

# Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками



Егор ДЫЛЁВ



Евгений АШПИЗ

Егор Олегович Дылёв<sup>1</sup>,  
Евгений Самуилович Ашиз<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Российский университет транспорта,  
Москва, Россия.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0665-822X>; РИНЦ SPIN-код: 6475-9848; РИНЦ AuthorID: 1157251.

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-2117>; РИНЦ SPIN-код: 5412-7662; РИНЦ AuthorID: 169354.

✉ <sup>1</sup> dylev.egor@mail.ru.

## АНОНТАЦИЯ

Важным условием для эксплуатации особогрузонапряженных линий является обеспечение стабильности геометрии рельсовой колеи, в том числе в вертикальной плоскости, которая во многом зависит от стабильности подшпального основания и, в том числе, от отсутствия остаточной деформации балластного слоя.

В статье приведен анализ результатов исследования по уменьшению остаточных деформаций балластного слоя при помощи подшпальных прокладок. Целью данной работы является оценка их влияния на работу балластной призмы

в период стабилизации и период нормальной его работы. В лаборатории получен график осадки штампа, определена интенсивность его осадки, измерена площадь контакта подошвы штампа с балластом, рассчитаны контактные напряжения и построен график изменения модуля упругости модели.

По результатам исследования выявлено, что подшпальные прокладки помогают уменьшить остаточные деформации балластного слоя в период его стабилизации и уменьшить интенсивность осадки в основной период его работы.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, подшпальные прокладки, модуль упругости пути, балластный слой, осадка рельса, остаточные деформации балласта.

Для цитирования: Дылёв Е. О., Ашиз Е. С. Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.  
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

Стабильность геометрии рельсовой колеи является важным условием безопасной эксплуатации железных дорог с интенсивным движением и большим объемом перевозок грузов. В еще большей мере это относится к особогрузонапряженным линиям<sup>1</sup>, протяженность которых, например, на сети ОАО «РЖД» составляет на сегодня 16 тыс. км [1].

Исследованиям накопления остаточных деформаций в балластном слое были посвящены работы ученых ВНИИЖТ во второй половине XX века [2–5], в результате чего было сформировано основное понимание работы этого элемента конструкции пути. Рассматривая работу балластного слоя железнодорожного пути, С. Н. Попов указывал, что для обеспечения длительной стабильности подшпальной основания на линиях с высокой грузонапряженностью необходимо иметь такую конструкцию пути, в которой балластный слой работал бы на всем протяжении пути с равномерным накоплением остаточных деформаций [2]. Изучая характер накопления остаточных деформаций балластного слоя на протяжении его жизненного цикла, он выделил четыре характерных периода, которые описал следующим образом: во время периода 1 (период стабилизации) происходит интенсивное накопление остаточных деформа-

ций за счет переупаковки зерен и около их острых граней, которое к концу резко снижается, и в периоде 2 (период нормальной работы) накопление остаточной деформации становится минимальным. Период 3 характеризуется ростом накопления остаточных деформаций, который связан с загрязненностью щебня к концу срока его эксплуатации. В периоде 4 происходит чрезмерно интенсивное накопление осадки, наступающее вследствие невыполнения своевременного ремонта пути.

Основной причиной накопления остаточных деформаций в балласте в процессе эксплуатации В. И. Лысюк считал динамическое воздействие поездов на путь [3], которое тем сильнее, чем выше жесткость верхнего строения. Примером увеличения жесткости пути является переход с деревянных шпал на железобетонные. Такое изменение конструкции повлекло за собой повышение динамического воздействия поездов на путь и, соответственно, рост интенсивности накопления остаточных деформаций в балластном слое, что отмечалось в работе В. Ф. Федулова [4]. Наибольшие проблемы при этом возникают при динамическом воздействии в зоне рельсового стыка, для решения которых в работе [5] предлагалось добиться уменьшения остаточных деформаций балласта устройством упругой связи по нижней опорной поверхности железобетонной шпалы, которая улучшила условия контакта частиц щебня с подошвой шпалы, уменьшила его дробимость и истирание.

<sup>1</sup> СП 119.13330.2012 Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 01-95. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095541?ysclid=m7endujtqq310261972>. Доступ 21.08.2024.

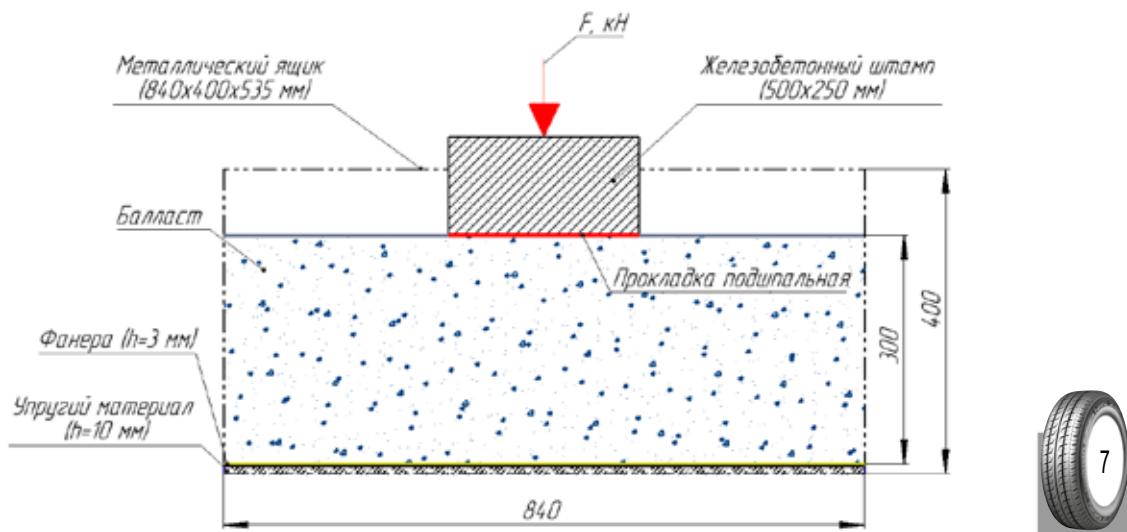


Рис. 1. Схема устройства лабораторной модели [выполнено авторами].

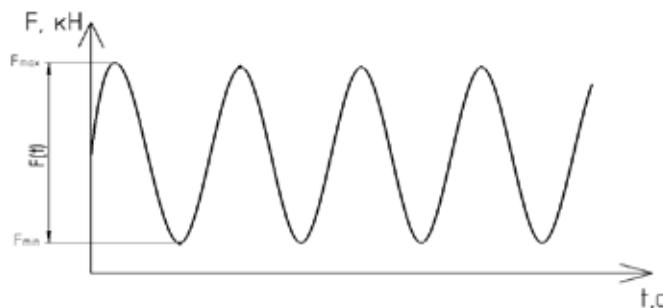


Рис. 2. График приложения нагрузки к модели.  $F_{\max} = 40,63 \text{ кН}$ ;  $F_{\min} = 4,06 \text{ кН}$  [выполнен авторами].

В зарубежных странах на ряде участков снижение напряжений в балластном слое достигается за счет применения подшпальных прокладок (далее – ПШП) [6]. В России исследования эффективности ПШП стали проводиться с середины XX века [5; 7; 8], но в основном они были направлены на обеспечение стабильности пути встыковых зонах. В частности, в работе В. Н. Каплина [9] подтверждена технико-экономическая эффективность применения ПШП при выправке пути встыках.

На современном этапе повышения поездной нагрузки на путь необходимо исследовать вопрос эффективности применения ПШП и вне зоныстыков, рассмотрев возможность снижения накопления деформаций в условиях бесстыкового пути, что стало целью исследования, результаты которого приводятся в статье.

Исходя из приведенной выше характеристики четырех периодов работы балластной призмы, сформулированной С. Н. Поповым, можно предположить, что ПШП, благодаря уменьшению контактных напряжений, должны уменьшить осадку балластного слоя в периоды 1 и 2 его работы, а на периоды 3 и 4 оказывать влияние не будут, так как основное влияние на увеличение осадки в это время оказывает его загрязненность.

Для подтверждения представленной гипотезы было принято решение о проведении лабораторного эксперимента, целью которого было определение влияния ПШП на периоды 1 и 2 работы балластного слоя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Условия испытаний

Моделирование работы балластного слоя выполнено как моделирование в двухмерном пространстве, где за плоскость моделирования принимается плоскость вдоль пути в подрельсовой зоне. Возможность проведения

такого опыта была подтверждена в работе [10] при изучении деформационных свойств загрязненного балласта.

Схема модели приведена на рис. 1.

Модель собиралась в металлическом ящике, размеры которого составляли: вдоль оси пути – 850 мм (минимальный размер для исключения влияния граничных условий), а поперек – 535 мм (наименьший размер для испытаний щебня должен превышать максимальный размер частиц щебня не менее чем в пять раз [11]), высота – 400 мм.

В основании ящика укладывался упругий мат толщиной 10 мм, который моделировал основную площадку земляного полотна (далее – ОПЗП). Для исключения местных деформаций на упругий слой укладывалась фанера толщиной 3 мм. Такая конструкция позволила добиться модуля деформации ОПЗП в 80 МПа. При этом толщина балластного слоя составляла 30 см.

На следующем этапе послойно укладывался гранитный щебень второй категории, зерновой состав которого соответствует ГОСТ 7392<sup>2</sup>. Толщина слоя составляла 100 мм. Каждый слой уплотнялся при помощи деревянного штампа размером 830x525 мм. К первым двум слоям нагрузка прикладывалась в количестве 10 тыс. циклов, к третьему слою – в количестве 500 тыс. циклов. График приложения нагрузки представлен на рис. 2. Частота приложения нагрузки равна 8 Гц. Данный режим уплотнения позволяет добиться наилучшего уплотнения [12].

После уплотнения устанавливался железобетонный штамп. Для обеспечения реального контакта между шпалой и балластом, штамп

<sup>2</sup> ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293762/4293762301.pdf?sysclid=m872wmf7pk430161462>. Доступ 21.08.2024.



Рис. 3. Лабораторная модель в сборе [выполнено авторами].



Рис. 4. Внешний вид ПШП мягкого типа после испытаний [выполнено авторами].

был вырезан из средней части шпалы подтипа ШЗ-Д 4x10. Фото собранной модели приведено на рис. 3.

В момент проведения самого эксперимента к модели прикладывалась нагрузка так же, как и во время уплотнения, согласно рис. 2. Максимальная сила позволяет добиться допустимых напряжений под подошвой шпалы от вагонов, равных 325 кПа. Данное значение напряжений установлено в Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности<sup>3</sup> (далее – Методика).

Количество циклов в эксперименте составляло 2 млн.

Частота воздействия нагрузки составляет 8 Гц. Обоснованием принятой частоты воздействия явились следующие параметры: база тележки размером 1850 мм и среднесетевая скорость, равная 55 км/ч (15,28 м/с).

<sup>3</sup> Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р. [Электронный ресурс]: [https://meganorm.ru/mega\\_doc/norm/metodika/0/metodika\\_otsenki\\_vozdeystviya\\_podvizhnogo\\_sostava\\_na\\_put\\_po.html](https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodika/0/metodika_otsenki_vozdeystviya_podvizhnogo_sostava_na_put_po.html). Доступ 27.08.2024.

Было выполнено три эксперимента, которые между собой имели различия в контакте между подошвой штампа и балластом:

- модель № 1 – без ПШП;
- модель № 2 – с ПШП мягкого типа;
- модель № 3 – с ПШП среднего типа.

Сборка каждой из представленных моделей происходила согласно представленному выше описанию.

ПШП изготовлены из полиолефинового материала, толщиной 10 мм и с распределенным статическим модулем упругости 0,14 Н/мм<sup>3</sup> (мягкого типа) и 0,24 Н/мм<sup>3</sup> (среднего типа).

Типы ПШП соответствуют техническим требованиям ЦДИ.02.2020<sup>4</sup>.

### Результаты лабораторного эксперимента

После завершения эксперимента был проведен визуальный осмотр состояния ПШП. Стоит отметить, что, проведя циклические испытания под нагрузкой, которая вызывает максимально допустимые напряжения под



<sup>4</sup> Прокладки подшпальныe. Технические требования. ЦДИ.02.2020.



Рис. 5. Внешний вид ПШП среднего типа после испытаний [выполнено авторами].

**Таблица 1**  
**Интенсивность осадки штампа [выполнено авторами]**

Модель	Величина осадки после окончания первого периода (на 100 тыс. циклов), мм	Осадка штампа после 2 млн циклов, мм	Интенсивность осадки во время второго периода, мм/млн циклов
Без ПШП	7,70	9,75	1,03
С ПШП среднего типа	4,28	6,38	1,00
С ПШП мягкого типа	3,22	5,05	0,92

подошвой шпалы, на ПШП не было сквозных пробоев и трещин. На рис. 4 и 5 приведены фото ПШП после испытаний.

На рис. 6 приведен график осадки штампа в трех моделях, из которого видно, что осадка балласта в конце первого периода его работы уменьшилась в моделях с ПШП примерно в два раза.

Отметки уровня штампа по окончанию первого периода работы и в конце эксперимента были вынесены в табл. 1 для того, чтобы дать оценку эффективности использования ПШП.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что использование ПШП среднего типа позволило уменьшить

осадку штампа в конце первого периода работы балластной призмы на 44 %, а мягкого типа – на 58 %. Также необходимо отметить, что использование ПШП привело к уменьшению интенсивности осадки штампа во втором периоде работы балластной призмы. Так ПШП среднего типа уменьшили интенсивность на 3 %, а ПШП мягкого типа – на 11 %.

Разницы в изменении зернового состава щебня между тремя моделями после эксперимента не обнаружено (табл. 2). Данный результат может быть объяснен следствием режима уплотнения балласта перед проведением самого эксперимента, который привел к образованию мелкой фракции еще на подготовительном этапе, за счет около острых

**Таблица 2**  
**Изменение зернового состава щебня [выполнено авторами]**

Размер сита, мм	До испытания		После испытания					
	Без ПШП		С ПШП мягкого типа		С ПШП среднего типа		% кг	кг
	%	кг	%	кг	%	кг		
60	1,6	4	1,6	4	1,6	4	1,6	4
40	73,4	183,5	72,9	182,3	72,5	181,2	72,9	182,3
25	25	62,5	25	62,4	25,5	63,7	24,9	62,3
от 0,01 до 25	-	-	0,5	1,3	0,5	1,2	0,5	1,4
Всего	100	250	100	250	100	250	100	250

Таблица 3

## Площадь контакта подошвы штампа с балластом [выполнено авторами]

Параметр	Без ПШП	С ПШП мягкого типа	С ПШП среднего типа
Площадь контакта подошвы штампа с балластом, %	9	20	20
Контактные напряжения, МПа	3,61	1,63	1,63

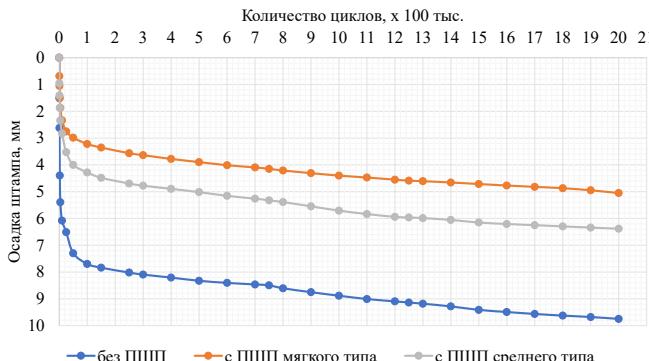


Рис. 6. График осадки штампа [выполнено авторами].

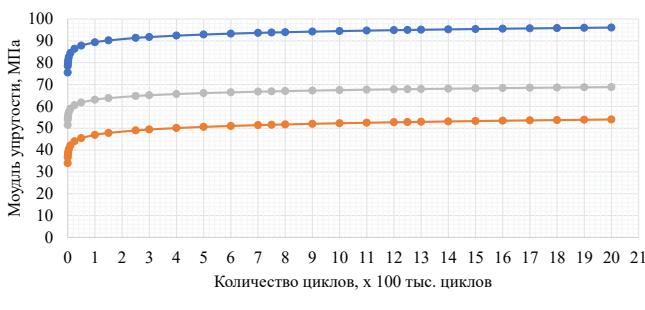


Рис. 7. Изменение модуля упругости модели [выполнено авторами].

граней зерен щебня. Вследствие этого можно сделать вывод о том, что ПШП оказывают влияние на состояние щебня за счет уменьшения около острых граней, который получается благодаря распределению напряжений на большую площадь.

Для определения контактных напряжений в балласте были измерены площади контакта зерен щебня по нижней поверхности шпалы, которые определялись при помощи растрогового метода. Величины площадей контакта и контактных напряжений представлены в табл. 3.

Результат показал, что при применении подшпаловых прокладок площадь контакта щебня со шпалой увеличилась в 2,20 раза, а, следовательно, контактные напряжения упали во столько же раз. Соответственно данное снижение напряжений повлечет за собой уменьшение около острых граней зерен щебня, их переупаковку, а, следова-

тельно, повысит стабильность железнодорожного пути в вертикальной плоскости.

Кроме приведенных данных по накоплению величины остаточных осадок для каждой модели было определено изменение модуля упругости пути в течение эксперимента по формуле (1):

$$U = \frac{\alpha \omega C}{l}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент изгиба шпал, т.е. отношение средней осадки шпалы к ее осадке под рельсом;

$\omega$  – площадь полушпалы;

$C$  – коэффициент постели шпалы;

$l$  – расстояние между шпалами.

В свою очередь коэффициент постели шпалы  $C$  вычислялся по формуле (2):

$$C = \frac{\Delta F}{\Delta y_{\omega}}, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – среднее приращение нагрузки на полушпалу;





Ду – соответствующее приращение перемещения.

В формуле (1) коэффициент изгиба  $\alpha$  для штампа был принят равным 1, площадь полу-шпалы  $\omega$  была принята равной 0,125 м (площадь подошвы штампа), а расстояние между шпалами соответствует эпюре 1840 шт./км.

В формуле (2)  $\Delta F$  является разницей между максимальной и минимальной нагрузкой, прикладываемой к штампу, а величина  $\Delta u$  была получена экспериментально и является разницей в перемещении штампа при минимальном и максимальном значениях прикладываемой силы.

На рис. 7 представлен график изменения модуля упругости пути для каждой модели, вычисленного по формуле (1) в течение всего эксперимента.

Из графика видно, что модель без подшпалой прокладки имеет модуль упругости близкий к 100 МПа, что согласуется с данными, приведенными в Методике<sup>2</sup> для железнодорожного пути на железобетонных шпалах. Анализируя график, можно сказать, что использование мягких прокладок уменьшает модуль упругости пути практически в два раза и приближает его к пути на деревянных шпалах, который считается оптимальным для взаимодействия пути и подвижного состава.

## ВЫВОДЫ

Поставленный эксперимент подтвердил заявленную гипотезу о снижении остаточных осадок балластного слоя при применении ПШП. При этом после 2 млн циклов нагружений величина остаточной осадки балластного слоя уменьшилась в 1,5 раза при ПШП среднего типа и в 1,9 при ПШП мягкого типа.

Площадь контакта между подошвой железобетонного штампа и зернами щебня при применении ПШП возросла примерно в два раза, что во столько же раз снизило контактные напряжения на щебень и соответственно уменьшило риск его истирания.

Величина модуля упругости пути в эксперименте для модели без ПШП получена

близкой к величине аналогичного модуля, принимаемого в расчетах по Методике<sup>2</sup>, что указывает на корректность результатов эксперимента.

Модуль упругости пути при применении ПШП мягкого типа снизился до величин модуля упругости деревянных шпал, который считается оптимальным для взаимодействия пути и подвижного состава.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Кореньков Д. А., Иванников М. А., Загитов Э. Д. Требования к перспективным элементам инфраструктуры, ремонту и обслуживанию // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 1. – С. 2–4. EDN: ALXGAR.
- Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. – М: Транспорт, 1965. – 183 с.
- Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 589 с. ISBN 5-94628-112-7.
- Федулов В. Ф. О накоплении остаточных деформаций щебеночной призмы на пути с железобетонными шпалами: сборник научных трудов // ВНИИЖТ. – 1961. Вып. 217: Стабилизация щебеночного основания ж.д. пути. – С. 107–115.
- Барабошин В. Ф., Ананьев Н. И. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка. – М: Транспорт, 1978. – 45 с.
- Подшпальные прокладки в пути на балласте // Железные дороги мира. – 2011. – № 8. – С. 74–77. EDN: OKKJNX.
- Шафрановский А. К. Выправка пути в заключительной стадии стабилизации щебеночной призмы // Тр. ВНИИЖТ. – 1961. – Вып. 217. – С. 71–98.
- Желнин Г. Г., Кузнецов В. В. Снижение динамического воздействия на путь в стыках // Сб. научных трудов третьей научно-практ. конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – М.: МИИТ, 2000. – С. 6–10.
- Каплин В. Н. Текущее содержание пути в зоне рельсовых стыков на особо грунтопроявленных линиях с применением упругих подшпальных прокладок // Дисс... канд. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2022. – 126 с. [Электронный ресурс]: [https://www.miit.ru/content/Текущее%20содержание%20пути%20на%20особо%20грунтопроявленных%20линиях%20с%20применением%20упругих%20подшпальных%20прокладок.pdf?id\\_wm=901547&ysclid=m8q13sk2lj563484604](https://www.miit.ru/content/Текущее%20содержание%20пути%20на%20особо%20грунтопроявленных%20линиях%20с%20применением%20упругих%20подшпальных%20прокладок.pdf?id_wm=901547&ysclid=m8q13sk2lj563484604). Доступ 28.09.2024.
- Ашпиз Е. С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические решения и практическое применение // Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2002. – 396 с. EDN: NMEFL.
- Федоров В. И. Прогноз прочности и склонности оснований из обломочно-глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1988. – 128 с. ISBN 5-274-00107-6.
- Альбрехт В. Г., Золотарский А. Ф. Современные конструкции верхнего строения пути. – М.: Транспорт, 1975. – 279 с.

### Информация об авторах:

**Дылён Егор Олегович** – аспирант кафедры пути и путевого хозяйства Российской университета транспорта, Москва, Россия, dylev.egor@mail.ru.

**Ашпиз Евгений Самулович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Российской университета транспорта, Москва, Россия, geonika@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 21.08.2024, одобрена после рецензирования 10.10.2024, принята к публикации 18.11.2024.