

УДК 625.141.1

Стендовые испытания полномасштабных моделей балластной призмы железнодорожного пути при различной степени загрязнения щебня угольной пылью

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Качалкин А. В., Колос А. Ф. Стендовые испытания полномасштабных моделей балластной призмы железнодорожного пути при различной степени загрязнения щебня угольной пылью // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 656–667. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-656-667

Аннотация

Цель: исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластной призме при различном уровне ее загрязнения угольной пылью с последующим определением срока службы балласта. **Методы:** проведение стендовых динамических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы. Циклическая нагрузка, имитирующая воздействие от тяжеловесного подвижного состава, передавалась на балластный слой через железобетонную полушпалу с установленным на ней рельсом типа Р65. В ходе испытаний регистрировались осадки полушпалы по мере увеличения количества циклов приложенной нагрузки. **Результаты:** увеличение степени загрязнения щебня угольной пылью в увлажненном состоянии сопровождается более интенсивным ростом остаточных деформаций в балластном слое. **Практическая значимость:** исследование дает возможность оценить влияние загрязнения щебеночного балласта угольной пылью на интенсивность накопления остаточных деформаций пути, что позволяет решить задачу по определению срока службы щебеночного балласта.

Ключевые слова: железнодорожный путь, щебеночный балласт, угольная пыль, тяжеловесный состав, засорение и загрязнение, остаточная деформация, срок службы, стендовые динамические испытания

Введение

Балластный слой железнодорожного пути должен обеспечивать вертикальную и горизонтальную устойчивость рельсошпальной решетки при воздействии нагрузок, возникающих от движущегося подвижного состава. Применение материалов для балластного слоя, имеющих недостаточную несущую способность, может привести к неравномерным осадкам, толчкам и перекосам пути [1]. В настоящее время применяемым материалом для балластной призмы железнодорожного пути

является щебень из твердых горных пород. На ранее уложенных путях можно встретить балластный слой из сортированного гравия или асбеста, однако в настоящее время данные материалы почти не применяются и при проведении реконструкции либо капитального ремонта пути они должны быть заменены на щебень [2, 3]. Переход на щебеночный балласт связан с тем, что он обладает более высокой прочностью, а также хорошими фильтрационными свойствами по сравнению с гравием и асбестом [4].

Однако длительность службы балластного слоя зависит не только от правильного выбора материала, но и от его состояния, в частности от уровня засорения и загрязнения [5]. Из [4, 6] известно, что при эксплуатации железнодорожного пути в балластном слое появляются как внутренние засорители и загрязнители (продукты собственного дробления), так и внешние, которые попадают в балласт из-за просыпания и протечек перевозимых грузов (например, угольной пыли, мазута, локомотивного песка и других веществ).

Загрязнение щебеночного балласта сопровождается ростом его водоудерживающей способности (влажности). В исследовании [7] установлено, что ввиду своей большой пористости чистый щебень практически не аккумулирует воду, в связи с чем его максимальная водоудерживающая способность составляет не более 1 %. Загрязнение щебня мелким песком (с размером фракций 0,1–0,5 мм) в количестве 40 % по массе приводит к увеличению его водоудерживающей способности до 7,2 %. А при загрязнении балластного слоя в таком же количестве угольной пылью (с размером фракций менее 0,1 мм) влажность щебня достигает 19 %.

Повышение влажности загрязненного щебеночного балласта приводит к интенсивному снижению его прочностных и деформационных свойств. Xu Zhang и др. [8] провели прочностные испытания на сдвиг с образцами щебня, загрязненными сухим песком, а также с образцами, загрязненными угольной пылью. Результаты показали, что угол внутреннего трения уменьшается незначительно с увеличением содержания сухого загрязнителя в образцах. Так, при загрязнении песком угол внутреннего трения в среднем снижался на 4 %, а при загрязнении угольной пылью — на 8 %.

В исследовании [9] было установлено, что наиболее существенное снижение прочност-

ных свойств загрязненного щебеночного балласта происходит, когда степень его водонасыщения $S_r > 0,80$, при таком состоянии грунтов балластного слоя угол внутреннего трения в среднем снижается на 7–10 %, а удельное сцепление — на 35–48 %.

Что касается деформационных свойств щебеночного балласта, то в работе [10] было установлено, что модуль упругости E_{ur} для чистого щебеночного балласта практически не зависит от влажности и составляет 200–275 МПа как в сухом, так и во влажном состоянии. Для загрязненной балластной призмы наблюдается иная тенденция. Так, при наличии в зерновом составе щебня-загрязнителя в сухом состоянии модуль упругости балласта достигает 340–380 МПа, что в 1,7 раза больше, чем у чистого щебня. Авторы объясняют данное явление снижением пористости балласта за счет заполнения пор загрязнителем и, соответственно, увеличением плотности. Однако наличие влаги ведет к значительному снижению модуля упругости до значений 135–170 МПа, что свидетельствует об увеличении упругих деформаций в балластном слое. Это согласуется с выводами, полученными в работах [9, 11, 12].

Из вышесказанного следует, что прочностные и деформационные характеристики щебня напрямую зависят от уровня его засорения и загрязнения, вида загрязнителя и засорителя, а также их влажности. При снижении механических свойств щебеночного балласта как сыпучего материала процесс накопления остаточных деформаций в балласте под шпалой будет интенсифицироваться.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что существует большое количество работ, посвященных изучению физико-механических свойств щебеночного балласта при различном уровне его засорения и загрязнения. При этом практически нет

исследований, как будет изменяться процесс накопления остаточных деформаций в щебеночном балласте при различных уровнях его загрязнения угольной пылью в увлажненном состоянии, что характерно для условий эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Это затрудняет выбор наиболее подходящих разработанных математических моделей для прогнозирования остаточных деформаций и, соответственно, усложняет решение задачи по определению срока службы щебеночного балласта.

В связи с вышеизложенным представляет научный и практический интерес изучение процесса накопления остаточных деформаций с нагрузкой тоннажа в полномасштабной модели балластной призмы при различных уровнях загрязнения щебня угольной пылью в увлажненном состоянии.

Материалы для исследования

Для формирования балластной призмы был выбран гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392-2014 [13] со следующими параметрами гранулометрического состава:

$$d_{50} = 42 \text{ мм}; C_u = 1,63; C_c = 0,94,$$

где C_u — коэффициент неоднородности гранулометрического состава, определяемый по формуле (1);

d_{50} — средний диаметр частиц, определяемый по кривой фактического гранулометрического состава как диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 50 % по массе зерен;

C_c — коэффициент, характеризующий форму кривой гранулометрического состава, определяемый по формуле (2).

Гранулометрический состав щебня, используемого в данных испытаниях, представлен на рис. 1:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (1)$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 60 и 10 % по массе зерен, мм.

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}, \quad (2)$$

где d_{60} , d_{30} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 60, 30 и 10 % по массе зерен, мм.

Согласно [14, 15], уголь занимает одно из ведущих мест среди грузов, перевозимых железнодорожным транспортом в России, и зачастую балластный слой железнодорожного пути оказывается загрязненным угольной пылью. По этой причине в настоящих испытаниях загрязнение балластной призмы осуществлялось с использованием угольной пыли фракции менее 0,1 мм 100 % по массе.

Применяемое оборудование для проведения испытаний

Испытания полномасштабных моделей балластной призмы проводились в Механической лаборатории им. профессора Н. А. Белелюбского в ПГУПС на стендовой установке (пульсаторе) Amsler HB 250 (рис. 2). Данная установка позволяет моделировать циклическое воздействие от подвижного состава.

Программа и методика проведения испытаний

Исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластном слое при различном уровне его загрязнения проводилось на двух моделях, каждая из которых представляла собой половину балластной призмы со следующими геометрическими характеристиками: ширина плеча балластной призмы

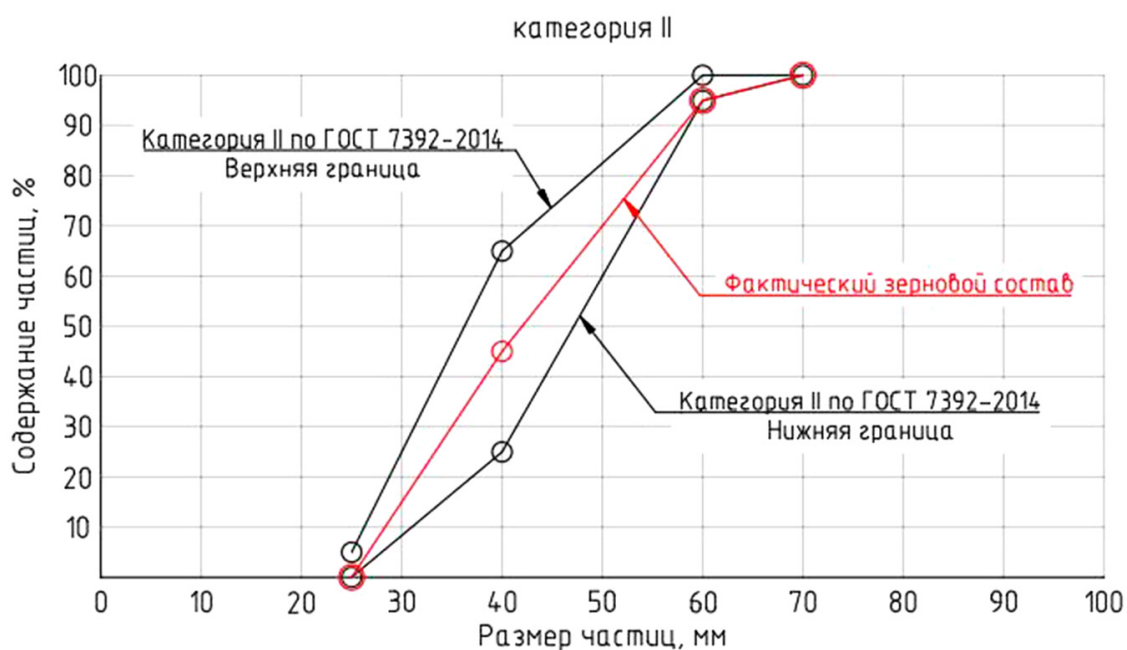


Рис. 1. Гранулометрический состав гранитного щебня II категории, применяемого в данном исследовании

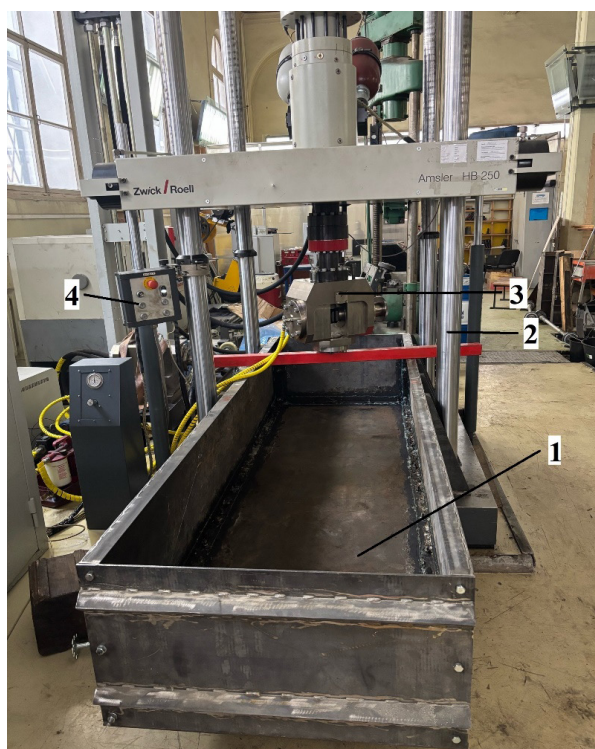


Рис. 2. Стендовая установка (пульсатор) Amsler HB 250: 1 — металлический ящик размером $2700 \times 1000 \times 500$ мм, в котором устраивается модель балластной призмы; 2 — рама; 3 — нагрузочное устройство; 4 — пульт управления

$l = 45$ см, толщина балластного слоя под шпалой $h = 40$ см, крутизна откоса 1:1,5. В первой модели загрязнение щебня угольной пылью составляло 6% по массе, во второй — 18% по массе. При этом влажность щебеночного балласта во всех испытаниях была 6%.

Перед формированием балластной призмы на дно металлического ящика (поз. 1 на рис. 2) укладывался упругий мат толщиной 10 мм с модулем деформации 80 МПа, имитирующий земляное полотно. Далее гранитный щебень, загрязненный угольной пылью, укладывался в металлический ящик и доводился до влажности 6%. Укладка производилась в четыре слоя с уплотнением (рис. 3). Высота каждого слоя не превышала 10 см, а уплотнение производилось вручную до плотности не менее $1,65 \text{ т/м}^3$, что соответствует реальной плотности щебеночного балласта в пути. При достижении требуемой толщины балластного слоя под подошвой шпалы поверхность балласта выравнивалась. На нее укладывалась железо-

бетонная полушпала длиной 1,35 м с установленным на ней рельсом типа Р65. Далее выполнялись работы по засыпке загрязненным и увлажненным щебнем торца шпалы, а также застенного пространства с формированием плеча и откоса балластной призмы. Крутизна откоса контролировалась специально изготовленным шаблоном. Сформированная таким образом конструкция балластной призмы была готова к проведению испытаний (рис. 4).

На следующем этапе через нагрузочное устройство стендовой установки (поз. 3 на рис. 2) передавалась циклическая нагрузка, действующая на рельс со шпалой. Значение вертикальной динамической силы на шпалу Q (кН) определялось в соответствии с [16].

В качестве исходных данных для расчета принималось, что длина поезда — 1050 м, нагрузка на ось полувагона составляет 27 т, количество осей в поезде — 284, скорость движения грузового поезда — 90 км/ч. По результатам расчетов в данных испытаниях нагрузка на



Рис. 3. Послойная отсыпка загрязненного щебня с увлажнением



Рис. 4. Сформированная конструкция загрязненной балластной призмы для проведения испытания

половину шпалы Q , передаваемая через рельс, была принята 75 кН. В результате каждый цикл нагрузки в процессе проведения стендовых циклических испытаний был эквивалентен 27 т брутто пропущенного груза. Продолжительность воздействия подвижного состава на путь при его заданной скорости и длине равна 42 с. С учетом вышеизложенного частота приложения нагрузки в данных испытаниях принималась равной $(284/42) \approx 7$ Гц.

Количество циклов нагрузки к полушпале с установленным на ней рельсом составляло 2 млн для каждой исследуемой модели балластной призмы. В ходе испытаний регистрировались остаточные осадки краев (в четырех точках) железобетонной полушпалы, на основании которых вычислялась ее средняя осадка.

Результаты испытаний и анализ

Результаты стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что увеличение содержания угольной пыли в щебне способствует интенсификации процесса накопления остаточных деформаций в балластном слое. Так, в балластной призме, загрязненной угольной пылью в количестве 6% по массе при влажности 6%, осадка полушпалы составила 12 мм. При загрязнении балластной призмы угольной пылью 18% по массе и той же влажности осадка составила 21 мм, что в 1,8 раза больше по сравнению с 6% загрязнения.

Стоит также отметить, что загрязненный угольной пылью щебеночный балласт (6% по массе) демонстрирует снижение скорости накопления остаточных деформаций после 1,2 млн циклов приложения нагрузки, в то время как при загрязнении 18% по массе остаточные осадки полушпалы происходят гораздо интенсивнее и практически с постоянной скоростью на протяжении всего испытания.

В работе [6] представлены результаты аналогичных циклических стендовых испытаний

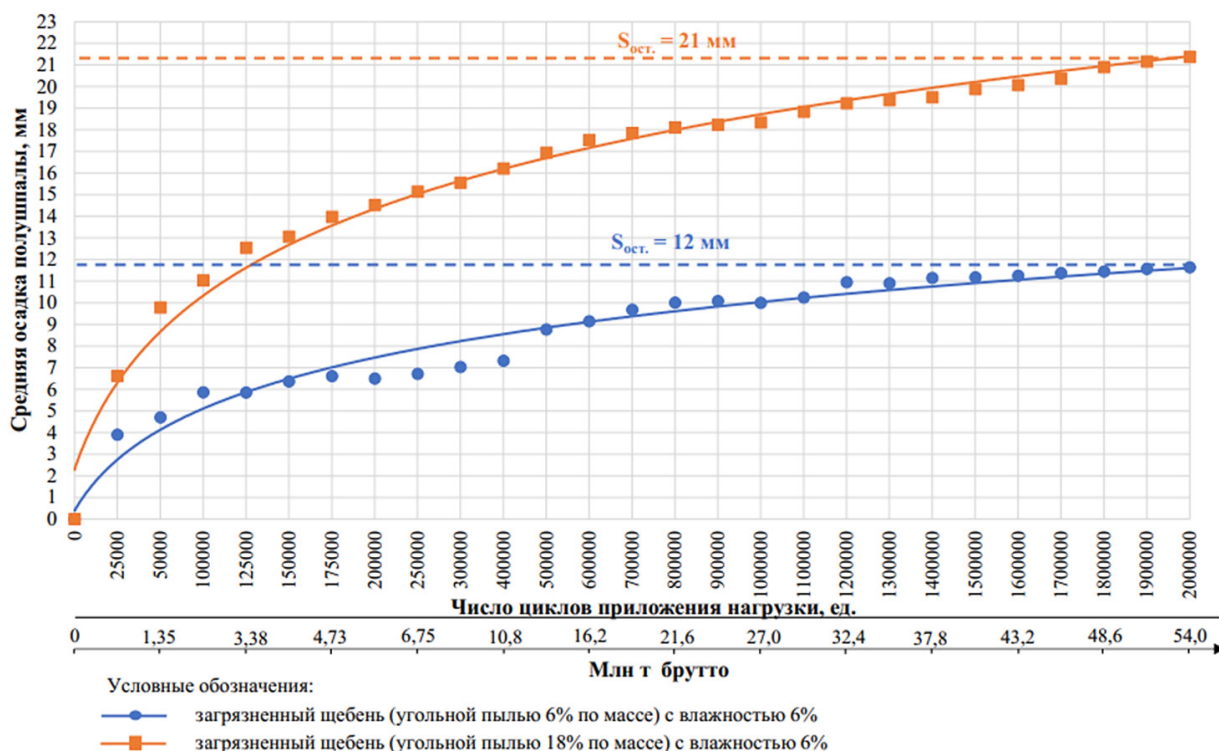


Рис. 5. Результаты стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы, загрязненных угольной пылью

по исследованию накопления остаточных деформаций в полномасштабной модели балластной призмы из чистого щебня II категории по [13] при действии вертикальной динамической нагрузки, эквивалентной 25–27 тс/ось. На рис. 6 сопоставлены результаты настоящей работы с результатами исследования, приведенными в [6].

Анализ рис. 6 показывает, что загрязнение щебня угольной пылью до 6% по массе оказывает незначительное влияние на развитие остаточных деформаций в балласте, так как для чистого щебеночного балласта осадка полушпалы после 2 млн циклов приложения нагрузки составила 11 мм, а в балластной призме с массовой долей загрязнителя (угольной пыли) 6% и при влажности 6% — 12 мм. При этом дальнейшее увеличение содержа-

ния угольной пыли в щебне способствует более интенсивному развитию остаточных деформаций в балластном слое, поскольку загрязнитель забивает поровое пространство и в увлажненном состоянии выступает в роли смазки, тем самым снижая зацепление частиц друг с другом.

На сегодняшний день в нормативной литературе [2, 3, 17] отсутствуют регламенты, касающиеся допускаемых остаточных деформаций в балластном слое железнодорожного пути. В инструкции [18] приводятся нормативы в части отступлений геометрии рельсовой колеи по уровню (перекосы и плавные отклонения уровня), а также просядок рельсовых нитей в вертикальной плоскости. Отступления I, II степени не требуют ограничения скоростей движения поездов и могут быть устранены в плановом

порядке. Отступления III и IV степени угрожают безопасности движения поездов и должны устраняться незамедлительно. Так, например, на рис. 7 в соответствии с [3] представлена схема проведения ремонтных работ для железнодорожных линий, имеющих специализацию «особогрузонапряженная».

Участки железнодорожных путей с большим количеством отступлений II степени требуют проведения планово-предупредительной выправки. Согласно инструкции [18], отступлением II степени являются просадки величиной 13 мм и более. Предположим, что вследствие загрязнения щебеночного балласта угольной

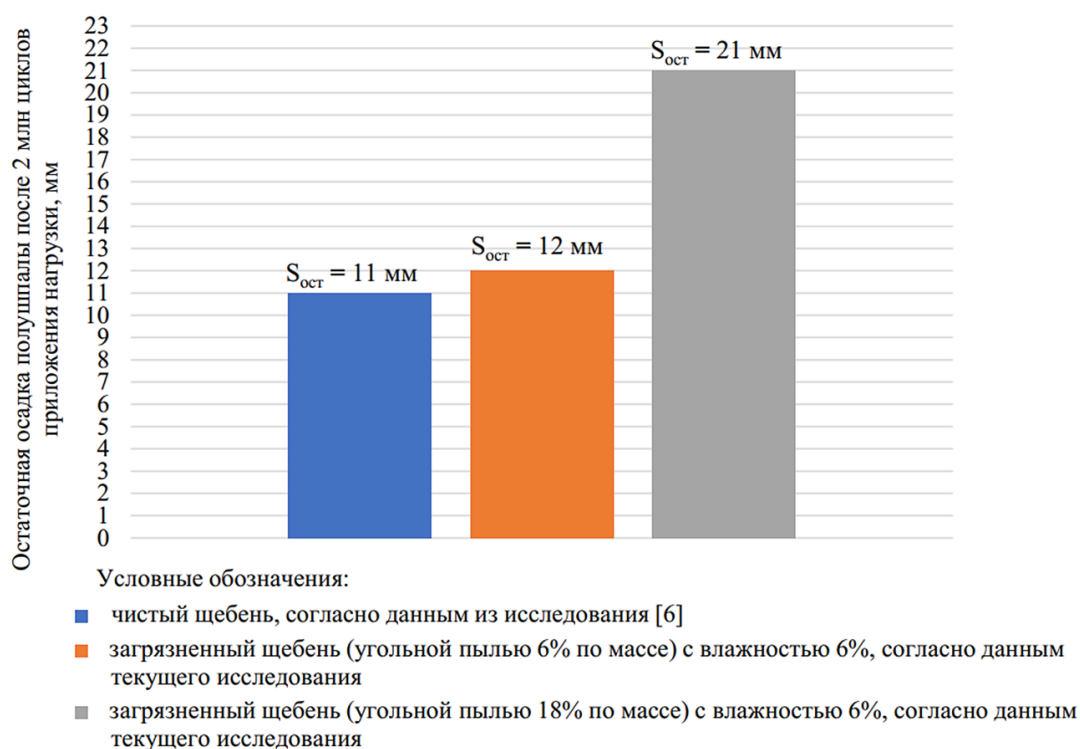


Рис. 6. Сопоставление результатов испытаний различных моделей балластной призмы

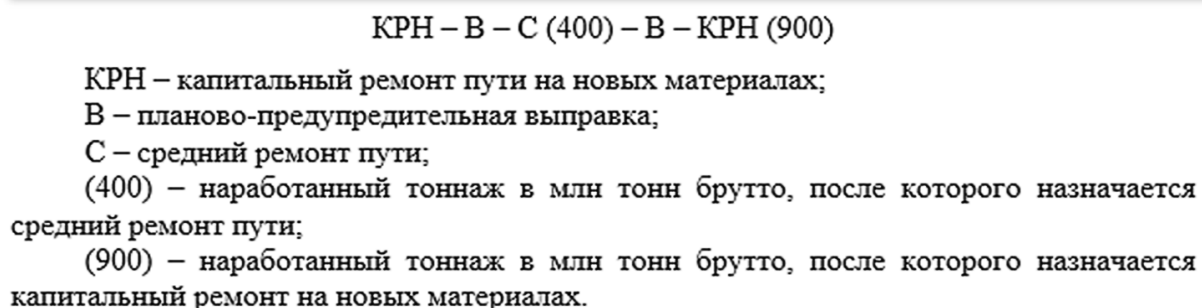


Рис. 7. Схема ремонтных работ для железнодорожных линий, имеющих специализацию «особогрузонапряженная» [3]

пылью в пути образуются неравномерные просадки. Тогда из рис. 5 можно установить, что для балластной призмы с массовой долей угольной пыли 6 % и влажности 6 % при обращении поездов с нагрузками 27 т/ось проведение планово-предупредительной выправки в пределах первых 54,0 млн т брутто не потребуется. В то же время для балласта, загрязненного угольной пылью в количестве 18 % по массе, планово-предупредительную выправку следует проводить уже после наработки тоннажа 4,1 млн т брутто.

Согласно представленной на рис. 7 схеме выполнения ремонтных работ, средний ремонт пути, в рамках которого осуществляется очистка или замена балласта, выполняется после наработки 400 млн т брутто, однако появление отступлений III степени может потребовать его проведения значительно раньше. Так, по данным рис. 5, при загрязнении балласта угольной пылью 18 % по массе и наработке тоннажа 40,5 млн т брутто просадки достигают более 20 мм, что является отступлением III степени и в связи с чем средний ремонт пути может быть назначен ранее установленного схемой ремонта.

Заключение

В ходе проведения стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы установлено следующее.

1. Увеличение процентного содержания угольной пыли в щебеночном балласте приводит к росту в нем остаточных деформаций. Так, в балластной призме с массовой долей угольной пыли 6 % (при общей влажности 6 %) накопленная остаточная осадка полушпалы после 2 млн циклов приложения нагрузки составила 12 мм, а при увеличении степени загрязнения до 18 % — 21 мм.

2. Загрязнение щебеночного балласта угольной пылью до 6 % по массе при общей влажности 6 % оказывает несущественное влияние на развитие остаточных деформаций в балластном слое. Дальнейшее увеличение содержания угольной пыли в щебеночном балласте способствует ускоренному процессу накопления в нем остаточных деформаций.

3. При обращении подвижного состава с осевыми нагрузками 27 т/ось на путях с щебеночным балластом, загрязненным угольной пылью в количестве 18 % по массе и общей влажностью 6 %, планово-предупредительную выправку следует проводить уже после наработки тоннажа 4,1 млн т брутто.

4. Загрязнение балластной призмы угольной пылью в количестве 18 % по массе при влажности 6 % может приводить к сокращению срока эксплуатации пути до проведения среднего ремонта с 400 млн т брутто до 40,5 млн т брутто.

Принимая во внимание вышесказанное, можно заключить, что для обеспечения безопасного движения поездов с установленными скоростями в течение заданного срока службы верхнего строения пути необходимо контролировать состояние балластного слоя, в частности степень засоренности и загрязненности, а также своевременно проводить работы по его очистке или замене.

Список источников

1. Варызгин Е. С. Содержание балластной призмы железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1978. 142 с.
2. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. М., 2024.
3. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2021 №2888/р.

4. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 183 с.
 5. Непомнящий Н. В., Косенко С. А. Анализ работы балластного слоя железнодорожного пути при длительной эксплуатации // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 43–8. С. 52–56.
 6. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 3. С. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575
 7. Игошев И. С., Колос А. Ф. Водоудерживающая способность гранитного щебня // Путь и путевое хозяйство. 2025. № 12. С. 12–16.
 8. A Comparison on the Effects of Coal Fines and Sand Fouling on the Shear Behaviors of Railway Ballast Using Large Scale Direct Shear Tests / X. Zhang [et al.] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2025. Vol. 12. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.09.003
 9. Колос А. Ф. Несущая способность и деформируемость балластного слоя при эксплуатации железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. 637 с.
 10. Use of Seismic Surface Wave Testing to Assess Track Substructure Condition / T. R. Sussmann [et al.] // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1250–1255.
 11. Laboratory Study of the Failure Characteristics of Fouled Ballast: Phase II: Final Report DOT/FRA/ORD-20/04 / A. K. Rohrman [et al.]. Washington, U.S.: Department of Transportation, 2020. 83 p.
 12. Estaire J., Cuellar V., Santana M. Track Stiffness in a Ballast Track Fouled with Desert Sand. 2017.
 13. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
 14. Такайшвили Л. Н. Восточный полигон железных дорог России для экспорта российского угля: перспективы развития и ограничения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 12. С. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502
 15. Хусаинов Ф. И., Ожерельева М. В. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 4 (83).
 16. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706/р. М.: ОАО «РЖД», 2017. 97 с.
 17. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288/р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 286 с.
 18. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р (в ред. от 09.11.2020 с изм. от 01.04.2021).
- Дата поступления: 10.06.2026
Решение о публикации: 03.07.2026
- Контактная информация:**
КАЧАЛКИН Андрей Вячеславович — аспирант;
andrew.kachalkin1999@mail.ru
КОЛОС Алексей Федорович — доктор техн. наук,
профессор; kolos2004@inbox.ru

Large-Scale Box Tests of Ballast Layer with Varying Degrees of Coal Dust Contamination of Crushed Stone

A. V. Kachalkin, A. F. Kolos

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kachalkin A. V., Kolos A. F. Large-Scale Box Tests of Ballast Layer with Varying Degrees of Coal Dust Contamination of Crushed Stone // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 656–667. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-656-667 (In Russian)

Abstract

Objective: to investigate the process of accumulation of residual deformations in a ballast prism with different levels of contamination with coal dust, followed by determination the ballast service life. **Methods:** the achievement of the research objective was carried out through large-scale box tests of ballast layer. Cyclic load, simulating the impact of heavy freight train, was transmitted on the ballast layer through reinforced-concrete half-sleeper with rail (R65) installed on it. During the tests, the residual settlement of half-sleeper was recorded as a function of the number of applied load cycles. **Results:** the results of conducted studies showed that increasing the level of crushed stone contamination with coal dust in wet state is accompanied by more intensive growth of residual deformations in the ballast layer. **Practical importance:** the results of the study make it possible to evaluate the impact of coal dust contamination of crushed stone on the intensity of accumulation of residual deformations of the track, which makes it possible to solve the problem of determining the service life of ballast layer.

Keywords: railway track, crushed-stone ballast, coal dust, heavy freight train, clogging and pollution, residual deformation, service life, large-scale box tests

References

1. Varyzgin E. S. Soderzhanie ballastnoj prizmy zheleznodorozhnogo puti [The Content of the Railway Track Ballast Prism], Moscow, Transport, 1978, 142 p. (In Russian)
2. SP 119.13330.2024. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [SP 119.13330.2024. Railways with a Gauge of 1520 mm], Moscow, 2024. (In Russian)
3. Pravila naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti [Rules for Scheduling Railway Track Repairs], approved by Order of JSC RZD, dated December 17, 2021, no. 2888/r. (In Russian)
4. Popov S. N. Ballastnyj sloj zheleznodorozhnogo puti [The Ballast Layer of the Railway Track], Moscow, Transport, 1965, 183 p. (In Russian)
5. Nepomnyashchij N. V., Kosenko S. A. Analiz raboty ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti pri dlitel'noj ekspluatatsii [Analysis of the Operation of the Railway Track Ballast Layer under Long-Term Operation], *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], 2018, no. 43–8, pp. 52–56. (In Russian)
6. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Contamination and Pollution of Crushed Stone Ballast during Railway Track Operation], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg Transport University], St. Petersburg: Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 558–575. DOI: 10.20295/1815588X20223558575 (In Russian)
7. Igoshev I. S., Kolos A. F. Vodoudерживayushchaya sposobnost' granitnogo shchebnya [Water

Retention Capacity of Granite Crushed Stone], *Put' i putevoe hozyajstvo [Track and Track Facilities]*, 2025, no. 12, pp. 12–16. (In Russian)

8. Zhang X., et al. A Comparison on the Effects of Coal Fines and Sand Fouling on the Shear Behaviors of Railway Ballast Using Large Scale Direct Shear Tests, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2025, vol. 12. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.09.003

9. Kolos A. F. Nesushchaya sposobnost' i deformiruemost' ballastnogo sloya pri ekspluatacii zheleznodorozhnogo puti [Bearing Capacity and Deformability of the Ballast Layer during Railway Track Operation]. Doctor of Engineering Sciences diss. St. Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024, 637 p. (In Russian)

10. Sussmann T. R., et al. Use of Seismic Surface Wave Testing to Assess Track Substructure Condition, *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 155, pp. 1250–1255.

11. Rohrman A. K., et al. Laboratory Study of the Failure Characteristics of Fouled Ballast. Phase II: Final Report DOT/FRA/ORD20/04, Washington, U.S., Department of Transportation, 2020, 83 p.

12. Estaire J., Cuellar V., Santana M. Track Stiffness in a Ballast Track Fouled with Desert Sand, 2017.

13. GOST 7392-2014. Shcheben' iz plotnyh gornyh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya [GOST 7392-2014. Crushed Stone from Dense Rocks for the Railway Track Ballast Layer. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2015, 32 p. (In Russian)

14. Takaishvili L. N. Vostochnyj poligon zheleznih dorog Rossii dlya eksporta rossijskogo uglya: perspektivy razvitiya i ogranicheniya [The Eastern Polygon of Russian Railways for Russian Coal Exports: Development Prospects and Constraints], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engi-*

neering], 2023, vol. 334, no. 12, pp. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502 (In Russian)

15. Khusainov F. I., Ozherel'eva M. V. Perevozki uglya i neftenalivnyh грузов zheleznodorozhnym transportom: tekushchee sostoyanie i perspektivy [Coal and Oil Cargo Transportation by Railway: Current State and Prospects], *Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal on Science, Practice, and Economics]*, 2019, no. 4 (83). (In Russian)

16. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti [Methodology for Assessing the Impact of Rolling Stock on the Track in Terms of Ensuring Reliability], approved by Order of JSC Russian Railways, no. 2706/r, dated December 22, 2017, Moscow, JSC Russian Railways, 97 p. (In Russian)

17. Instrukciya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti [Instruction for the Routine Maintenance of the Railway Track], approved by Order of JSC Russian Railways, dated November 14, 2016, no. 2288/r, Moscow, JSC Russian railways, 2016, 286 p. (In Russian)

18. Instrukciya po ocenke sostoyaniya rel'sovoj kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov [Instruction for Assessing the Condition of the Track Gauge Using Track Measuring Equipment and Measures to Ensure Train Traffic Safety], approved by Order of JSC Russian Railways, dated February 28, 2020, no. 436/r (as amended on November 9, 2020, with changes dated April 1, 2021). (In Russian)

Received: June 10, 2026

Accepted: July 03, 2026

Author's information:

Andrey V. KACHALKIN — Postgraduate Student; andrew.kachalkin1999@mail.ru

Aleksey F. KOLOS — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kolos2004@inbox.ru