

УДК 625.141

Влияние технологий стабилизации на деформационные характеристики балластной призмы железнодорожного пути

Д. Н. Сомов¹, А. В. Петряев¹, И. Л. Парахненко², Н. И. Тенирядко³

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

³Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Сомов Д. Н., Петряев А. В., Парахненко И. Л., Тенирядко Н. И. Влияние технологий стабилизации на деформационные характеристики балластной призмы железнодорожного пути // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 135–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-135-148

Аннотация

Цель: Целью работы являлась оценка эффективности двух методов стабилизации балластной призмы железнодорожного пути: технологии послойного уплотнения балласта и армирования балластного слоя георешеткой. **Методы:** Для проведения исследований была создана модель балластной призмы, на которой проводились динамические испытания, имитирующие воздействие проходящего поезда. В ходе экспериментов измерялись осадки балластной призмы при использовании каждой из рассматриваемых технологий, а также в контрольном варианте без применения каких-либо дополнительных мер. **Результаты:** Результаты демонстрируют влияние каждой технологии на деформационные характеристики балластной призмы и позволяют оценить их эффективность в снижении осадок и повышении общей стабильности железнодорожного пути. В частности, показано, что применение георешетки и послойного уплотнения приводит к значительному уменьшению вертикальных деформаций по сравнению с неармированным балластом. **Практическая значимость:** Полученные выводы имеют важное значение для оптимизации конструктивных решений при строительстве и реконструкции железнодорожных путей и могут способствовать повышению их надежности и долговечности.

Ключевые слова: Балластная призма, динамическая нагрузка, стабилизация балласта, послойное уплотнение, осадка, георешетка.

Введение

Железнодорожный балласт, состоящий из щебня, является важным элементом железнодорожного пути. Он обеспечивает устойчивость, вертикальную и боковую поддержку, распределяет нагрузку на основание и обеспечивает дренаж. Повышение нагрузки на железнодорожные пути из-за увеличения грузоперевозок и пассажиропотока приводит к износу и уплотнению балласта, требуя частого обслуживания и увеличивая потребность в новых материалах. Развитие высокоскоростного транспорта также предъявляет повышенные требования к балласту, поскольку он должен обеспечивать стабильность и равномерное распределение нагрузки для обеспечения безопасного и эффективного движения. Согласно [1]

динамика процессов в балластном слое до сих пор изучена недостаточно. Это приводит к значительным и постоянно увеличивающимся расходам на техническое обслуживание железнодорожных путей.

Лобо-Герреро и Вальехо [2] установили, что деформация балластного слоя происходит из-за сложного взаимодействия нескольких процессов, включая осадку, перераспределение частиц, разрушение и износ щебня. Эти процессы, действуя совместно, приводят к общей деформации. Тхакур [3] представил описание аналогичной деградации балластного слоя на участке в Новом Южном Уэльсе, предшествующей техническому обслуживанию.

Механизмы деградации балласта в зависимости от частоты нагрузки изучены недостаточно, равно как и отсутствует модель, учитывающая скорость поезда и разрушение частиц щебня. Это ограничивает возможность проектирования систем пути, которые могли бы безопасно и экономично поддерживать высокоскоростное движение. Для решения этой проблемы требуется изучение поведения балласта при различных частотах и разработка более точной модели циклического уплотнения, которая позволит инженерам более точно прогнозировать затраты на жизненный цикл балласта [3].

Реймонд [4] исследовал влияние армирования балласта на его поведение при многократных нагрузках, изучая армированные и неармированные слои зернистого материала на различных основаниях. Было установлено, что армирование георешеткой уменьшает пластическую деформацию на 13–30 %, особенно на слабых основаниях. Реймонд также предположил, что использование георешетки на железнодорожном пути может увеличить цикл обслуживания с 3 месяцев до 3 лет. Однако следует учитывать, что эксперимент проводился в уменьшенном масштабе с использованием мелкого щебня и относительно крупной георешетки, что могло повлиять на результаты, хотя общие выводы согласуются с другими исследованиями.

Исследования, проводимые в Университете Иллинойса [5], показали, что георешетки могут быть эффективны для армирования балластного слоя, однако их эффективность зависит от состояния балласта. Трехосные испытания с использованием разных типов георешеток показали, что сцепление между георешеткой и балластом снижается при деградации щебня.

Изнашивание железнодорожного балласта под воздействием циклических нагрузок приводит к необходимости его периодической замены. Переработанный балласт — более экономичная альтернатива, однако его значительная осадка ограничивает его применение. В данной работе [6] предлагается решение этой проблемы путем стабилизации переработанного балласта с помощью георешетки. Лабораторные испытания с циклической нагрузкой показали, что армирование улучшает характеристики переработанного балласта, делая его пригодным для использования в железнодорожном строительстве.

В данном исследовании [7] была построена полномасштабная секция железнодорожного пути для сравнения армированного и неармированного балласта. Георешетка, размещенная на глубине 7 дюймов под шпалами, продемонстрировала существенные улучшения: осадка уменьшилась до 1 дюйма в некоторых местах под шпалами, а загрязнение балласта снизилось на 30 % под шпалами и на 20 % на уровне подстилающего грунта. Это свидетельствует о высокой эффективности применения георешетки для усиления балластного слоя. Однако для оптимального использования георешетки необходимо определить ее параметры: размер ячеек, геометрию и количество слоев. В работе [8] представлены результаты исследования влияния количества слоев и размера ячеек георешетки на осадку балласта. Исследование проводилось с помощью лабораторных динамических испытаний, что дает возможность определить оптимальные характеристики для практического применения.

Точность лабораторных испытаний балласта зависит от адекватного моделирования нагрузок и бокового ограничения. Данное исследование [9] разработало и проверило методику, обеспечивающую соответствие лабораторных и полевых условий. Было показано, что уменьшение бокового ограничения увеличивает постоянные деформации и разрушение балласта. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать долговременное поведение балласта и планировать мероприятия по его техническому обслуживанию.

В исследовании [10] была разработана программа штамповых испытаний армированного геоматериалами балласта. Проведение этих испытаний необходимо из-за недостатка надежных данных для оценки влияния геоматериалов на деформации стабилизированного железнодорожного балласта. Основная цель этих испытаний состояла в изучении и оценке влияния различных типов геоматериалов на деформируемость щебня в зависимости от способа армирования и величины эксплуатационных нагрузок.

В работе [11] показано, что георешетка является эффективным решением для уменьшения бокового смещения балласта, подверженного циклическим нагрузкам. Испытания доказали, что георешетка способна эффективно уменьшать боковое смещение, снижать осадку и минимизировать разрушение частиц балласта.

Армирование подбалластного слоя георешеткой обеспечивает более высокую прочность сдвига по сравнению с использованием геомембраны. Более плотный армированный георешеткой подбалластный слой демонстрирует лучшие характеристики в широком диапазоне плотностей, что говорит о большей эффективности использования георешетки [12].

Фишер [13] провел долгосрочное полевое исследование, в котором изучалось влияние различных типов геосинтетического армирования на поведение железнодорожного балласта. В течение более одиннадцати лет на загруженной магистральной линии в Венгрии наблюдалось пять различных видов георешетки. Результаты

испытаний, представленные в статье, включали математико-статистический анализ для сравнения армированных и неармированных участков. На основе анализа были выявлены различия в поведении и износе железнодорожного пути при использовании различных типов геосинтетики. Работа [14] подчеркивает результаты полевых исследований, которые помогли установить количественные показатели эффективности геосинтетического армирования железнодорожного балласта. Эксперименты, проведенные с использованием калиброванной нагрузки, показали, что геосинтетики улучшают стабильность пути сразу после ремонта, и эта стабильность сохраняется с течением времени.

Экспериментальная часть

Материалы

Состав модели для проведения полномасштабных испытаний щебеночного балласта для железной дороги I категории под циклической нагрузкой представлен в табл. 1. В качестве балластного материала был использован базальт с номинальным размером зерен от 22,4 до 63 мм со средней плотностью зерен не менее 2,4 г/см³, получаемый дроблением плотных горных пород с последующим рассевом продуктов дробления.

ТАБЛИЦА 1. Состав модели для испытаний

Размер ячейки квадратного сита, мм	Частный остаток, % по массе
63	—
50	30
45	25
40	20
30	13
25	7
20	3
10	2
5	—

Геосинтетический материал представлен георешеткой (рис. 1), состоящей из соединенных между собой элементов, образующих ячейки в форме треугольников и шестиугольников.



Рис. 1. Георешетка. Автор: Д. Н. Сомов

Лабораторное оборудование

Лабораторные испытания по оптимизации параметров балластной призмы проводятся на испытательной машине (пульсаторе) Amsler HB 250 (рис. 2). Нагрузка на половину балластной призмы прикладывается через железобетонный штамп, представляющий собой полушпалу. Размеры металлического ящика составляют $2700 \times 1000 \times 500$ мм.



Рис. 2. Общий вид модели на испытательной установке. Автор: Д. Н. Сомов

Методика испытаний

Схема лабораторной модели для проведения испытаний приведена на рис. 3.

Перед засыпкой щебня в металлический ящик необходимо было уложить упругое основание толщиной 10 мм с модулем деформации 80 МПа. Для исключения локальных деформаций на упругий слой укладывался лист фанеры толщиной 10 мм.

Щебень из подготовленного зернового состава необходимо промыть для удаления пылеватых частиц с поверхности.

Далее производилась укладка щебня подготовленного зернового состава.

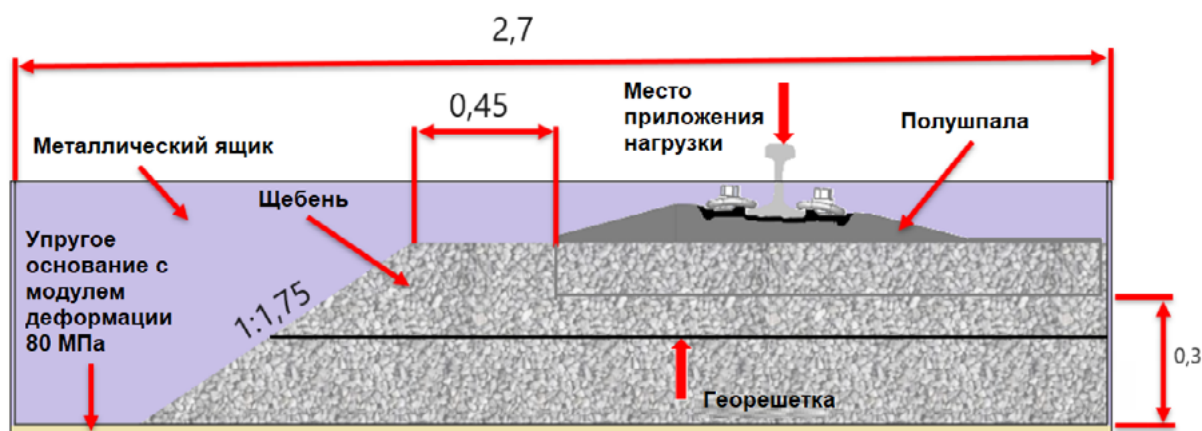


Рис. 3. Схема стендовых испытаний. Автор: Д. Н. Сомов

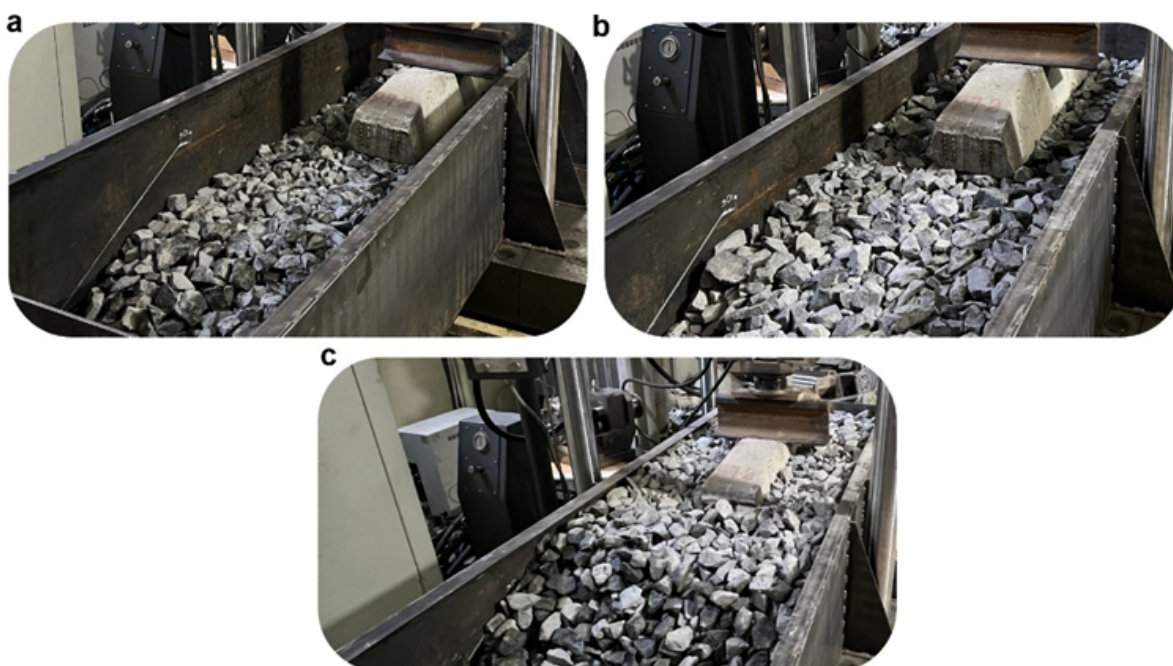


Рис. 4. *a* — уплотнение первого слоя; *b* — уплотнение второго слоя; *c* — итоговая модель. Автор: Д. Н. Сомов

К модели необходимо прикладывать циклическую нагрузку, которая даст напряжения под штампом, равные напряжениям под шпалой от поездной нагрузки. Площадь штампа равняется $0,405 \text{ м}^2$, следовательно, сосредоточенная сила должна составлять 50 кН.

Технология послойного уплотнения заключается в том, что щебень послойно уплотняется каждые 10 см (рис. 4). Каждый слой уплотняется путем приложения динамической нагрузки 50 кН с частотой 8 Гц в течение 100 000 циклов. В случае если толщина оказывалась меньше 10 см, на уплотненный слой необходимо досыпать дополнительный материал и повторно уплотнить его в течение 100 000 циклов с ранее указанными нагрузкой и частотой. Отсыпка происходит ступенчато, что необходимо для дальнейшего формирования требуемого уклона откоса балластной призмы. На уплотненный щебень укладывается железобетонный штамп на расстоянии 300 мм от стенок ящика и 30 мм в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. Нагрузка прикладывается равномерно распределенной по поверхности штампа. Количество циклов нагружения составляет 2 000 000. В ходе испытаний фиксируется значение вертикальной осадки.

Технология послойного уплотнения с усилением георешеткой балластной призмы схожа с предыдущей технологией. Производится уплотнение двух слоев щебня, каждый из которых равен 10 см, с последующей укладкой георешетки (рис. 5). Значения динамической нагрузки, частоты и количества циклов остаются неизменными.

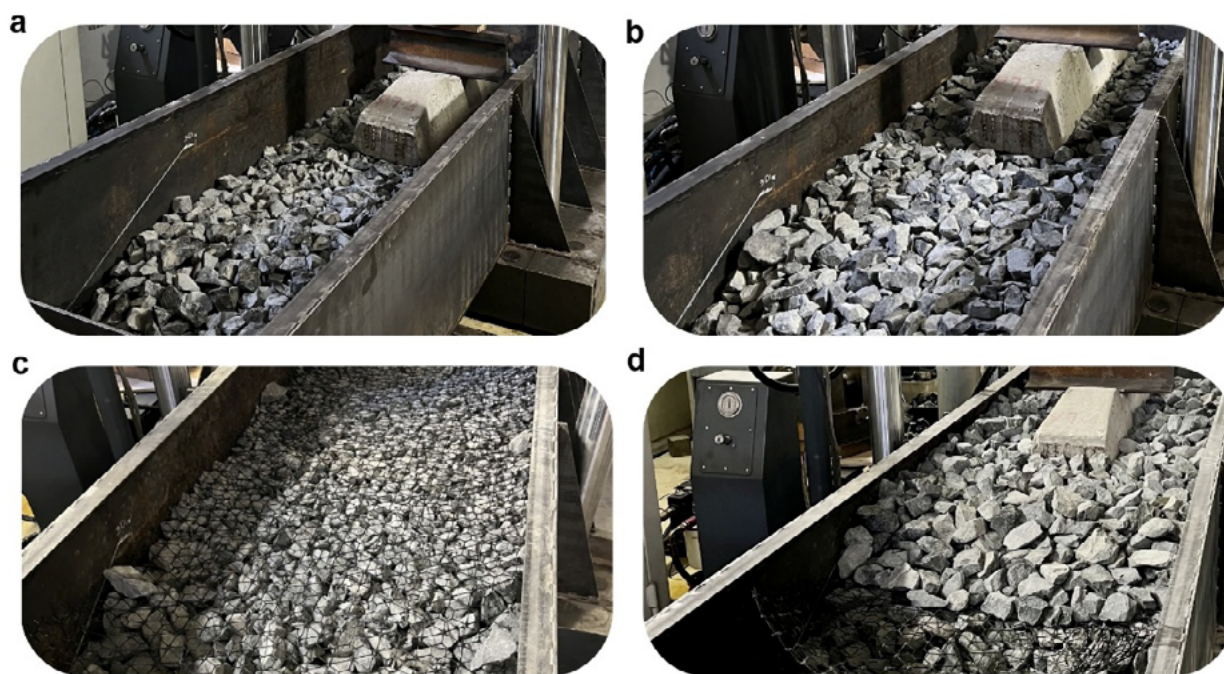


Рис. 5. *a* — уплотнение первого слоя; *b* — уплотнение второго слоя; *c* — укладка георешетки; *d* — итоговая модель. Автор: Д. Н. Сомов

Для сопоставления с технологиями послойного уплотнения было также проведено испытание с равномерно уложенным слоем балласта величиной 30 см под шпалой без предварительного послойного уплотнения.

Результаты испытаний

Результаты накопления остаточных деформаций штампа в ходе циклического нагружения при испытаниях модели приведены на рис. 6.

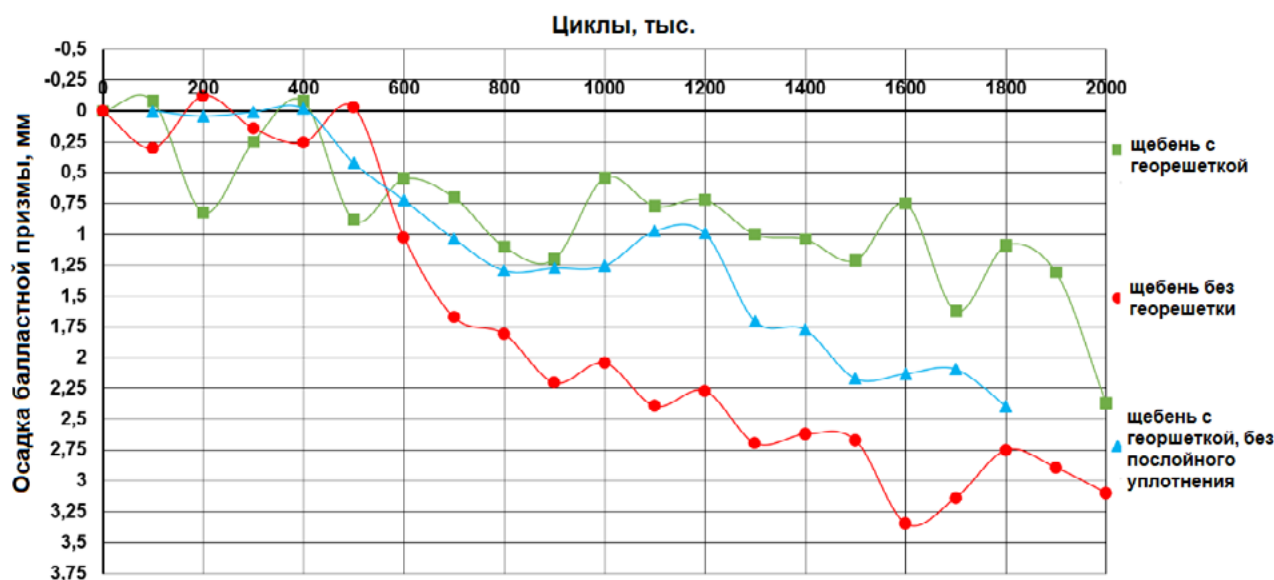


Рис. 6. График интенсивности осадки балластной призмы от количества циклов нагрузки. Автор: Д. Н. Сомов

График иллюстрирует интенсивность осадки балластной призмы железнодорожного пути в зависимости от количества циклов нагрузки для нескольких технологий.

Метод стабилизации балласта без послойного уплотнения показал наибольшую осадку с течением времени. Наблюдается повышенная амплитудность, указывающая на неравномерную осадку под воздействием циклической нагрузки. Значения осадки аппроксимируются прямой линией, демонстрирующей приблизительно линейное нарастание осадки.

Технология возведения балластной призмы с георешеткой без послойного уплотнения показала осадки существенно ниже, чем у варианта без георешетки. При этом амплитудность менее выражена, чем у балласта без георешетки, что позволяет снизить интенсивность роста осадок.

Наилучшим образом показала себя технология послойного уплотнения с введением в балластную призму георешетки. Интенсивность осадки значительно меньше, чем в случае без георешетки, так же как и амплитуда колебаний, которая

существенно меньше. Линейная аппроксимация показывает меньший наклон, что говорит о меньшей интенсивности осадки.

Для всех трех технологий на рис. 7 представлены линейные аппроксимации, которые упрощают визуальное восприятие интенсивности осадки, а также позволяют вычислить коэффициент снижения интенсивности осадки (1).

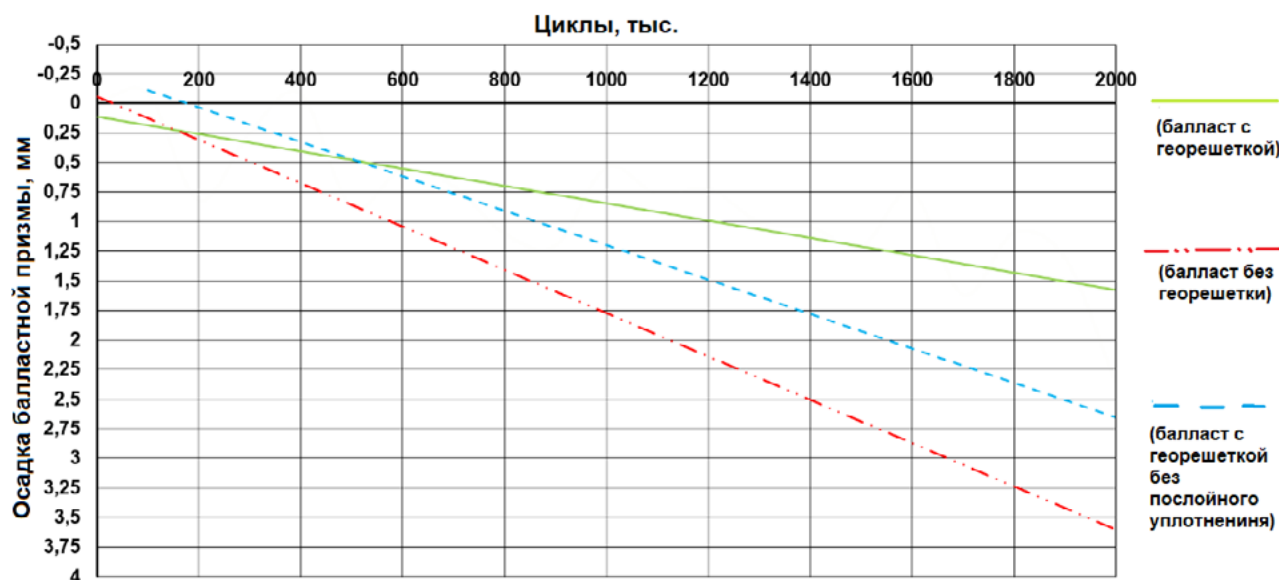


Рис. 7. Линейная аппроксимация данных испытания. Автор: Д. Н. Сомов

Коэффициент снижения интенсивности осадки:

$$K_g(s) = \frac{V(s)}{V_g(s)}, \quad (1)$$

где $V(s)$ — интенсивность осадки без геосинтетического материала, мм/тыс. циклов;

$V_g(s)$ — интенсивность осадки с геосинтетическим материалом, мм/тыс. циклов.

Вычисленный коэффициент для каждого метода стабилизации приведен на рис. 8.

Полученные результаты доказывают эффективность использования георешетки для уменьшения осадки балластной призмы. Применение георешетки существенно снижает как общую осадку, так и ее интенсивность. Предварительное уплотнение балласта с георешеткой дополнительно повышает эффективность армирования. Вариант без георешетки и без уплотнения показывает наихудшие результаты. Линейные аппроксимации позволяют оценить интенсивность осадки для каждого метода, подтверждая преимущество использования георешетки и предварительного уплотнения — коэффициент снижения интенсивности растет

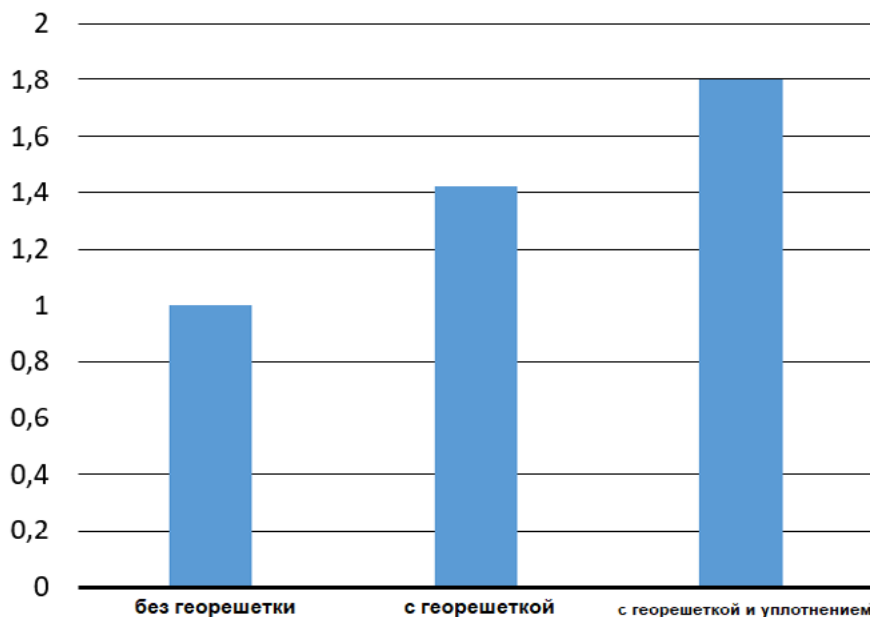


Рис. 8. Коэффициент снижения интенсивности осадки. Автор: Д. Н. Сомов

с использованием методов стабилизации балластной призмы. Амплитуда кривых указывает на неравномерность распределения напряжений в балласте, которая сильнее выражена в случае отсутствия георешетки.

Выводы

На основе представленного текста можно сформулировать следующие выводы:

1. Экспериментальное исследование подтвердило эффективность как послойного уплотнения балласта, так и армирования его георешеткой для повышения стабильности железнодорожного пути под динамическими нагрузками.
2. Совместное применение этих двух методов обеспечивает наилучшие результаты по снижению осадки балластной призмы.
3. Георешетка значительно снижает как общую осадку, так и ее неравномерность (амплитуду колебаний осадки во времени).
4. Предварительное уплотнение балласта дополнительно повышает эффективность применения георешетки.
5. Метод без применения каких-либо методов стабилизации продемонстрировал наихудшие результаты, характеризующиеся наибольшей осадкой и ее неравномерностью.
6. Анализ интенсивности осадки (коэффициент снижения интенсивности) подтверждает преимущества использования георешетки и предварительного уплотнения. С введением георешетки в конструкцию балластной призмы значение коэффициента — 1,4, с применением послойного уплотнения и георешетки — 1,8.

7. Полученные результаты позволяют оптимизировать конструктивные решения при строительстве и реконструкции железнодорожных путей.

8. Применение георешетки и послойного уплотнения рекомендуется для повышения надежности и долговечности верхнего строения пути.

Будущие исследования

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение оптимальных параметров послойного уплотнения и выбора типа георешетки в зависимости от конкретных условий эксплуатации железнодорожного пути.

Список источников

1. Popp K. System dynamics and long-term behavior of railway vehicles, track and subgrade / K. Popp, K. Knothe, C. Popper // *Vehicle System Dynamics*. — 2005. — Vol. 43. — Iss. 6–7. — Pp. 485–538.
2. Lobo-Guerrero S. Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading / S. Lobo-Guerrero, L.E. Vallejo // *Granular Matter*. — 2006. — Vol. 8. — Pp. 195–204. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0006-2>.
3. Thakur P. K. Cyclic densification of ballast and associated deformation and degradation: Ph. D. Thesis / P. K. Thakur. — University of Wollongong, 2011.
4. Raymond G. P. Reinforced ballast behavior subjected to repeated loading / G. P. Raymond // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2001. — Vol. 20. — Iss. 1. — Pp. 39–61. — DOI: 10.1016/s0266-1144(01)00024-3.
5. Qian Yu. Characterize Behavior of Geogrid Reinforced Ballast at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling / Yu Qian, D. Mishra, E. Tutumluer, H.A. Kazmee // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2015. — Vol. 43. — Iss. 5. — Pp. 393–402. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.012>.
6. Indraratna B. Improvement of recycled ballast using geosynthetics / B. Indraratna, W. Salim, D. Christie // *Rail international*. — 2002. — Pp. 1177–1182.
7. Jowkar M. Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading / M. Jowkar. — Published Online First: 31 December 2011.
8. Abrashitov A. Laboratory study of ballast material reinforced by flat geogrid under the dynamic load / A. Abrashitov, A. Sidrakov // *MATEC Web Conf*. — 2019. — Vol. 265. — P. 01006. — URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926501006>.
9. Jideani T. C. U., Grabe P. J. The development of suitable cyclic loading and boundary conditions for ballast box tests / T. C. U. Jideani, P. J. Grabe // *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. — 2019. — Vol. 61. — Iss. 4. — Pp. 59–72. — URL: <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2019/v61n4a6>.

10. Petriaev A. Stamp Test of Railway Ballast, Stabilized by Geogrids / A. Petriaev, V. Ganchits, M. Chetina, I. Kozlov et al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, vol. 2 / A. Petriaev, A. Konon (eds). — Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 50. — Springer, Singapore, 2020. — URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_6.
11. Indraratna B. The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading / B. Indraratna, Syed Hussaini, J. S. Vinod // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2013. — Vol. 39. — Pp. 20–29. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.007>.
12. Biabani M. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes / M. Biabani, B. Indraratna // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2015. — Vol. 43. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.002>.
13. Fischer S. Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry — A case study / S. Fischer // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2022. — Vol. 50. — Iss. 5. — Pp. 1036–1051. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.005>.
14. Petriaev A. Stress Response Analyses of Ballasted Rail Tracks, Reinforced by Geosynthetics / A. Petriaev // *Procedia Engineering*. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 660–665. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.105>.

Дата поступления: 14.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

СОМОВ Даниил Николаевич — аспирант, инженер кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; somovdaniil2000@gmail.com

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — д-р техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; rgups60@mail.ru

ПАРАХНЕНКО Инна Леонидовна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Путь и железнодорожное строительство»; iparahnenko@usurt.ru

ТЕНИРЯДКО Надежда Ивановна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты»; nad1010@inbox.ru

Influence of Stabilization Technologies on Deformation Parameters of a Railway Track Ballast Prism

D. N. Somov¹, A. V. Petriaev¹, I. L. Parakhnenko², N. I. Teniryadko³

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Ural State University of Railway Transport, 66, Kolmogorova str., Ekaterinburg, 620034, Russian Federation,

³Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obratsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Somov D. N., Petriaev A. V., Parakhnenko I. L., Teniryadko N. I. Influence of Stabilization Technologies on Deformation Parameters of a Railway Track Ballast Prism. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 135–148. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-135-148

Summary

Purpose: To evaluate the effectiveness of two methods for stabilizing railway ballast: layer-by-layer ballast compaction technology and geogrid reinforcement of the ballast layer. **Methods:** The research was conducted using a ballast prism model, on which dynamic tests were performed in order to simulate the impact of a passing train. During the course of the experiments, the settlement of the ballast prism was measured applying each of the technologies under study. The control measurements without any reinforcement were performed as well. **Results:** The experiment results demonstrate the positive influence of the technologies under study on the deformation parameters of the ballast prism and allow for evaluating their effectiveness in reducing settlement and improving the overall stability of the railway track. The application of geogrids and layer-by-layer compaction has been shown to result in a significant reduction in vertical deformations compared to the ballast without reinforcement. **Practical significance:** The conclusions that are derived from this study will be of great importance when it comes to the optimization of design solutions in the construction and reconstruction of railway tracks. Furthermore, they can contribute to the improvement of their reliability and durability.

Keywords: Ballast prism, dynamic loading, ballast stabilization, layer-by-layer compaction, settlement, geogrid.

References

1. Popp K., Knothe K., Popper C. System dynamics and long-term behavior of railway vehicles, track and subgrade. *Vehicle System Dynamics*. 2005, vol. 43, Iss. 6–7, pp. 485–538.
2. Lobo-Guerrero S., Vallejo L. E. Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading. *Granular Matter*. 2006, vol. 8, pp. 195–204. DOI: 10.1007/s10035-006-0006-2.
3. Thakur P. K. Cyclic densification of ballast and associated deformation and degradation: Ph. D. Thesis. University of Wollongong, 2011.
4. Raymond G. P. Reinforced ballast behavior subjected to repeated loading. *Geotextiles and Geomembranes*. 2001, vol. 20, Iss. 1, pp. 39–61. DOI: 10.1016/s0266-1144(01)00024-3.
5. Qian Yu, Mishra D., Tutumluer E., Kazmee H. A. Characterize Behavior of Geogrid Reinforced Ballast at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015, vol. 43, Iss. 5, pp. 393–402. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.012.
6. Indraratna B., Salim W., Christie D. Improvement of recycled ballast using geosynthetics. *Rail international*, 2002, pp. 1177–1182.
7. Jowkar M. Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading. Published Online First: 31 December 2011.
8. Abrashitov A., Sidrakov A. Laboratory study of ballast material reinforced by flat geogrid under the dynamic load. *MATEC Web Conf.* 2019, vol. 265, p. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/201926501006.
9. Jideani T. C. U., Grabe P. J. The development of suitable cyclic loading and boundary conditions for ballast box tests. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2019, vol. 61, Iss. 4, pp. 59–72. DOI: 10.17159/2309-8775/2019/v61n4a6.

10. Petriaev A., Ganchits V., Chetina M., Kozlov I. et al. Stamp Test of Railway Ballast, Stabilized by Geogrids. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, vol. 2. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 50. Springer, Singapore, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_6.
11. Indraratna B., Hussaini Syed, Vinod J. S. The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*. 2013, vol. 39, pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2013.07.007.
12. Biabani M., Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015, vol. 43. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.002.
13. Fischer S. Geogrid reinforcement of ballasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry — A case study. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022, vol. 50, Iss. 5, pp. 1036–1051. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2022.05.005.
14. Petriaev A. Stress Response Analyses of Ballasted Rail Tracks, Reinforced by Geosynthetics. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 660–665. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.105.

Received: July 14, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Daniil N. SOMOV — Postgraduate Student, Engineer, Department “Road Construction of Transport Systems”; somovdaniil2000@gmail.com

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Research Fellow, Department “Road Construction of Transport Systems”; pgups60@mail.ru

Inna L. PARAKHNENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Track and Railway Construction”; Iparahnenko@usurt.ru

Nadezhda I. TENIRYADKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Highways, airfields, bases and foundations”; nad1010@inbox.ru