

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.142:625.141

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>

Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками



Егор ДЫЛЁВ



Евгений АШПИЗ

Егор Олегович Дылёв¹,
Евгений Самуилович Ашпиз²

^{1, 2}Российский университет транспорта,
Москва, Россия.

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

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

✉ ¹ dylev.egor@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

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., Ашпиз 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 особогруженонапряженным линиям¹, 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 подшпального 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 деформаций

ций за счет переупаковки зерен и окола 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 улучшит условия контакта частиц щебня с подошвой шпалы, уменьшит его дробимость и истирание.

¹ СП 119.13330.2012 Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095541?ysclid=m7endu1tqq310261972>. Доступ 21.08.2024.

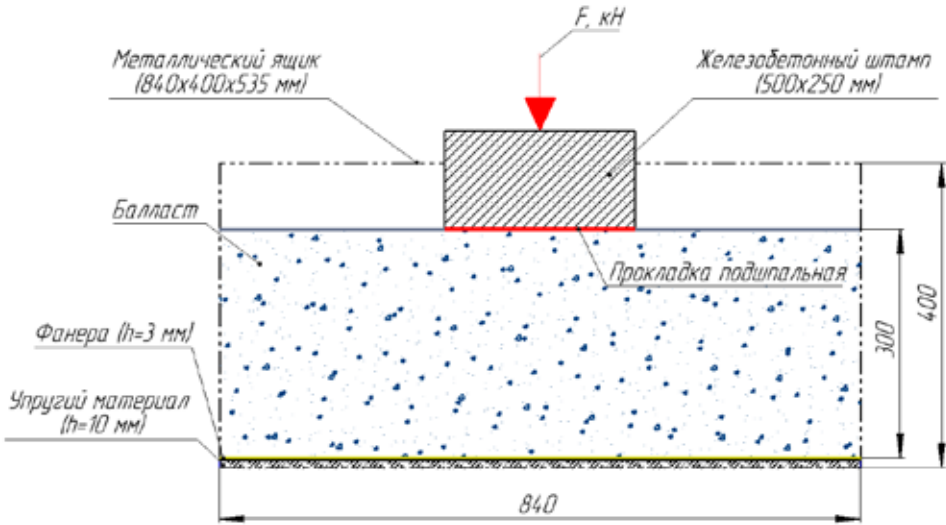


Рис. 1. Схема устройства лабораторной модели [выполнено авторами].



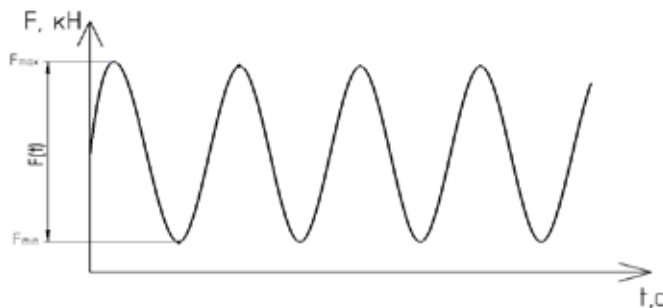


Рис. 2. График приложения нагрузки к модели. $F_{\max} = 40,63 \text{ кН}$; $F_{\min} = 4,06 \text{ кН}$ [выполнен авторами].

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 в стыковых зонах. В частности, в работе В. Н. Каплина [9] подтверждена технико-экономическая эффективность применения ПШП при выправке пути в стыках.

На современном этапе повышения поездной нагрузки на путь необходимо исследовать вопрос эффективности применения ПШП и вне зоны стыков, 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 7392². 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

² 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?ysclid=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 под-
типа ШЗ-Д 4х10. Фото собранной модели
приведено на рис. 3.

В момент проведения самого экспери-
мента к модели прикладывалась нагрузка так
же, как и во время уплотнения, согласно
рис. 2. Максимальная сила позволяет достичь
допустимых напряжений под подошвой
шпалы от вагонов, равных 325 кПа. Данное
значение напряжений установлено в Методи-
ке оценки воздействия подвижного состава
на путь по условиям обеспечения надежно-
сти³ (далее – Методика).

Количество циклов в эксперименте со-
ставляло 2 млн.

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

³ 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. Доступ 27.08.2024.

Было выполнено три эксперимента, кото-
рые 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 моде-
лей происходила согласно представленному
выше описанию.

ПШП изготовлены из полиолефинового
материала, толщиной 10 мм и с распределен-
ным статическим модулем упругости
0,14 Н/мм³ (мягкого типа) и 0,24 Н/мм³ (сред-
него типа).

Типы ПШП соответствуют техническим
требованиям ЦДИ.02.2020⁴.

Результаты лабораторного эксперимента

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

⁴ Прокладки подшпальные. 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 окончании 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 окола 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
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

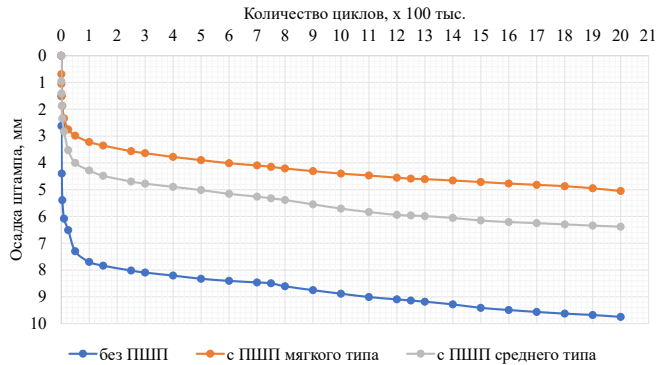


Рис. 6. График осадки штампа [выполнено авторами].

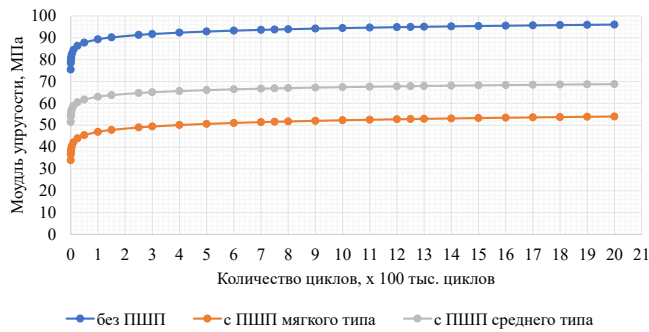


Рис. 7. Изменение модуля упругости модели [выполнено авторами].

граней зерен щебня. Вследствие этого можно сделать вывод о том, что ПШП оказывают влияние на состояние щебня за счет уменьшения окола 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 растрового метода. Величины площадей контакта и контактных напряжений представлены в табл. 3.

Результат показал, что при применении подшпальных 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 околостранных 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):

$$U = \frac{\alpha \omega C}{l}, \tag{1}$$

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

ω – площадь полушпалы;
 C – коэффициент постели шпалы;
 l – расстояние между шпалами.

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

$$C = \frac{\Delta F}{\Delta y_{\omega}}, \tag{2}$$

где ΔF – среднее приращение нагрузки на полушпалу;





Δu – соответствующее приращение перемещения.

В формуле (1) коэффициент изгиба α для штампа был принят равным 1, площадь полушпалы ω была принята равной 0,125 м (площадь подошвы штампа), а расстояние между шпалами соответствует эпюре 1840 шт./км.

В формуле (2) ΔF является разницей между максимальной и минимальной нагрузкой, прикладываемой к штампу, а величина Δu 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 подшпальной прокладки имеет модуль упругости близкий к 100 МПа, что согласуется с данными, приведенными в Методике² 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 Методике², 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

1. 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.
2. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1965. – 183 с.
3. 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.
4. 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.
5. Барабошин В. Ф., Ананьев Н. И. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка. – М.: Транспорт, 1978. – 45 с.
6. Подшпальные прокладки в пути на балласте // Железные дороги мира. – 2011. – № 8. – С. 74–77. EDN: OKKJNX.
7. Шафрановский А. К. Выправка пути в заключительной стадии стабилизации щебеночной призмы // Тр. ВНИИЖТ. – 1961. – Вып. 217. – С. 71–98.
8. 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.
9. Каплин В. Н. Текущее содержание пути в зоне рельсовых стыков на особо грузонапряженных 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%20грузонапряженных%20линиях%20с%20применением%20упругих%20подшпальных%20прокладок.pdf?id_wm=901547&ysclid=m8q13sk2lj563484604. Доступ 28.09.2024.
10. Ашпиз Е. С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические решения и практическое применение // Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2002. – 396 с. EDN: NMEFJL.
11. Федоров В. И. Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1988. – 128 с. ISBN 5-274-00107-6.
12. Альбрехт В. Г., Золотарский А. Ф. Современные конструкции верхнего строения пути. – М.: Транспорт, 1975. – 279 с.

Информация об авторах:

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

Ашпиз Евгений Самуилович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Российского 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.