

# Экспериментальное обследование участков переменной жесткости



Александр ЗАМУХОВСКИЙ  
Alexander V. ZAMUHOVSKIY

Константин МЕРЕНЧЕНКО  
Constantine V. MERENCHENKO



*Замуховский Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской путеепытательной лабораторией Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*

*Меренченко Константин Вячеславович – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТ, Москва, Россия.*

***Растущее внимание к развитию высокоскоростных железных дорог обострило целый ряд технических проблем, в том числе меняется отношение к таким специальным конструкциям пути, как участки переменной жесткости. Результаты экспериментов, проведенных кафедрой «Путь и путевое хозяйство» МИИТ в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения. Моделирование прохода высокоскоростного поезда по участкам сопряжения, изучение свойственных им динамических особенностей и условий эксплуатации. Меры совершенствования соответствующих конструкций с учетом снижения жесткости пути на устоях моста и повышения жесткости на подходах к другим инженерным сооружениям, чтобы уменьшить нагрузку на путь.***

***Ключевые слова:*** железнодорожный путь, неравножесткость, участок переменной жесткости, зона сопряжения, земляное полотно, искусственное сооружение, эксперимент, моделирование.

**Н**емало проблем при строительстве и эксплуатации высокоскоростных линий создают сопряжения разных конструкций пути; например, рельсов, уложенных на земляном полотне и искусственном сооружении, либо на стыке участков традиционной конструкции и безбалластного. Суть инженерных сложностей тут в перепаде жесткости пути, возникающей силовой неровности, которая приводит к появлению дополнительных динамических сил и развитию просадок в зоне сопряжения физически неоднородных конструкций.

На отечественных и зарубежных железных дорогах разными и не всегда в полной мере успешными способами решается задача создания специальных конструкций пути в зоне сопряжения. За такими сглаживающими ситуация варианты закрепились название «участки переменной жесткости» (УПЖ). Назначение их – ликвидировать перепады в состоянии пути и характерные неровности типа «предмостовых ям». Принцип построения УПЖ заключается в постепенном увеличении путевой жесткости по мере приближения к искусственному сооружению.

## ВАРИАНТЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

В отечественной практике было реализовано несколько вариантов конструкции УПЖ в зоне сопряжения пути на балласте с безбалластным верхним его строением:

- замена верхней части грунта подходной насыпи железобетонными бездонными коробами, заполненными щебнем;
- замена верхней части грунта подходной насыпи щебнем, послойно армированным геосетками;
- омоноличивание балластной призмы на подходе к безбалластному пути.

В конструкции участков переменной жесткости из бездонных железобетонных коробов (рис. 1) наличие боковых стенок (бортов) обеспечивает сокращение интенсивности накопления осадок балласта за счет предотвращающего его горизонтального смещения. Плавность изменения жесткости пути в данном случае достигается применением коробов разной высоты по длине переходного участка с постепенным изменением высоты от 1,5 м у устоя моста до 0,8 м в месте сопряжения с обычным путем. Поскольку разновысокие короба засыпаются балластом, то получаемая таким образом разная мощность балластного слоя и создает плавное изменение осадок балласта на переходном участке пути.

УПЖ с применением геосеток (рис. 2) устраивают посредством замены грунта в верхней части насыпи на щебень, укладываемый с послойным уплотнением между геосетками.

Создание переменной жесткости вдоль пути осуществляется постепенным уменьшением на длине 25 м общей толщины щебеночной засыпки с 1 м за задней гранью устоя до нуля в конце участка. Толщина единичного слоя щебня между геосетками составляет 20 см.

На экспериментальном участке безбалластного пути типа Rheda, уложенного на Октябрьской железной дороге, проблема сопряжения безбалластной конструкции с типовой решается за счет усиления верхнего строения пути на подходе к безбалластному отрезку омоноличиванием балластной призмы вяжущими материалами и укладкой дополнительных рельсов внутри колеи. Такой переходной участок представлен на рис. 3. Усиление верхнего

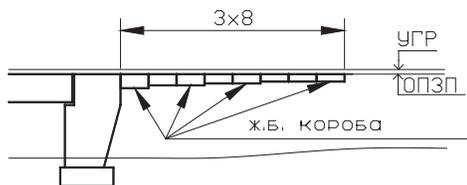


Рис. 1. Конструкция УПЖ с железобетонными коробами.

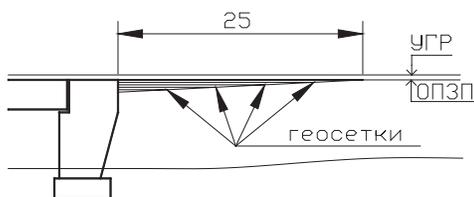


Рис. 2. Конструкция участка переменной жесткости с геосетками.



Рис. 3. Конструкция УПЖ с балластной призмой, омоноличенной вяжущими материалами.

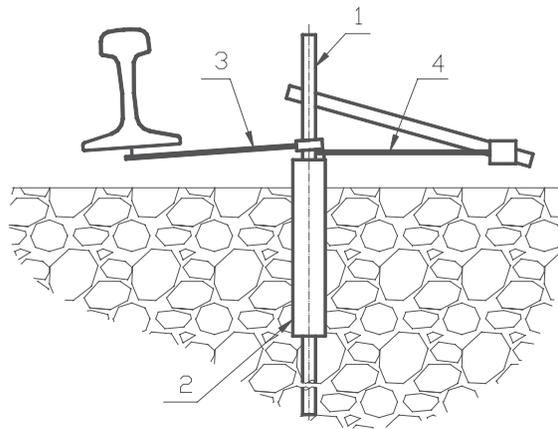
строения пути происходит за счет склеивания частиц балластной призмы и применения контррельсов. По мере приближения к безбалластной конструкции глубина проливки балластного материала и ее площадь увеличиваются. Благодаря этому плавно растет жесткость верхнего строения пути и его модуль упругости. Применение контррельсов призвано снизить деформативность пути традиционной конструкции.

Как видно из краткого обзора вариантов, каждая конструкция УПЖ имеет свои отличительные особенности. С целью оценки эффективности разных конструкций специалистами кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТ было проведено обследование ряда участков пути на подходах к мостам. Далее приводятся некоторые, наиболее интересные, на наш взгляд, результаты.



**Рис. 4. Схема установки датчиков в измерительном сечении (прогибомер для шпалы не показан):**

1 – штырь; 2 – отрезок обсадной трубы; 3 – прогибомер рельса; 4 – прогибомер балласта.



### ОСОБЕННОСТИ БЕЗДОННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОРОБОВ И ПЛОСКИХ ГЕОСЕТОК

В 2000 и 2005 годах на УПЖ из бездонных железобетонных коробов и плоских геосеток, уложенных на подходах к мостам Октябрьской железной дороги, в рамках изучения их эффективности [1] выполнены:

- нивелирование микропрофиля участков;
- измерение силового профиля УПЖ;
- определение доли элементов высокоскоростного пути (ВСП) в вертикальном перемещении рельса;
- оценка деформационных свойств подрельсового основания с помощью нагрузочного устройства СМ-460.

Съемка продольного микропрофиля УПЖ осуществлялась нивелировкой обеих рельсовых нитей через 2,5 м по головке рельса. Нивелировка проводилась от постоянного репера, а в случае его отсутствия – от временного. В результате определена разница в статических уклонах смежных участков длиной 2,5 м. Такая разница уклонов достигает:

- на типовом пути – 8,8‰;
- на УПЖ – 4,4‰;
- на устоях – 5,6‰;
- на пролетном строении – 4,8‰.

Измерение силового профиля пути на УПЖ производилось фиксацией вертикального перемещения рельса в шпальном ящике с помощью флексометров, устанавливаемых по одной рельсовой нити через один шпальный ящик. По данным измерений построены силовые профили пути. Среднее значение вертикального переме-

щения рельса по всем участкам находится в интервале 1,64÷2,94 мм, минимальное зафиксированное перемещение составило 0,35 мм, а максимальное перемещение – 7,3 мм.

Анализ полученных силовых уклонов показал, что в целом они на УПЖ меньше, чем на типовом пути на подходах. Исключение составляют участки, на которых был уложен звеньевой путь. Среднее значение силового уклона на УПЖ лежит в пределах от 0,52 до 0,98‰, при этом среднее квадратическое отклонение (СКО) находится в пределах от 0,32 до 0,74‰. На типовом пути на подходах силовые уклоны имеют больший разброс как по среднему значению (от 0,43 до 1,46‰), так и по СКО (от 0,38 до 1,00‰).

Для определения доли элементов ВСП в вертикальном перемещении рельса были проведены измерения перемещений таких элементов (рельса, шпалы, балласта) от неподвижного репера.

В качестве неподвижного репера применялся штырь длиной 2 м из трубы диаметром 20 мм. Подобный репер является условно неподвижным, поскольку он перемещается вместе с телом насыпи, однако эти перемещения незначительны по сравнению с измеряемыми параметрами.

Для определения перемещения верхней части балластной призмы вокруг штыря на глубину 0,5÷0,3 м от верха щебня устанавливался отрезок трубы диаметром 50 мм. На верхнюю часть штыря были закреплены три прогибомера, штоки которых связаны с подошвой рельса, верхней частью шпалы и торцом отрезка обсадной

Таблица 1

Параметры жесткости на опытных участках

Конструкция УПЖ	Элемент участка	у, мм	U, МПа
	типовой путь	1,6	32
железобетонные короба	начало	1,4	35
	у устоя	1,5	31
геосетки	начало	1,8	27
	у устоя	1,3	38
	устой	1,0	54
	пролет моста	1,9	23

трубы. Схема установки датчиков показана на рис. 4.

Данные, полученные при измерениях доли элементов ВСП в вертикальном перемещении рельса, показывают, что подобного рода перемещения, как правило, имеют наибольшие значения на устое. Деформации в балласте в пределах устоев трёх мостов в 1,5 раза выше, чем на подходах. Величины деформаций земляного полотна (перемещения балласта) в пределах УПЖ изменяются от 0,08 до 0,26 мм, а на прилегающих участках насыпей – от 0,07 до 0,53 мм.

Анализ долей перемещений элементов ВСП свидетельствует, что практически все перемещения реализуются в узле скрепления и балластном слое, а доля земляного полотна (низа балластного слоя) в общем перемещении минимальна. Это связано с накоплением остаточных деформаций в балластном слое и особенно на устое, где балласт опирается на жесткое бетонное основание.

На отечественных железных дорогах применяется понятие модуля упругости подрельсового основания  $U$  (кг/см<sup>2</sup>), который через прогиб рельса  $\Delta y$  (см) под разностью одиночной нагрузки  $DP$  (кг) определяется по формуле [2]:

$$U = \frac{1}{\sqrt[3]{64E}} \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta P}{\Delta y}\right)^4},$$

где  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа – модуль упругости рельсовой стали;

$I = 3,548 \times 10^{-5}$  м<sup>4</sup> – момент инерции рельса относительно горизонтальной оси (на участке с контруголком  $I = 4,823 \times 10^{-5}$  м<sup>4</sup>).

В таблице 1 приведены средние значения прогибов, модулей и коэффициентов постели, полученные для характерных элементов на участках переменной жест-

кости по результатам испытаний нагрузочным комплексом.

Данные проходов нагрузочных устройств показывают наличие неравножесткости в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения даже при устройстве УПЖ на подходах к мостам. Наибольшие перепады модуля упругости пути наблюдаются при переходе с УПЖ на устой и с устоя на пролетное строение.

### ОБОБЩЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Анализ проведенных наблюдений на подходах к мостам позволил дать определенные оценки работе УПЖ из геосеток и бездонных железобетонных коробов.

Продольный микропрофиль пути на участках характеризуется значительной неравномерностью, соседние элементы микропрофиля имеют большие разности уклонов.

Результаты измерения вертикальных перемещений элементов верхнего строения пути показали, что упругие перемещения балласта (упругие осадки земляного полотна) лежат в пределах 0,08÷0,26 мм для УПЖ и 0,07÷0,53 мм – на подходной насыпи. Наибольшие остаточные деформации размером до 1,5 мм (по точечным замерам) совпадают с местами наибольших статических уклонов микропрофиля, достигающих 5,6‰ (шаг 2,5 м), и местами наибольших уклонов силового профиля, достигающих 3,5‰ (шаг 1,1 м).

Самые тяжелые условия для балластного слоя возникают на устоях в связи с резким изменением жесткости подбалластного основания. Силовые уклоны достигают 5,6‰. Среднее значение силового уклона на УПЖ лежит в пределах от 0,52 до 0,98‰. На типовом пути на подходах силовые уклоны имеют больший разброс как





Динамические добавки в зоне сопряжения УПЖ и устоя моста

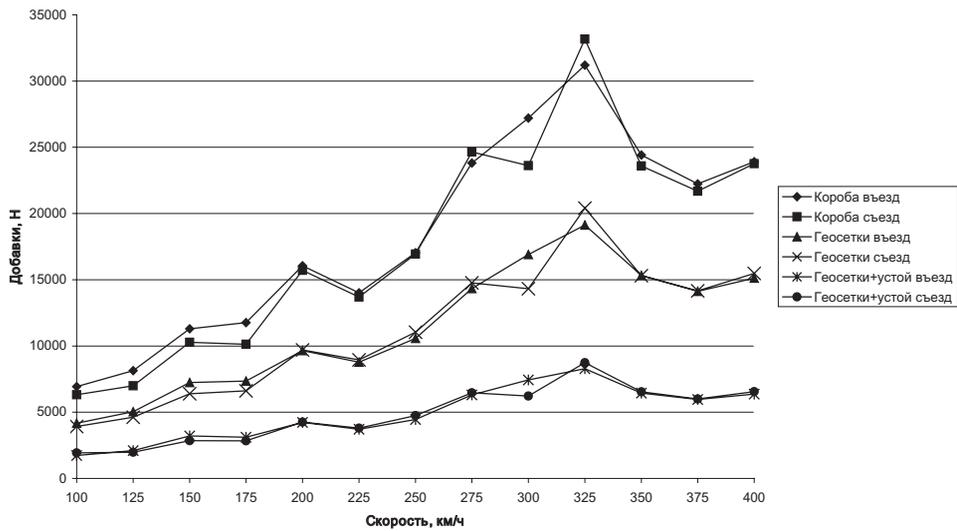


Рис. 5. Зависимость наибольших динамических добавок от скорости движения при прохождении поездом участка сопряжения УПЖ и устоя моста.

Таблица 2

Результаты расчета динамических добавок, возникающих при проходе подвижным составом сопряжения УПЖ и устоя моста

Скорость, км/ч	Динамические добавки, Н					
	Короба		Геосетки		Геосетки+устой	
	въезд	съезд	въезд	съезд	въезд	съезд
100	6938	6321	4163	3925	1728	1924
125	8138	7001	5035	4626	2104	1979
150	11300	10280	7241	6398	3213	2849
175	11770	10130	7348	6617	3110	2841
200	16060	15710	9646	9700	4234	4256
225	14010	13690	8780	8948	3715	3797
250	17040	16940	10570	11040	4447	4742
275	23810	24650	14330	14760	6309	6463
300	27200	23620	16900	14320	7434	6221
325	31200	33170	19130	20410	8281	8735
350	24420	23590	15330	15310	6442	6543
375	22240	21690	14120	14160	5962	6005
400	23910	23760	15120	15480	6369	6556

по среднему значению – от 0,43 до 1,46‰, так и по СКО – от 0,38 до 1,00‰. На устоях доля деформации, приходящейся на балласт, доходит до 70%.

По итогам нагрузочных испытаний на конструкции переменной жесткости с применением геосеток зафиксировано изменение жесткости по длине участка с уменьшением ее в сторону пути, уложенного на земляном полотне. На варианте

конструкции с коробами заметного изменения жесткости по длине участка укладки коробов не отмечается. Наибольшая жесткость пути получена в зоне опорной части пролета и на устое.

Чтобы определить динамические добавки, которые возникают при прохождении высокоскоростным поездом участка переменной жесткости (с указанными в таблице 1 характеристиками), нами были выполнены расче-

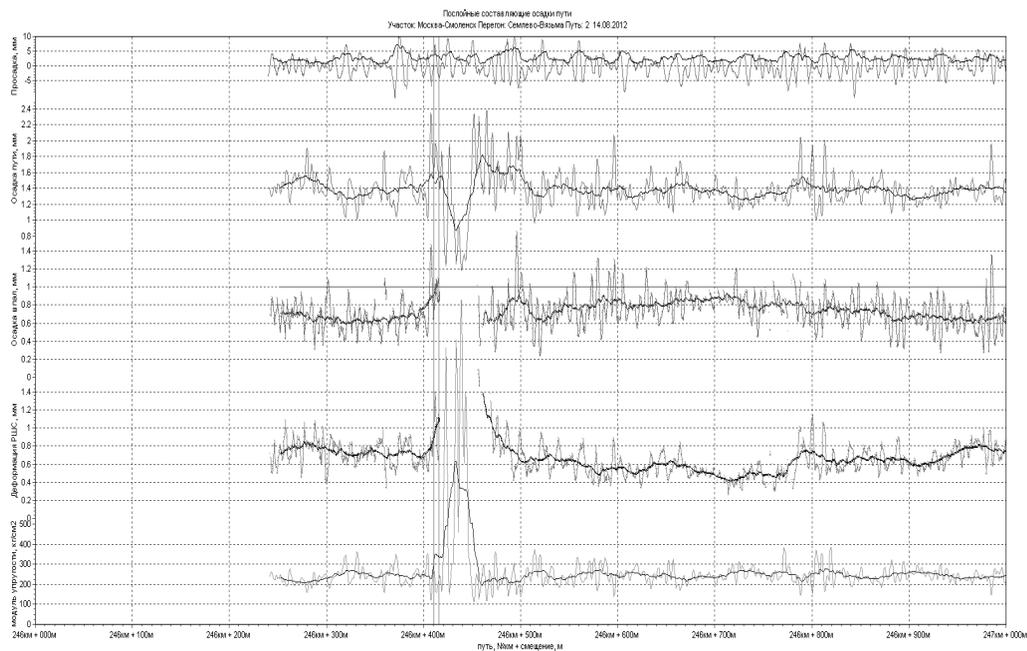


Рис. 6. Графики прохода нагруженного устройства по экспериментальному участку.

ты при помощи программы, разработанной на кафедре. Программа позволяет найти значение динамических сил при неравножестком подрельсовом основании, а также учесть наличие пустот (люфтов) под шпалами [3].

В качестве поездной нагрузки принимался моторвагонный подвижной состав с осевой нагрузкой 18 т/ось, а диапазон расчетных скоростей составлял 100÷400 км/ч с шагом 25 км/ч. Помимо моделирования работы УПЖ из геосеток и бездонных железобетонных коробов были произведены расчеты, в которых модуль упругости пути на устое моста оказался снижен на 10 МПа. Такое снижение возможно получить за счет применения упругих прокладок под шпалами, расположенными на устое моста, либо за счет применения прокладок повышенной упругости в узлах промежуточных рельсовых скреплений. Результаты расчета представлены в таблице 2 и в форме графиков на рис. 5.

Сделанный анализ показывает, что при устройстве УПЖ из бездонных железобетонных коробов динамические добавки максимальны при прочих равных условиях. Общий закон зависимости величины добавок, вызванных неравножесткостью пути, от скорости движения — нелинейный.

Наибольшие добавки сил возникают при скорости 325 км/ч, при еще больших скоростях величины добавок меньше. Это может объясняться тем, что при выросших скоростях поезд начинает «проскакивать» силовую неровность, и ее влияние оказывается менее существенным.

При скорости движения до 250 км/ч в месте сопряжения УПЖ из бездонных железобетонных коробов и устоя моста, где по данным анализа прохода нагруженного устройства имеется наибольший перепад жесткости пути, динамические добавки сил не превышают 20% от статической нагрузки, однако при повышении скорости движения на этом же участке величина динамических добавок увеличивается до 35% от статической нагрузки, что может послужить причиной преждевременного выхода из строя элементов пути.

Для уменьшения динамических сил взаимодействия пути и подвижного состава необходимо снижать жесткость пути на устое моста и таким образом уменьшать перепад модуля упругости пути в зоне сопряжения устоя и УПЖ. Подобная мера приводит к снижению динамических добавок сил взаимодействия пути и подвижного состава почти в два раза и может быть





действенной при повышении эффективности УПЖ и создании малообслуживаемой конструкции пути. Так, при снижении модуля упругости пути на устое моста, перед которым уложен УПЖ из геосеток, динамические добавки даже при 325 км/ч не превышают 10% от статической нагрузки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для более детального изучения зоны устоя моста и опорной части пролета, где отмечалась наибольшая жесткость пути, проведены эксперименты на устое моста через реку Вязьма. Мостовое полотно на пролетном строении было представлено плитами БМП с прокладным слоем из транспортной ленты и древесины, на устое моста уложен бесстыковой путь с рельсами Р65 на железобетонных шпалах. На шкафной стенке устоя размещен мауэрлатный брус в виде сдвоенных мостовых брусьев со скреплениями Д0. Участки переменной жесткости при этом отсутствуют.

Эксперимент шел на двух участках:

1) при наличии мауэрлатного бруса с установленной подкладкой скрепления Д0, то есть при «бытовой» жесткости в данной зоне;

2) при наличии мауэрлатного бруса со снятыми подкладками (таким образом была снижена жесткость пути в зоне опоры пролетного строения).

Начало проверки было приурочено к плановому проходу нагрузочного комплекса СПМ-18, который провел испытание экспериментального участка. Поскольку подкладка с мауэрлатного бруса снималась только на одном устое, нагрузочный комплекс при прохождении моста записал состояние пути с бытовой и сниженной жесткостью в зоне опирания пролетного строения на устой, разницу между которыми можно увидеть по данным нагрузочных испытаний, приведенным на рис. 6.

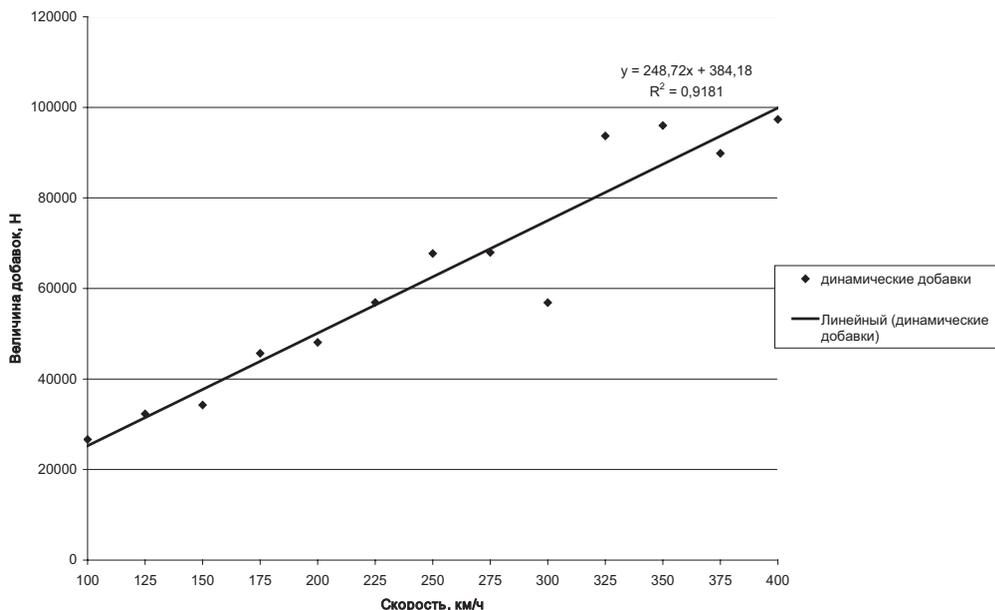
По графикам прохода нагрузочного устройства видно, что в зоне экспериментальных работ со снятыми с мауэрлатного бруса подкладками резкого перепада жесткости пути не возникает, а наоборот, имеется некоторый «провал» даже по сравнению с участком на подходе к мосту. Это объясняется тем, что рельс в этом месте

имел большой пролет между соседними опорами за счет исключения из работы мауэрлатного бруса. Модуль упругости пути здесь характеризуется значениями: на мауэрлатном брусике со снятыми подкладками — 17 МПа, на устое моста — 40 МПа, на пролетном строении — порядка 90 МПа. Однако надо заметить, что на пролетном строении имеется большая неоднородность модуля упругости, и указанное значение модуля принято по графику осреднения вычисления по 25 метрам. В месте расположения мауэрлатного бруса с установленными подкладками отмечается резкий скачок значений модуля упругости пути, показатели достигают 150 МПа. Такие большие значения возникают из-за того, что в выделенной зоне жесткость пути формируется лишь сжатием упругих прокладок в узле скрепления.

Также специалистами кафедры были проведены эксперименты на опытном участке безбалластного пути конструкции Rheda и переходном участке к нему, уложенному на Октябрьской железной дороге на перегоне Саблино—Тосно. В ходе опытных работ определены перемещения крайней шпалы пути традиционной конструкции относительно условно неподвижной плиты под поездной нагрузкой.

Результаты измерений показали, что перемещения шпалы в омоноличенной балластной призме лежат в диапазоне 1,24—1,91 мм под нагрузкой от электропоезда ЭТ2М с осевой нагрузкой 12,78—17,38 т/ось. В то же время упругие прогибы рельса на самой плите под такой же нагрузкой лежали в пределах от 0,4 до 1,1 мм. Инstrukция по оценке деформативности пути нагрузочным поездом [3] допускает осадку шпалы под подобным комплексом 1,1 мм после ремонта для групп пути А, Б. Измеренные перемещения шпалы относительно плиты и рельса относительно плиты говорят о том, что под шпалой имеется люфт.

Как отмечалось, перемещения рельса в основном реализуются за счет узлов промежуточных скреплений и балластного слоя. Поскольку на опытном участке балластная призма была пролита вяжущим материалом и фактически омоноличена, доля ее деформации в общей деформации пути незначительна. Примем люфт под шпалой равным разнице между перемеще-



**Рис. 7. Величины динамических добавок, полученные при моделировании прохода высокоскоростного поезда по экспериментальному участку.**

ниями шпалы и рельса относительно плиты. Конечно, эта величина условна и в полной мере не отражает действительность, однако для предварительной оценки эффективности УПЖ, выполненного при помощи проливки вяжущим материалом, такое допущение приемлемо.

Подчеркнем, что эксперименты на указанном участке пути проводились спустя 10 месяцев после открытия движения по нему, а поездная нагрузка была представлена преимущественно пригородными и пассажирскими поездами, тем не менее даже при такой малой наработке эффективность омоноличивания балластной призмы уже была снижена. Следует ожидать, что при увеличении грузонапряженности и осевых нагрузок величины деформаций пути будут только увеличиваться.

Для определения эффективности УПЖ, выполненного при помощи проливки вяжущим материалом, проведен расчет динамических добавок, действующих на путь при различных скоростях. Поскольку в нашем распоряжении нет достоверных сведений о характеристиках модуля упругости пути на подходе к безбалластной конструкции, был взят идеальный случай, когда перепада жесткости в зоне сопряжения нет, а рассчитанный на основе сделан-

ных измерений модуль упругости пути в монолитном варианте равен 60 МПа. В качестве поездной нагрузки принят моторвагонный подвижной состав с нагрузкой 18 т/ось.

Результаты расчетов представлены в виде графика (рис. 7).

Как видно из графика, даже при сравнительно невысокой скорости 150 км/ч величина динамических добавок достигает 1/3 от статической нагрузки на колесо.

Естественно, таких неровностей на участках пути, где скорость движения пассажирских поездов достигает 350 км/ч, допускать нельзя. Однако для того, чтобы снизить их влияние на формирование динамических добавок, надо снизить жесткость пути до значений, близких к значениям традиционной конструкции. Аналогичное мнение высказывают и немецкие специалисты [4].

## ВЫВОДЫ

В ходе экспериментального обследования УПЖ, уложенных на Октябрьской железной дороге, был выявлен ряд недостатков действующих конструкций, а также наличие неравножесткости пути на подходах к мостам даже при устройстве переходных участков. Моделирование





прохода по таким участкам высокоскоростного поезда показывает существенное увеличение значений динамических добавок сил с увеличением скорости, которые способствуют более быстрому выходу из строя элементов верхнего строения пути.

Наиболее сложные условия для эксплуатации пути возникают на устоях мостов и в зоне расположения мауэрлатного бруса из-за существенного скачка жесткости.

Одной из действенных мер по повышению эффективности участков переменной жесткости является снижение жесткости пути на устой моста, расчеты подтверждают, что таким образом можно уменьшить динамические добавки, влияющие на путь. При создании УПЖ необходимо делать конструкцию не только жестче на подходе к искусственным сооружениям, но и мягче на устоях мостов.

Наличие люфтов под отдельными шпалами при высокоскоростном движении в зоне сопряжения традиционной конструкции пути с безбалластной признается крайне отрицательным явлением, которое приводит к значительному увеличению вертикальных динамических добавок. Для нейтрализации этого фактора целесообразно снижать жесткость пути на безбалластном основании до значений, близких к значениям на земляном полотне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о НИР: Осмотр мостовых переходов на линии Санкт-Петербург – Москва. Анализ состояния зон переменной жесткости. – М., 2005. – 97 с.
2. Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой: Сб. научных трудов МИИТ. Вып. 78. – М.: МИИТ, 1965. – 252 с.
3. Гречаник А. В. Оценка влияния жесткости пути и рессорного подвешивания тележек на развитие остаточных деформаций пути / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 2011. – 99 с.
4. Шталь В., Фройденштайн Ш. Упругие характеристики верхнего строения пути // RTR Russian edition. Октябрь 2012. – С. 4–7. ●

## EXPERIMENTAL MONITORING OF SECTIONS OF VARIABLE STIFFNESS

**Zamuhovskiy, Alexander V.** – Ph.D. (Tech), associate professor, head of research laboratory of track testing of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Merenchenko, Constantine V.** – Ph.D. student at the department of track and track facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

*Growing attention to the development of high-speed railways has accentuated some technical problems. Particularly one can witness changing attitude towards some special track constructions which are sections of variable stiffness. The article describes the results of experiments conducted by the department of track and track facilities of Moscow State University of Railway Engineering in the zone of interfacing of subgrade and artificial*

*structures. The authors proceed with simulation of high-speed train motion at the interface sections, studying dynamic features and operation conditions. They suggest measures of amelioration of structures, taking into account the reducing of stiffness of the track on bridge abutments and raising of the stiffness at the approaches to other structures, in order to reduce the loading of the subgrade and track.*

**Key words:** rail track, valuable stiffness, variable stiffness section, zone of interface, subgrade, artificial structure, experiment, simulation.

## REFERENCES

1. Report on the research: Monitoring of bridges on the railway Moscow – St. Petersburg. Analysis of the zones of variable stiffness [*Otchet o NIR: Osmotr mostovykh perehodov na linii Sankt-Peterburg – Moskva. Analiz sostoyaniya zon peremennoy zhestkosti*]. Moscow, 2005, 97 p.
2. Track maintenance with ferroconcrete sleepers under load. Transactions of MIIT [*Rabota puti s zhelezobetonnyimi shpalami pod nagruzkoj: Sb. nauchnykh trudov MIIT*]. Iss. 78. Moscow, MIIT, 1965. 252 p.
3. Grechanik A. V. Evaluation of impact of track stiffness and springing of bogies on the development of residual deformation of the track [*Otsenka vliyaniya zhestkosti puti i ressornogo podveshivaniya telezhek na razvitiie ostatochnykh deformatsiy puti*]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow, MIIT, 2011, 99 p.
4. Stahl W., Freudenstein S. Elastic properties of track superstructure [*Uprugie harakteristiki verhnego stroeniya puti*]. RTR Russian edition. October, 2012, pp. 4–7.

Координаты авторов (contact information): Замуховский А. В. (Zamuhovskiy A. V.) – miit\_ppx@rambler.ru; Меренченко К. В. (Merenchenko C. V.) – kmerenchenko@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 13.03.2013  
Принята к публикации / article accepted 29.03.2013