

УДК 625.041.2

## Стабильность геометрии рельсовой колеи на переходных участках

**Е. И. Шехтман, В. А. Черняева, И. С. Игошев, А. А. Чупрынин**

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

**Для цитирования:** Шехтман Е. И., Черняева В. А., Игошев И. С., Чупрынин А. А. Стабильность геометрии рельсовой колеи на переходных участках // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 40–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-40-52

### Аннотация

**Цель:** рассмотрение конструктивно-технологических решений для переходных участков в зоне уравнивательных стыков, сопряжения конструкций с различной жесткостью, стрелочных переводов, переездов, малых искусственных сооружений, направленных на повышение стабильности рельсовой колеи. **Методы:** штамповые испытания материала балластного слоя, статистический анализ данных. **Результаты:** приведены результаты измерения модуля деформации балластного слоя, исследования неравноупругости, оценки качества и однородности уплотнения балластного слоя для различных конструкций железнодорожного пути; рассмотрены конструктивно-технологические решения для переходных участков, в частности применение щебеночного балласта специально подобранного зернового и минералогического состава, оптимизация жесткости посредством устройства слоя переменной толщины, стабилизация балластной призмы геосинтетическими материалами. **Практическая значимость:** приведены конструктивно-технологические решения для переходных участков, направленные на сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков, увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути и неоднородности уплотнения балластной призмы переходных участков, обеспечение равноупругости балластного слоя переходных участков.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, рельсовая колея, геометрия рельсовой колеи, стабильность геометрии рельсовой колеи, стрелочный перевод, переходные участки, динамическая неровность, балласт, щебень.

### Введение

На участках железнодорожного пути по длине имеются зоны с различной интенсивностью накопления остаточных деформаций, в частности это переходные участки в зоне уравнивательных стыков, сопряжения конструкций с различной жесткостью, стрелочных переводов, переездов, малых искусственных сооружений и т. п. Особенностью этих участков является их нестабильное состояние сразу после укладки пути на всем протяжении жизненного цикла.

К основным причинам, влияющим на снижение стабильности геометрии рельсовой колеи и увеличение интенсивности накопления остаточных деформаций на переходных участках, можно отнести:

1. Возникновение динамической неровности как следствие неравноупругости подрельсового основания в продольном направлении. В ранее опубликованных работах авторами статьи проведен анализ накопления остаточных деформаций, который показывает систематическое образование геометрических неровностей на примыкающих участках в зоне стрелочных переводов, увеличенный темп интенсивности образования отступлений 2, 3 и 4-й степеней по сравнению с обычными прилегающими участками.

2. В условиях залегания прочных грунтов в основании земляного полотна снижение или недостаточность прочностных и деформативных характеристик грунтов балластного слоя с учетом динамических (ударно-динамических) воздействий, характерных для переходных участков.

3. Качество и неоднородность уплотнения балласта в продольном и поперечном (вдоль шпалы) направлениях (имеет место в том числе и на обычных участках). Оценка состояния железнодорожного пути [2–4] после проведения выправочно-подбивочных работ показывает, что балласт недостаточно уплотнен в шпальных ящиках и под концами шпал, особенно железобетонных. Неравномерность уплотнения балластной призмы приводит к расстройству пути вследствие воздействия поездных динамических нагрузок. Сокращаются межремонтные сроки проведения ремонта пути, что приводит к увеличению затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути.

Указанные выше особенности вызывают дополнительные динамические воздействия на элементы железнодорожного пути, вертикальные и горизонтальные ускорения, ограничивают скорости движения поездов и таким образом создают более тяжелые условия работы, чем для обычного пути на перегоне.

Конструктивно-технологические решения для повышения стабильности геометрии рельсовой колеи, снижения величины и неравномерности накопления остаточных деформаций балластного слоя переходных участков должны быть направлены:

- на сокращение периода стабилизации балластного слоя (рис. 1);
- на увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути, неоднородности уплотнения балластной призмы (рис. 1);
- на обеспечение равноупругости балластного слоя.

### **Исследование неравноупругости, оценка качества и однородности уплотнения балластного слоя для различных конструкций железнодорожного пути**

Для косвенной оценки неравноупругости, качества и однородности уплотнения балласта или грунта земляного полотна предлагается использовать модуль деформации при динамическом нагружении ( $E_{vd}$ , МПа) и его коэффициент вариации ( $C_v$ ).

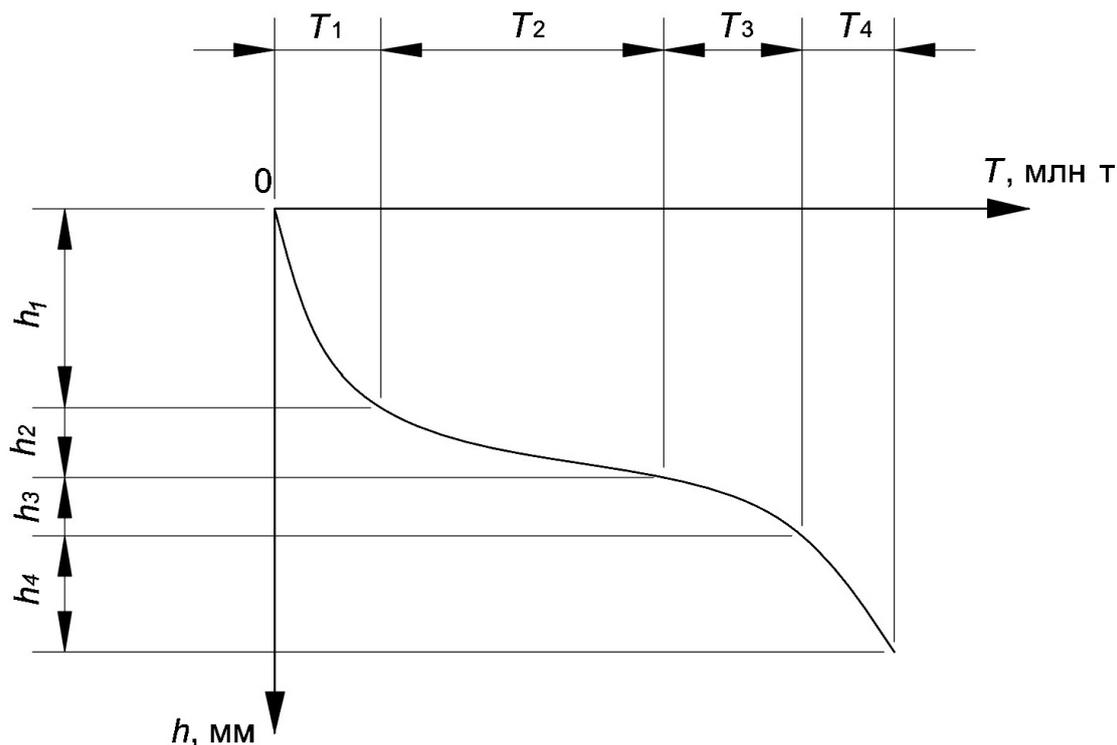


Рис. 1. Накопление остаточных деформаций в балластном слое:

$T_1$  — период стабилизации с интенсивным и постепенно затухающим накоплением остаточных деформаций ( $h_1$ ) в балластном слое;

$T_2$  — нормальная эксплуатация, когда остаточные деформации ( $h_2$ ) накапливаются медленно;

$T_3$  — эксплуатация с постепенным увеличением остаточных деформаций ( $h_3$ );

$T_4$  — период с интенсификацией накопления остаточных деформаций ( $h_4$ )

Сущность метода заключается в проведении динамического нагружения на поверхности балласта или грунта земляного полотна (рис. 2) с определением осадки нагрузочной плиты от прилагаемой нагрузки и последующим расчетом показателей деформируемости [5].

Область применения прибора — контроль качества уплотнения конструктивных слоев земляного полотна, его основания и балластного слоя.

В каждом из указанных мест измерений (рис. 3) контроль модуля деформации объемного уплотнения балластной призмы проводился в шпальных ящиках в семи измерениях:

- 1) на плече балластной призмы по торцам шпал — два измерения;
- 2) в шпальном ящике снаружи и внутри колеи правого и левого рельса — четыре измерения;
- 3) в шпальном ящике по оси пути — одно измерение.

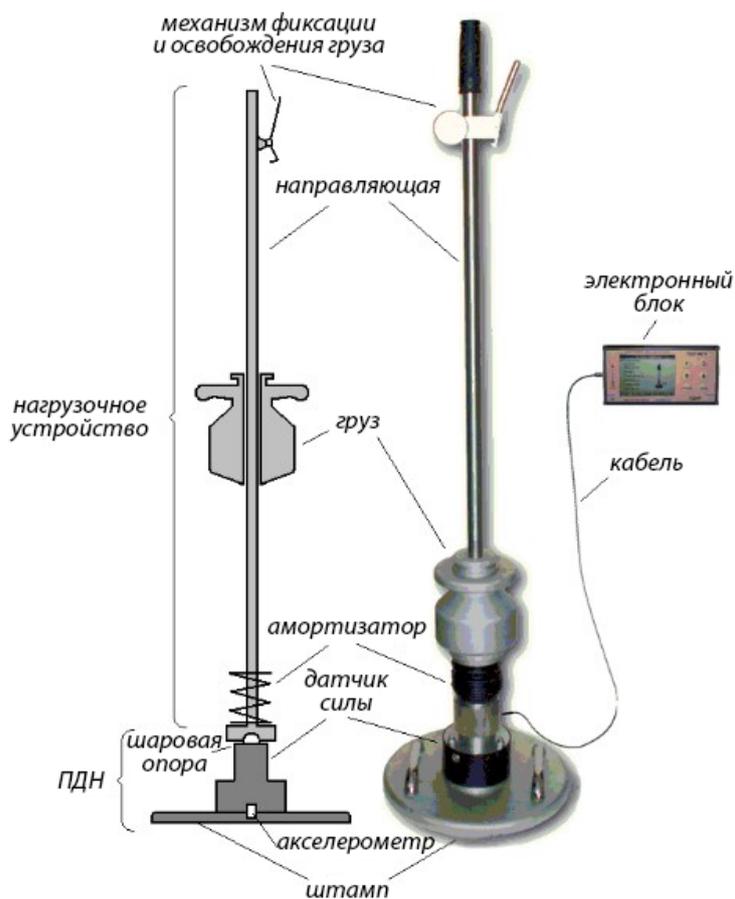


Рис. 2. Прибор измерения модуля деформации грунтов [5]

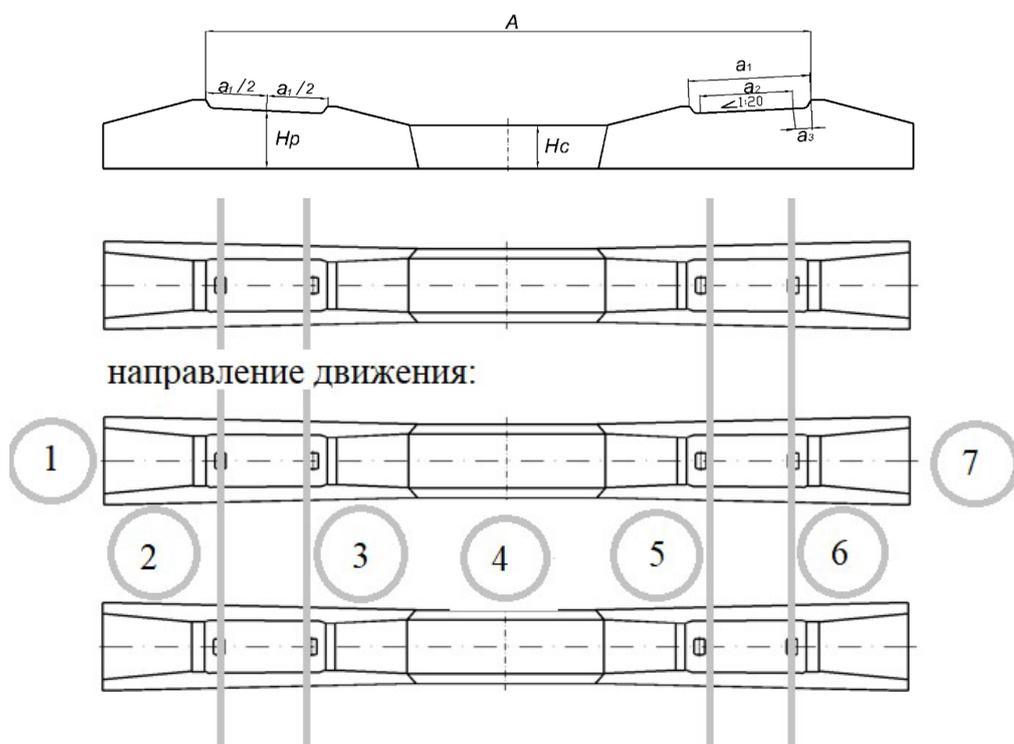


Рис. 3. Схема измерения модуля деформации



Рис. 4. Измерение модуля деформации (фото авторов):

*а* — переходный участок сопряжения со стрелочным переводом; *б* — прибор измерения модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «УДАР»

Для исследования неравноупругости балластного слоя были проведены измерения модуля деформации на стрелочном переводе на двух участках: участке сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки и в зоне переднего вылета рамного рельса. Результаты измерений (табл. 1, рис. 5) свидетельствуют о неравноупругости балластного слоя, коэффициент вариации по семи точкам двух сечений составил 17% и 14% соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Средние значения модуля деформации

Характеристика балластного материала участка измерения	Среднее значение модуля деформации по семи измерениям, МПа	Коэффициент вариации
Гранит согласно ГОСТ 7392 (участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки, деревянные шпалы) (рис. 5а)	125	17 %
Гранит согласно ГОСТ 7392 (передний вылет рамного рельса, деревянные брусья) (рис. 5б)	137	14 %

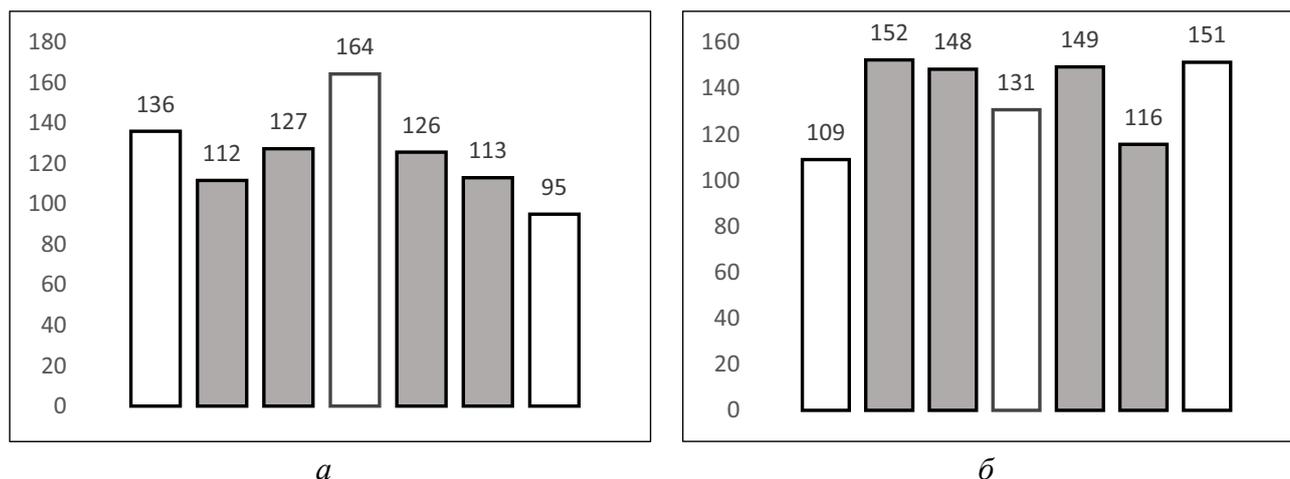


Рис. 5. Результаты измерения модуля деформации (по вертикальной оси приведены значения модуля деформации, МПа; по горизонтальной оси — точки измерений 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7): *a* — участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки; *б* — участок в зоне переднего вылета рамного рельса

### Зависимость между модулем упругости грунта и коэффициентом уплотнения

Полученные выше результаты модуля деформации также позволяют косвенно оценить качество уплотнения балластного слоя.

На основе данных экспериментов, проведенных санкт-петербургским филиалом РосдорНИИ, согласно руководству по эксплуатации [5], для определения коэффициента уплотнения построена номограмма для крупнообломочных грунтов фракции 20–70 мм.

Переход от модуля деформации к коэффициенту уплотнения приведен в табл. 2 и выполнен в соответствии с номограммой (рис. 6).

Согласно рекомендациям ГОСТ 8267 [6], для гранитного щебня принята марка дробимости М1000, а для базальтового щебня — М1200. Марка прочности отражает предел прочности щебня при сжатии, при котором происходит разрушение горной породы, то есть чем выше марка прочности щебня, тем он прочнее.

Оперативный контроль модуля деформации и косвенная оценка качества уплотнения балластного слоя позволяют выявить зоны недостаточного уплотнения, нарушающие нормальную работу шпал. Например, на участке сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки (точка 4, ось пути) коэффициент уплотнения выше, чем в зонах у подошвы рельса (в табл. 2 значения коэффициента уплотнения выделены серым цветом), что является недопустимым с позиции обеспечения прочности и долговечности шпал.

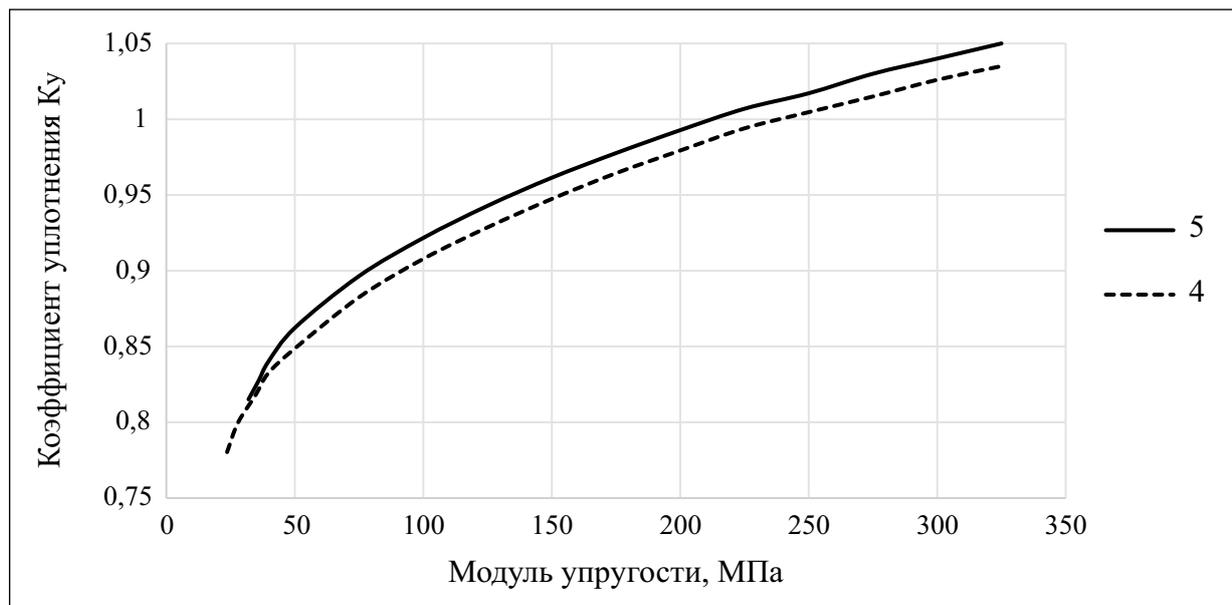


Рис. 6. Номограмма для определения коэффициента уплотнения щебеночного основания (фракция щебня 20–70 мм) при различных марках дробимости щебня: 4 — марка дробимости щебня М1000; 5 — марка дробимости щебня М1200

ТАБЛИЦА 2. Косвенная оценка качества уплотнения балластного слоя

№ точки	Модуль деформации, МПа	Коэффициент уплотнения
Гранит согласно ГОСТ 7392 (участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки)		
1	136	0,94
2	112	0,92
3	127	0,93
4	164	0,96
5	126	0,93
6	113	0,92
7	95	0,90
Гранит согласно ГОСТ 7392 (стрелка, передний вылет рамного рельса)		
1	109	0,92
2	152	0,95
3	148	0,95
4	131	0,93
5	149	0,95
6	116	0,92
7	151	0,95

### Сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков

Достижение указанной цели возможно за счет оптимизации зернового состава щебеночного балласта и обеспечения его равноупругости.

Наиболее распространенный способ стабилизации — повышение плотности балластного материала балластного слоя за счет увеличения концентрации частиц в единице объема, соответствующей более упорядоченному по расположению и форме их пространственному построению (текстуре) за счет уплотнения материала или оптимизации его зернового состава.

Основным критерием качества уплотнения является модуль деформации, при увеличении которого снижается темп осадки балластного слоя.

Вопросы изменения прочностных и деформационных свойств щебеночного балласта и в настоящее время являются актуальными. Проводятся исследования по определению предпочтительного минералогического и зернового состава щебеночного балласта для конструкции железнодорожного пути, обеспечивающей наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа [7]. Исследования прочностных и деформативных свойств базальтового щебеночного балласта в зависимости от его зернового состава приведены в работе [8].

Авторами статьи проведены измерения модуля деформации базальтового щебеночного балласта оптимизированного зернового состава и гранитного щебня, согласно ГОСТ 7392 [9]. Результаты измерений приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Средние значения модуля деформации

Характеристика балластного материала участка измерения	Среднее значение модуля деформации, МПа
Гранит согласно ГОСТ 7392	154
	143
	166
<b>Среднее значение модуля деформации</b>	<b>154</b>
Базальт с оптимизированным зерновым составом	180
	212
	216
	193
	189
<b>Среднее значение модуля деформации</b>	<b>198</b>

Согласно полученным результатам, модуль деформации базальтового щебеночного балласта в 1,3 раза превышает значения для гранитного щебеночного балласта. Представляется возможным решение задачи сокращения периода стабилизации балластного слоя переходных участков с применением специально подобранного зернового и минералогического состава щебня с повышенными прочностными и деформативными характеристиками.

### Оптимизация жесткости посредством устройства слоя переменной толщины

В настоящее время также имеется опыт устройства переходных участков с двух сторон от участка с подбалластным асфальтобетонным слоем с укладкой слоя щебеночно-песчаной смеси (далее — ЩПС) переменной толщины под балластной призмой по всей ширине земляного полотна (рис. 7). Отметка верха слоя ЩПС на переходных участках принята равной отметке верха поверхности асфальтобетонного покрытия. Толщина слоя ЩПС в месте сопряжения с опытным участком принята равной суммарной толщине слоя асфальтобетона и подстилающего слоя из ЩПС с устройством плавного вертикального отвода на уменьшение толщины слоя. Длина каждого переходного участка принята равной не менее 15 м [10]. Данная конструкция уложена в августе 2024 года и в будущем позволит оценить эффективность данного решения с точки зрения обеспечения стабильности геометрии рельсовой колеи на переходных участках между опытным и контрольным участком.



Рис. 7. Схема устройства участка сопряжения между экспериментальным участком (с устройством асфальтобетонного слоя) и контрольным участком (без устройства асфальтобетонного слоя)

### Стабилизация балластной призмы переходных участков геосинтетическими материалами

На участках железнодорожного пути, где по длине имеются зоны с различной интенсивностью накопления остаточных деформаций в вертикальной и горизонтальной плоскостях, в частности на переходных участках, укладка жестких геосеток или георешеток, стабилизация балластной призмы геосинтетическими материалами может дать положительный эффект, в том числе в условиях тяжеловесного движения поездов.

Имеющиеся материалы исследований позволяют говорить о неоднозначности технического эффекта при применении таких типов геоматериалов, как геотекстиль, геосетки, георешетки, геоячейки, геокомпозиты, стекловолокно, пленки и т. д. Проведенные отечественными учеными натурные эксперименты

по укладке геоматериалов в путь (в балластный слой, на основную площадку земляного полотна) неоспоримо подтверждают, что при получении армирующего эффекта изменения физико-механических характеристик грунта как материала не происходит, а изменение упругих характеристик подрельсового основания может иметь место [11].

## Заключение

Нестабильное состояние переходных участков сразу после укладки железнодорожного пути требует особых подходов к проектированию и разработке мероприятий, направленных на повышение стабильности геометрии рельсовой колеи и недопущение интенсификации роста количества расстройств железнодорожного пути.

Конструктивно-технологические решения переходных участков должны учитывать такие характерные особенности, как возникновение динамической неровности вследствие неравноупругости подрельсового основания, снижение или недостаточность прочностных и деформативных характеристик грунтов балластного слоя с учетом динамических (ударно-динамических) воздействий, качество и неоднородность уплотнения балласта. И должны быть направлены на сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков; увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути, неоднородности уплотнения балластной призмы переходных участков; обеспечение равноупругости балластного слоя переходных участков.

## Библиографический список

1. Абросимов В. И. Исследования горизонтальных и вертикальных сил взаимодействия пути и подвижного состава в пределах крестовинного узла стрелочных переводов: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛИИЖТ, 1967. 142 с.
2. Комплексные технологии уплотнения балластного слоя / Ю. В. Гапеенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 12. С. 17–21.
3. Богданов В. М. Приоритетные задачи повышения качества в хозяйстве пути // Евразия вести. 2005. № 9. С. 23.
4. Попович М. В., Волковойнов Б. Г., Атаманюк А. В. О совершенствовании методики расчета и выбора параметров уплотнительных рабочих органов; машин непрерывного действия // Труды научно-технической конференции с международным участием в связи с 75-летием ГТКБ ЦП ОАО «РЖД» «Перспективы технического развития путевого комплекса ОАО «РЖД» в условиях его реформирования». М., 2007. С. 176–180.
5. Руководство по эксплуатации 7360-028-2010 РЭ. Измерители модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.
6. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ.

7. Технические требования к конструкции железнодорожного пути и системе его технического обслуживания, обеспечивающей наработку пропущенного тоннажа 2,5 млрд тонн брутто, утв. и. о. заместителя генерального директора — главного инженера ОАО «РЖД» от 21.09.2021 № 1508 (с изм. от 13.04.2023 № 931/р).

8. Механические свойства базальтового щебеночного балласта / А. Ф. Колос [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 3. С. 53–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72

9. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия.

10. Технические условия на выполнение работ по объекту «Проведение полевого эксперимента по применению подбалластного слоя из асфальтобетона на двухпутном участке железнодорожного пути протяженностью 1 км», утв. заместителем главного инженера Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» В. Н. Зверь от 17.05.2024 № ЦДИ-2976.

11. Блажко Л. С. Технико-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН: дисс. ... докт. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2003. 331 с.

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 12.11.2024

#### **Контактная информация:**

ШЕХТМАН Евгений Иосифович — докт. воен. наук, профессор; director@sptgt.ru

ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна — канд. техн. наук, доцент; chernyaeva@pgups.ru

ИГОШЕВ Иван Сергеевич — аспирант; ighoshiev2000@mail.ru

ЧУПРЫНИН Александр Андреевич — аспирант; alechup93@inbox.ru

## **Stability of rail track geometry in transition sections**

**E. I. Shehtman, V. A. Chernyaeva, I. S. Igoshev, A. A. Chuprinin**

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

**For citation:** *Shehtman E. I., Chernyaeva V. A., Igoshev I. S., Chuprinin A. A. Stability of rail track geometry in transition sections // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 40–52. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-40-52*

#### **Abstract**

A study of the quality and heterogeneity of ballast compaction in the transverse (along the sleeper) direction as a reason for the decrease in the stability of the track gauge geometry, and consideration of design and technological solutions for transition sections in order to increase the stability of the track gauge geometry

and prevent an intensification of the growth in the number of track disorders. **Purpose:** transition sections. **Methods:** stamp testing of ballast layer material, statistical data analysis. **Results:** the results of measuring the deformation modulus of the sleeper base, studying the non-uniform elasticity, assessing the quality and homogeneity of the compaction of the sleeper base for various designs of railway tracks are presented, and design and technological solutions for transition sections are considered. **Practical importance:** the article presents design and technological solutions for transition sections aimed at reducing the period of stabilization of the ballast layer of transition sections; increasing the period of normal operation, taking into account the current dynamic loads arising due to the presence of joints, dynamic irregularities, non-uniform elasticity of the railway track, non-uniform compaction of the ballast prism of transition sections; ensuring the uniform elasticity of the ballast layer of transition sections.

**Keywords:** railway track, rail track, rail track geometry, stability of rail track geometry, turnouts, transition sections, dynamic unevenness, ballast, crushed stone.

## References

1. Abrosimov V.I. Issledovaniya gorizontal'nyh i vertikal'nyh sil vzaimodejstviya puti i podvizhnogo sostava v predelakh krestovinnogo uzla strelochnyh perevodov: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LIIZhT, 1967. 142 s. (In Russian)
2. Kompleksnyye tekhnologii uplotneniya ballastnogo sloya / Yu. V. Gapeenko // Put' i putevoe hozyajstvo. 2006. No. 12. S. 17–21. (In Russian)
3. Bogdanov V.M. Prioritetnye zadachi povysheniya kachestva v hozyajstve puti // Evraziya vesti. 2005. No. 9. S. 23. (In Russian)
4. Popovich M. V., Volkovojnov B. G., Atamanyuk A. V. O sovershenstvovanii metodiki rascheta i vybora parametrov uplotnitel'nyh rabochih organov; mashin nepreryvnogo dejstviya // Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v svyazi s 75-letiem GGGKB CP OAO "RZhD" "Perspektivy tekhnicheskogo razvitiya putevogo kompleksa OAO "RZhD" v usloviyah ego reformirovaniya". M., 2007. S. 176–180. (In Russian)
5. Rukovodstvo po ekspluatatsii 7360-028-2010 RE. Izmeriteli modulya uprugosti gruntov i osnovanij dorog PDU-MG4. (In Russian)
6. GOST 8267-93. Shcheben' i gravij iz plotnyh gornyh porod dlya stroitel'nyh rabot. (In Russian)
7. Tekhnicheskii trebovaniya k konstrukcii zheleznodorozhnogo puti i sisteme ego tekhnicheskogo obsluzhivaniya, obespechivayushchej narabotku propushchennogo tonnazha 2,5 mlrd tonn brutto, utv. i. o. zamestitelya general'nogo direktora — glavnogo inzhenera OAO "RZhD" ot 21.09.2021 No. 1508 (s izm. ot 13.04.2023 No. 931/r). (In Russian)
8. Mekhanicheskie svoystva bazal'tovogo shchebenochnogo ballasta / A. F. Kolos [i dr.] // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2022. Vyp. 3. S. 53–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72 (In Russian)
9. GOST 7392-2014. Shcheben' iz plotnyh gornyh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya. (In Russian)
10. Tekhnicheskie usloviya na vypolnenie rabot po ob'ektu: "Provedenie polevogo eksperimenta po primeneniyu podballastnogo sloya iz asfal'tobetona na dvuhputnom uchastke zheleznodorozhnogo puti protyazhennost'yu 1 km", utv. zamestitелем glavnogo inzhenera Central'noj direkcii infrastruktury — filiala OAO "RZhD" V.N. Zver' ot 17.05.2024 No. CDI-2976. (In Russian)

11. Blazhko L. S. Tekhniko-tehnologicheskaya ocenka usileniya konstrukcii puti na uchastkah obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevmi nagruzkami do 300 kN: diss. ... dokt. tekhn. nauk. SPb.: PGUPS, 2003. 331 s. (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 12.11.2024

**Author's information:**

Evgenii I. SHEHTMAN — Doctor of Military Sciences, Professor; director@sptgt.ru

Victoria A. CHERNYAEVA — PhD of Engineering, Associate Professor; chernyaeva@pgups.ru

Ivan S. IGOSHEV — Postgraduate Student; ighoshiev2000@mail.ru

Aleksandr A. CHUPRININ — Postgraduate Student; alechup93@inbox.ru