x, t)}{\partial x^4} + m_s \cdot \frac{\partial^2 y_s(x, t)}{\partial t^2} + c_{p2} \cdot \frac{\partial y_s}{\partial t} + k_{p2} \cdot y_s = c_{p1} \cdot \left(\frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) + k_{p1} \cdot (y_p - y_s); \quad (3)$$

Таблица 1

Критическая скорость поезда ЭВС-2 для балки 33,1 м

$f_1, (1/c)$	$V_{кр}, км/ч$	Модель
4,60	410	Стержневая
4,28	382	Пространственная МКЭ

Таблица 2

Максимальные прогибы пролётного строения при разных скоростях

Скорость поезда (км/ч)	340	360	380	400	410
Прогиб пролётного строения (мм)	1,681	1,915	2,578	2,922	2,679

на мосту

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

2. КОНСТРУКЦИЯ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ

В этой безбалластной конструкции верхнего строения пути в зоне мостового перехода верхние плиты уложены на нижнюю плиту полотна, которая прикреплена к балке пролётного строения выпусками арматуры и присоединена к балке двусторонними связями.

Рассматривались разные конструкции соединения верхних и нижних плит безбалластного пути на мосту и подходах. Модель с двусторонними связями применялась в случае прикрепления верхней плиты к нижней (т.е. к балке, поскольку нижняя плита прикрепляется с помощью выпусков арматуры). Модель с односторонними связями использовалась в случае свободного опирания верхней плиты на нижнюю, фундаментную (т.е. балку). При связях между рельсом и плитой это соответствует усилиям в промежуточных скреплениях. При наличии усилий между плитой и балкой корректнее рассматривать напряжения, однако для удобства сопоставления результатов разных моделей анализируются положительные и отрицательные (отрывающие) усилия в связях, соответствующих модели на рис. 1.

Пролётное строение представляет собой разрезную балку с расчётным пролётом 33,1 м. Подвижной состав — ЭВС-2 (10 вагонов), длина вагона — 24,8 м.

3. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

3.1. Критическая скорость поезда для моста

Критическая скорость соответствует такой частоте возбуждения колебаний, при которой наблюдается резонанс. Собственная частота колебания пролётного строения может быть определена как [10]:

$$f_i = \sqrt{\frac{EJ_0}{m_0}} \cdot \frac{\pi \cdot i^2}{2L^2}, \text{ где } i = 1, 2, 3... \quad (5)$$

Резонанс пролётного строения возникает, если $f_i = f_{\text{возб}}$, где $f_{\text{возб}} = V/l_{\text{ваг}}$.

Согласно [11] критическая скорость поезда для моста $V_{кр} = f_1 \cdot l_{\text{ваг}}$.

Критические скорости поезда для моста представлены в таблице 1, из которой видно, что определение собственных частот балочного пролётного строения с помощью пространственной модели коробчатой балки и МКЭ отличается от стержневой модели балки на 7 %. Рассмотрены скорости движения от 300 км/ч до критической, вызывающей резонанс.

Максимальные вертикальные перемещения пролётного строения с расчётной длиной 33,1 м (стержневая модель) показаны в таблице 2. При 400 км/ч проявляются окolorезонансные колебания пролётного строения. Как видно, масса поезда и демпфирование в его подвеске вносят коррективы в собственные частоты колебаний системы и критическую скорость. Для этой модели скорость 400 км/ч оказывается ближе к резонансу.

3.2. Нагрузка на плиты и жёсткость прокладного слоя

На рис. 2–4 представлены огибающие диаграммы нагрузки на основание верхней плиты, т.е. максимальные усилия в связях модели за всё время прохождения 10-ва-

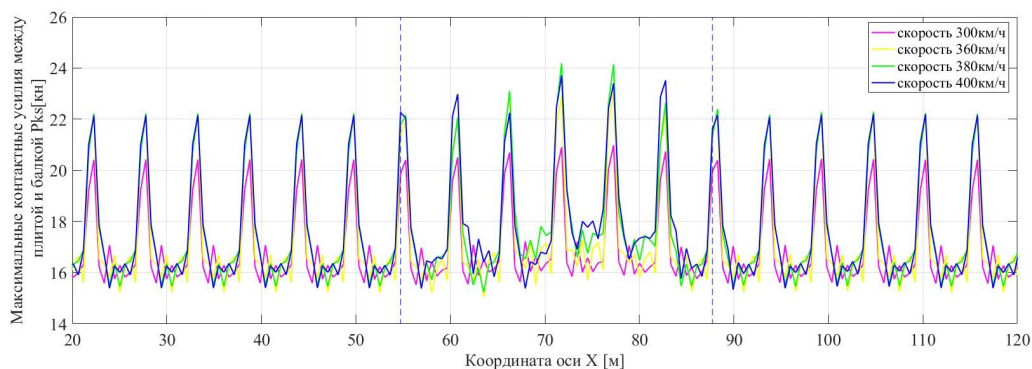


Рис. 2. Максимальные контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (двусторонние).

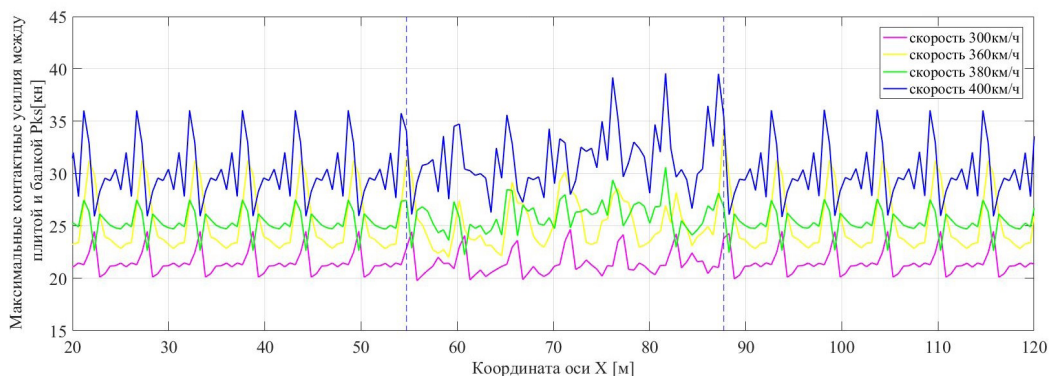


Рис. 3. Максимальные контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (двусторонние).

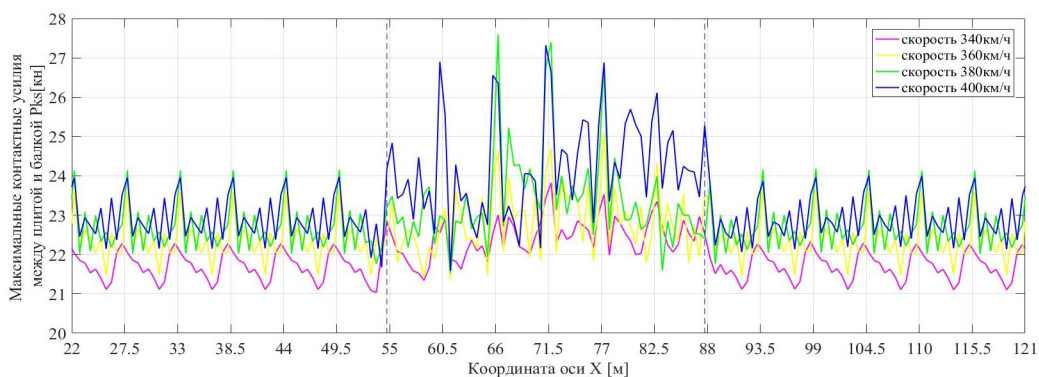


Рис. 4. Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладочного слоя (двусторонние).

гонного состава. Связи — двусторонние, диапазон жёсткости прокладочного слоя приведён в [12]. Из сопоставления диаграмм видно, что изменение жёсткости прокладочного слоя не ведёт к монотонному изменению нагрузки на основание плиты. При изменении жёсткости меняется сам характер взаимодействия, но во всех случаях заметны стыки плит. При минимальной жёсткости слоя наблюдается концентрация усилий в зоне стыков (рост усилий на 38 %), что является условием появления

риска. Наибольшая нагрузка отмечается при жёсткости связи $3 \cdot 10^9$ Н/м, которая в 1,5 раза больше, чем в отсутствие слоя.

Мягкий слой между плитой и основанием (рис. 2, 3) делает мост практически незаметным с точки зрения нагрузки на основание плиты. В случае жёсткого опирания путевой плиты наблюдается заметный рост нагрузки на основание во всём диапазоне скоростей (на 11–12 %). Необходимо отметить, что учёт одностороннего характера связей между плитой и её осно-



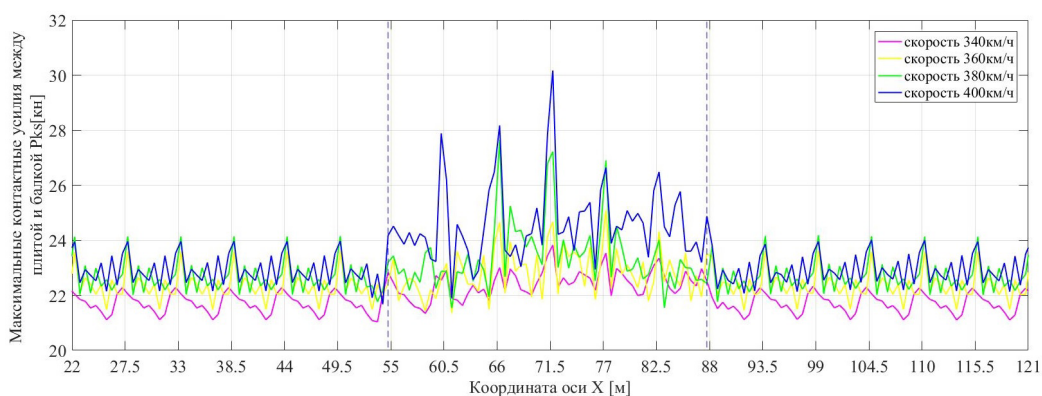


Рис. 5. Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (односторонние).

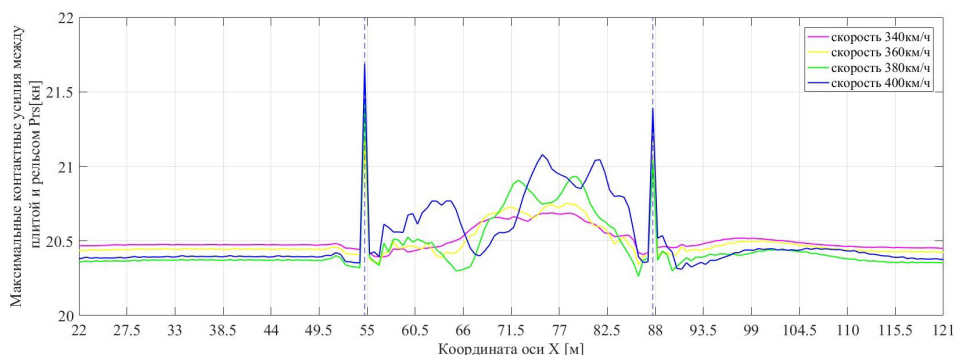


Рис. 6. Максимальные контактные усилия между плитой и рельсом при отсутствии прокладного слоя (односторонние).

ванием не вносит существенных изменений в рассматриваемый параметр, кроме случая жёсткого опирания: усилия на мосту и подходах отличаются на 25 % (рис. 5), а максимумы при разных связях отличаются на 11 % (рис. 4, 5).

Контактные усилия в промежуточном рельсовом скреплении (нагрузка от рельса на плиту) практически не зависят от характера связей между плитой и основанием и жёсткости контакта плиты с основанием, это воздействие остаётся сравнительно равномерным по длине зоны моста. Можно лишь отметить рост нагрузки на подрельсовое основание во второй половине пролётного строения из-за центробежного ускорения экипажа (рис. 6).

Заслуживают внимания усилия, которые могут оторвать дюбель в плите или способствовать образованию трещин в месте расположения закладных болтов (анкеров). Такое воздействие типично для промежуточных рельсовых скреплений, где связь рельса с плитой имеет всегда двусторонний характер. На рис. 7 показаны оги-

бающие максимумы отрывающих усилий в скреплениях по длине перехода для «мягкого» прокладного слоя и в его отсутствие (рис. 8). Эти два типа диаграмм характерны и для других вариантов конструкции: с разными типами связей и жёсткостями слоёв. Диаграммы слабо различаются по максимальным значениям в местах сопряжения балок с подходами.

Значительный интерес представляют «отрывающие» усилия между плитой и её основанием. Если связи здесь имеют двусторонний характер, то физическая природа этих усилий понятна. Если же связи односторонние, наличие такого усилия означает разгрузку связи, пока не преодолевается собственный вес плиты и рельса со скреплением. Для «мягкого» прокладного слоя (рис. 9) тип связи не имеет значения — односторонние связи не проявляются, ибо вес плиты не преодолевается. Для более жёсткого основания плиты диаграммы огибающих усилий значительно отличаются для различного характера связей (рис. 10, 11). Если на скорости 300 км/ч отрыв плиты от основания

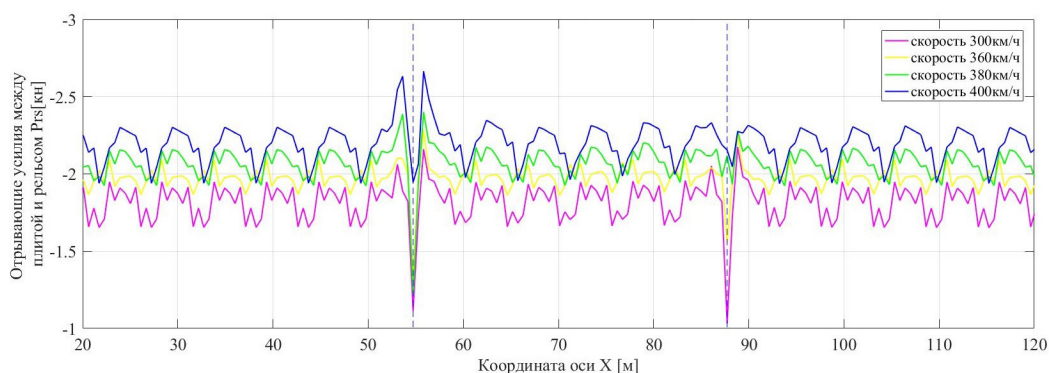


Рис. 7. Отрывающие усилия между плитой и рельсом с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^8$ Н/м (односторонние).

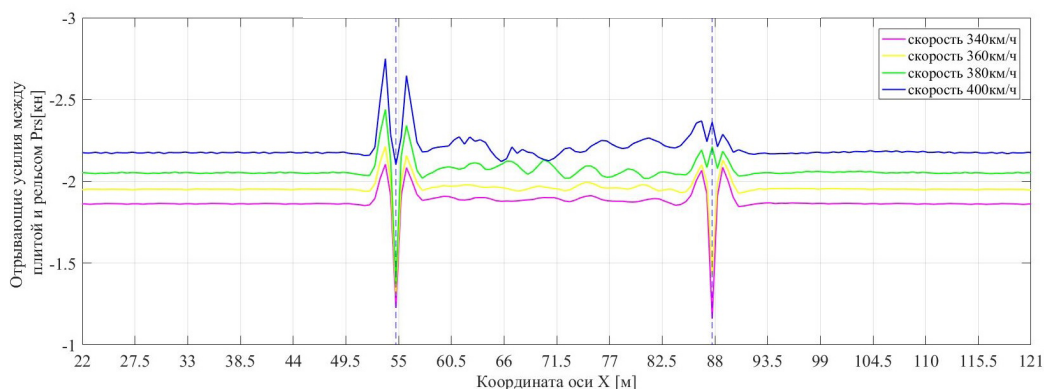


Рис. 8. Отрывающие усилия между плитой и рельсом при отсутствии прокладочного слоя (односторонние).

Таблица 3

Отрывающие относительные перемещения плиты и балки с жёсткостью слоя $3 \cdot 10^9$ Н/м (односторонние)

Скорость поезда (км/ч)	300	360	380	400
Перемещения плиты (мм)	-0,0040	-0,0138	-0,0218	-0,0407

Таблица 4

Отрывающие относительные перемещения плиты и балки при разных скоростях поезда с жёсткостью прокладки $3 \cdot 10^8$ Н/м (односторонние)

Скорость поезда (км/ч)	300	360	380	400
Перемещения плиты (мм)	-0,0126	-0,0128	-0,0154	-0,0193

происходит лишь в отдельных местах (рис. 10), то при более высоких скоростях — почти повсеместно, а на скорости 400 км/ч — повсюду, включая и подходы на земляном полотне. Величина отрыва ограничена рельсом, поэтому невелика (таблицы 3, 4) и, вероятно, не представляет угрозы. Обратим внимание, что на скорости 380 км/ч плиты на подходе не отрываю- тся, и эта скорость оказывается наиболее благоприятной для пути на земляном полоне.

При конструкции верхнего строения с двусторонними связями отрывающие уси-

лия оказываются сопоставимыми по абсолютному значению с максимальной нагрузкой (рис. 3 и 11). Такие особенности динамического поведения плит БВСП в зоне мостов ставят задачу применения усиленных плит.

Сравнивая диаграммы на рис. 9, 11, 13 для двусторонних связей, отметим, что жёсткость $3 \cdot 10^9$ Н/м оказывается наихудшей по отрывающим усилиям: максимум в два раза больше, чем при жёстком опирании плиты, и более чем в 3 раза — при «мягком». Для односторонних связей



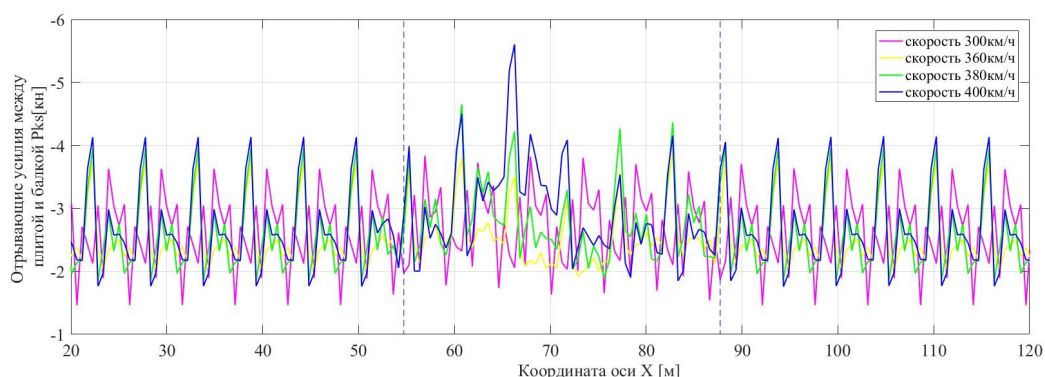


Рис. 9. Отражающие контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^8$ Н/м (односторонние и двусторонние).

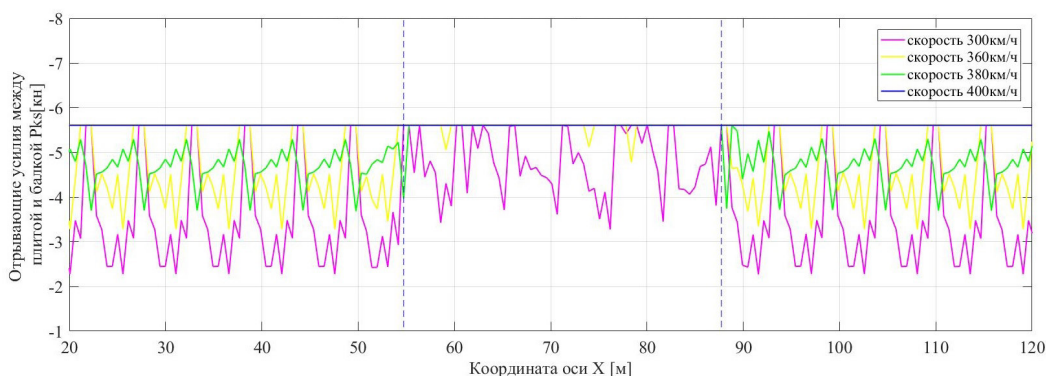


Рис. 10. Отражающие контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (односторонние).

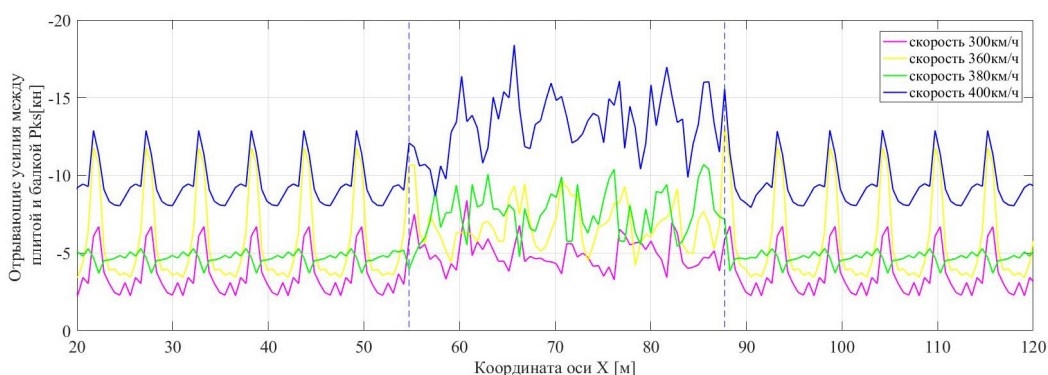


Рис. 11. Отражающие контактные усилия между плитой и балкой с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (двусторонние).

жёсткость не имеет значения, ибо предел таких усилий в этом случае — вес плиты (таблицы 5, 6).

Отдельно следует оценить поведение системы «мост—путь—экипаж» при скорости 300 км/ч. Из таблицы 6 видно, что нагрузка на нижнюю плиту (балку) значительно отличается от других случаев. При такой скорости в пролётном строении возбуждаются полигармонические колебания с участием стар-

ших собственных форм. На рис. 14 на скорости 380 км/ч максимальные моменты формируются преимущественно первой формой собственных колебаний с максимумом момента в середине пролёта (показан индекс момента, приведённый к одному рельсу). При скорости 300 км/ч значительный вклад вносят другие собственные формы с более высокой частотой колебаний. По существу, вдоль балки распространяются волны де-

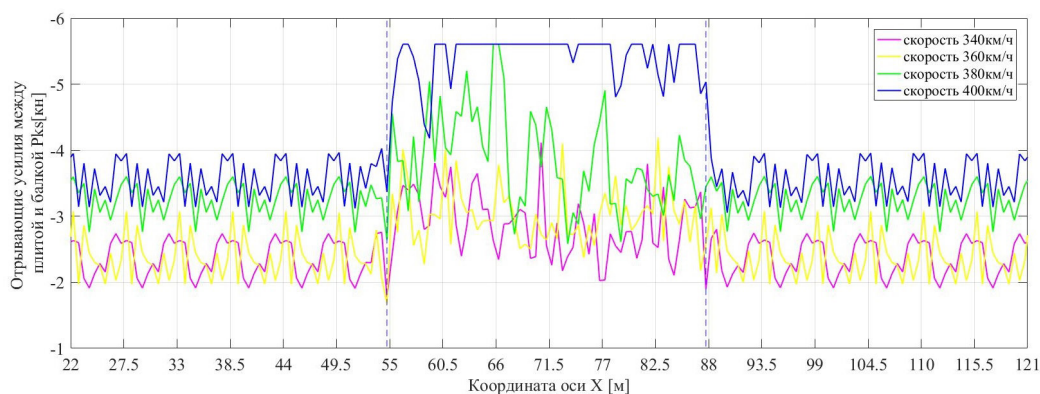


Рис. 12. Отрывающие усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (односторонние).

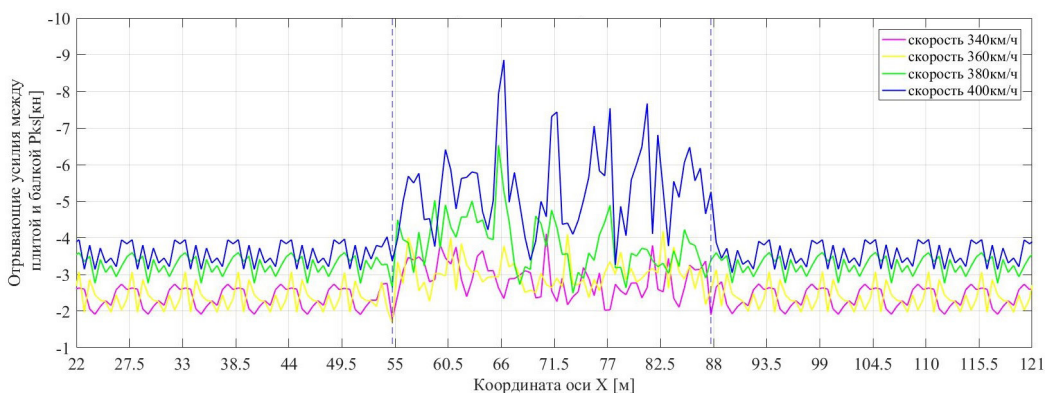


Рис. 13. Отрывающие усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя (двусторонние).

Таблица 5

Максимальные средние напряжения на плите (Па) (двусторонние)

Скорость поезда(км/ч)	300	360	380	400
Жёсткость прокладки $3 \cdot 10^8$ Н/м	29354	32260	33826	33168
Жёсткость прокладки $3 \cdot 10^9$ Н/м	34520	48156	42821	55357
Без прокладного слоя	47014	35462	38592	38211

Таблица 6

Максимальные средние напряжения на плите (Па) (односторонние)

Скорость поезда (км/ч)	300	360	380	400
Жёсткость прокладки $3 \cdot 10^8$ Н/м	29354	32260	33826	33168
Жёсткость прокладки $3 \cdot 10^9$ Н/м	34520	52980	81280	85662
Без прокладного слоя	169831	35462	38667	42193

формаций, что сильно влияет на поведение плит безбалластного пути. На рис. 15 представлена огибающая эпюра усилий между плитой и балкой, где эти усилия превышают максимумы при других скоростях (рис. 5) в четыре раза. При двусторонних связях между плитой и балкой отрывающие усилия на скорости 300 км/ч увеличиваются на 90 % по сравнению с другими скоростями (рис. 13).

3.3. Внутренние усилия в плитах

Внутренние усилия в плитах характеризуются изгибающим моментом и поперечной силой. На диаграммах в этом разделе приведены огибающие значения усилий, приведённые к одному рельсу, по длине зоны мостового перехода.

Было выявлено, что характер связи плиты с основанием не оказывает заметного влияния на максимальные изгибающие



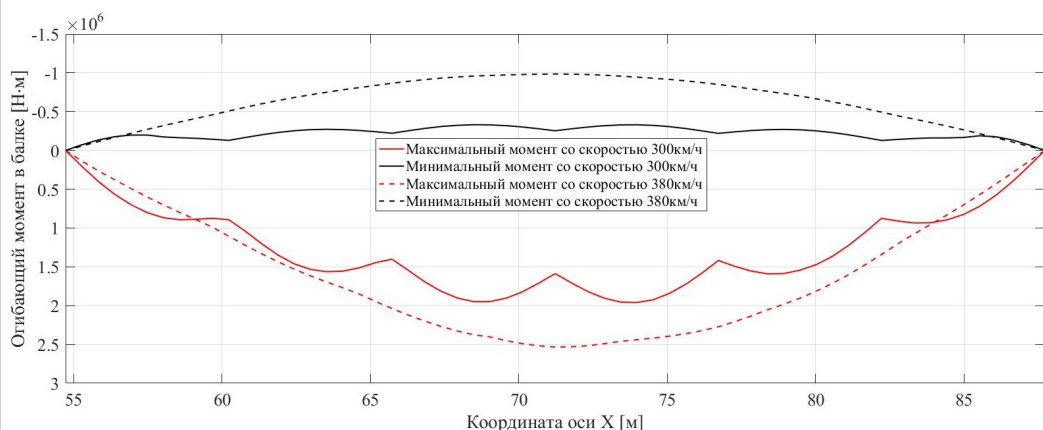


Рис. 14. Огибающие эпюры моментов в балке. При скорости 300 км/ч виден вклад старших собственных форм колебаний.

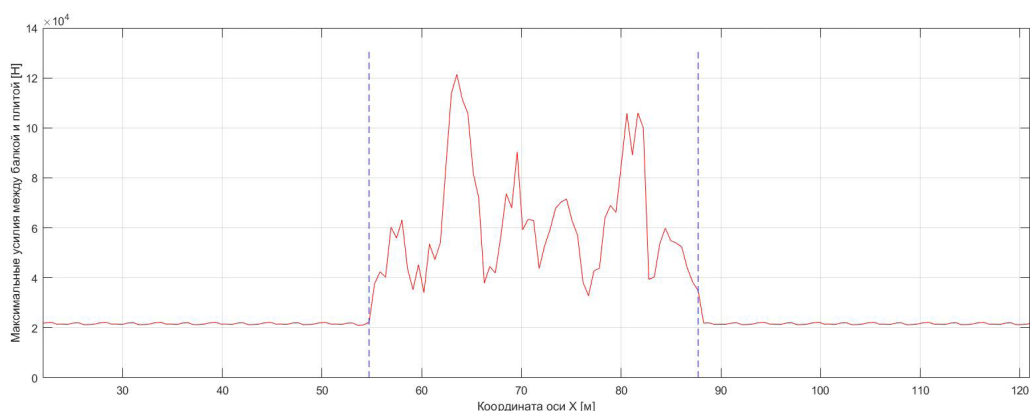


Рис. 15. Максимальные контактные усилия между плитой и балкой при отсутствии прокладного слоя при скорости 300 км/ч (односторонние).

моменты и поперечные силы в плитах безбалластного пути при минимальной жёсткости прокладного слоя (рис. 16 и 17). При максимальной жёсткости слоя характер огибающих эпюр изменяется, но максимумы остаются прежними (рис. 18).

На скорости 300 км/ч, при которой в балке развиваются полигармонические колебания, изгибающие моменты в плитах пути без прокладного слоя возрастают примерно в 10 раз до 10 кНм. Также значительно возрастают и поперечные силы (рис. 20). Применение двусторонних связей между плитой и балкой значительно снижает эффект таких колебаний (рис. 21).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде всего необходимо сделать вывод о важности рассмотрения при высоких скоростях движения несущей системы ВСМ в целом, что позволяет учесть непрерывное взаимодействие между главными

её элементами — мостом, мостовым полотном и подвижным составом. Модель «мост—путь—экипаж» даёт возможность описать поведение столь сложной системы и взаимодействие её элементов. Независимое изучение и проектирование элементов и связанное с этим упрощение взаимодействия, выражающееся во введении абстрактных понятий (эквивалентная нагрузка, приведённая масса и т.п.), ведёт к существенным просчётам. Благодаря применению комплексного подхода выявлено значительное влияние поведения пролётного строения на усилия в мостовом полотне.

Внутренние усилия в плитах мостового безбалластного полотна в отсутствие прокладного слоя при полигармонических колебаниях балки заметно превышают усилия при других скоростях. При этом прикрепление плит к балке двусторонними связями серьёзно снижает уровень усилий

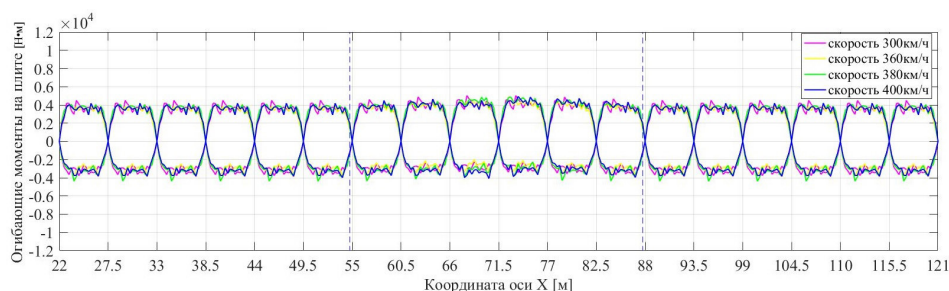


Рис. 16. Огибающие моменты на плите с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (односторонний).

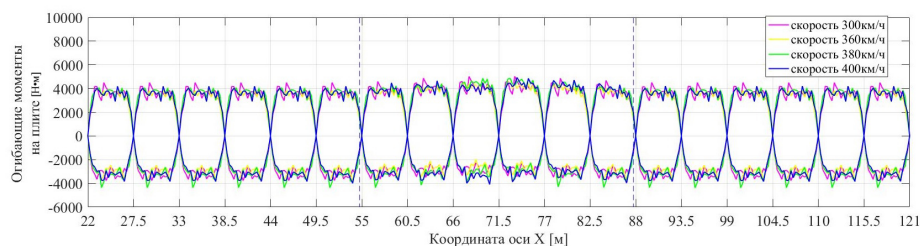


Рис. 17. Огибающие моменты на плите с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (двусторонний).

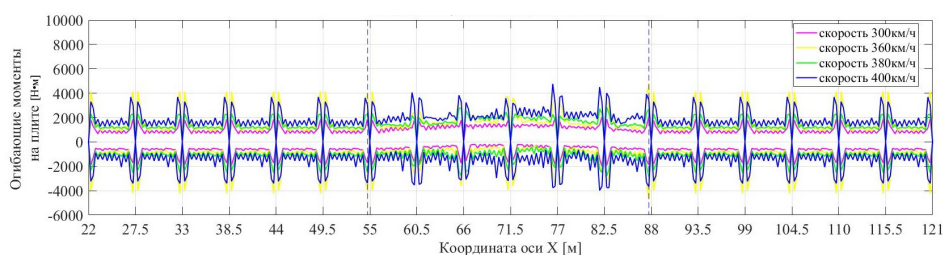


Рис. 18. Огибающие моменты в плите с коэффициентом жёсткости прокладки под плитой $3 \cdot 10^9$ Н/м (двусторонние).

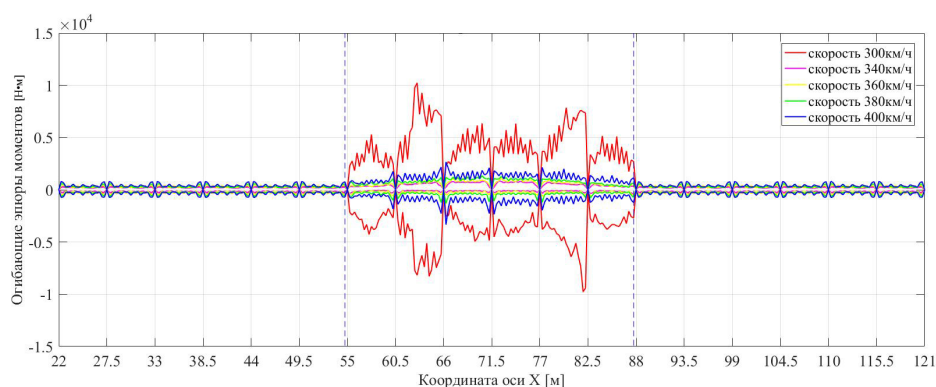


Рис. 19. Огибающие моменты плите при отсутствии прокладного слоя (односторонние).

при полигармонических колебаниях. Наличие упругого слоя между плитами безбалластного пути ликвидирует проблему как для односторонних, так и двусторонних связей между плитой и балкой. Двусторонние связи вызывают значительные «отрывающие» усилия в них, что требует соответствующих расчётов.

Упругий слой в виде матов между плитами безбалластного пути (плитой и балкой) делает мост практически незаметным с точки зрения нагрузки на основание подрельсовой плиты. Однако наличие такого слоя между плитами на насыпи имеет негативное влияние на изгибающие моменты в плитах. Поэтому упругие маты



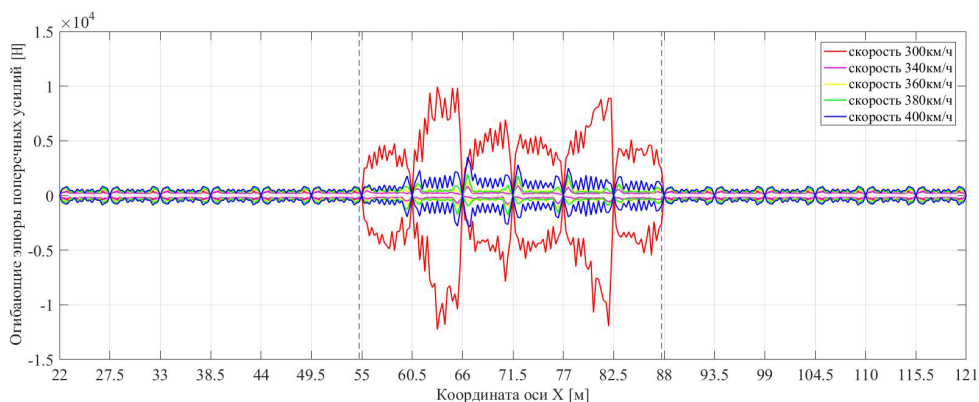


Рис. 20. Огибающие эпюры поперечных сил в плите при отсутствии прокладного слоя (односторонние).

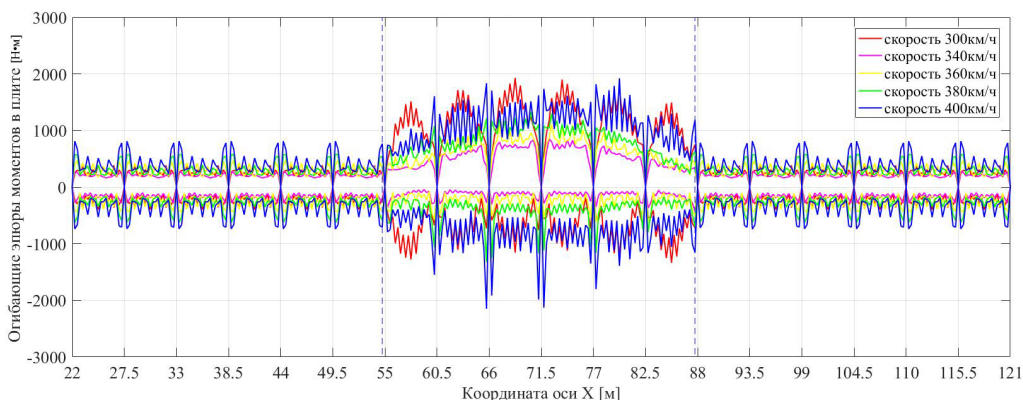


Рис. 21. Огибающие моменты в плите при отсутствии прокладного слоя (двусторонние).

между ними целесообразно применять только на пролётном строении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xuhui He, Teng Wu, Yunfeng Zou, Y. Frank Chen, Hui Guo & Zhiwu Yu. Recent developments of high-speed railway bridges in China. Structure and Infrastructure Engineering, Volume 13, 2017, Issue 12, pp. 1584–1595, DOI: 10.1080/15732479.2017.1304429.
2. Колос А. Ф., Козлов И. С. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий // Бюллетень результатов научных исследований. — 2013. — № 1–2. — С. 16–21.
3. Савин А. В. Выбор конструкции безбалластного пути // Вестник ВНИИЖТ. — 2014. — № 1. — С. 55–59.
4. Поляков В. Ю. О некоторых особенностях работы верхнего строения пути на подходах к искусственным сооружениям // Сб. науч. трудов МИИТ. — 1983. — Вып. 739. — С. 103–107.
5. Poliakov V. Yu. Interaction Optimization in Multibody Dynamic System, International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 2, 2017, pp. 43–51.
6. Поляков В. Ю. Взаимодействие подвижного состава с элементами мостового перехода при высо-

коскоростном движении / Дис... док. техн. наук. — М., 1994. — 395 с.

7. СТУ. Сооружения искусственные участка Москва—Казань высокоскоростной магистрали Москва—Казань—Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Изменение № 1. — СПб., 2016.

8. Поляков В. Ю., Данг Нгок Тхань. Взаимодействие подвижного состава и пути в зоне мостов на ВСМ // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIV международной научно-техн. конференции / РЖД, МИИТ. — М., 2017. — С. 143–153.

9. Поляков В. Ю. Численное моделирование взаимодействия подвижного состава с мостовыми конструкциями при высокоскоростном движении // Строительная механика и расчёт сооружений. — 2016. — № 2. — С. 54–60.

10. Fryba L. Dynamic of railway bridges. Academia, Praha, 1996, 330 p.

11. Klastorny M., Podworna M. Vertical vibrations of composite bridge/track structure/high-speed train systems. Part 1: Series-of-types of steel-concrete bridges. Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences, Vol. 62, No. 1, 2014, pp. 165–179.

12. Xiaoyan Lei. High Speed Rail way Track Dynamics. Models, Algorithms and Applications. Science Press, Beijing, 2017, 414 p.

Координаты авторов: Поляков В. Ю. — pvy55@mail.ru, Данг Нгок Тхань — dangthanh@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.03.2018, принята к публикации 27.04.2018.