

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/07SATS126.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS126 (<https://doi.org/10.15862/07SATS126>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Уланов, И. С. Конструктивно-технологические решения участков переменной жесткости при проектировании высокоскоростных железнодорожных магистралей / И. С. Уланов, А. В. Горлов, С. Я. Луцкий, А. М. Черкасов, Д. В. Епифанцев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/07SATS126.

**For citation:**

Ulanov I.S., Gorlov A.V., Lutsky S.Ya., Cherkasov A.M., Epifantsev D.V. Structural and technological solutions for variable stiffness sections in the design of high-speed railway lines. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(1): 07SATS126. Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/07SATS126. (In Russ., abstract in Eng.).

**УДК 625.1**

**Уланов Иван Сергеевич**

ООО «НПС Скоростные технологии», Москва, Россия  
Заместитель генерального директора по инновациям  
Кандидат технических наук  
E-mail: [i.ulanov@npsst.ru](mailto:i.ulanov@npsst.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=949102](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=949102)

**Горлов Александр Вячеславович**

ООО «НПС Скоростные технологии», Москва, Россия  
Главный эксперт  
E-mail: [a.gorlov@npsst.ru](mailto:a.gorlov@npsst.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=875880](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=875880)

**Луцкий Святослав Яковлевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия  
Институт пути, строительства и сооружений  
Профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»,  
главный специалист НИЦ «Тепло- и массообмен в строительстве»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [lsy40@mail.ru](mailto:lsy40@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=846369](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=846369)

**Черкасов Александр Михайлович**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия  
Заведующий кафедрой «Транспортное строительство в экстремальных условиях»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [a.m.cherkasov@edu.rut-miit.ru](mailto:a.m.cherkasov@edu.rut-miit.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8233-9803>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=472233](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=472233)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57200192573>

**Епифанцев Денис Вадимович**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия  
Институт пути, строительства и сооружений  
Ведущий специалист НИЦ «Тепло- и массообмен в строительстве», аспирант  
E-mail: [epifantsev.d.2000@gmail.com](mailto:epifantsev.d.2000@gmail.com)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1239138](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1239138)

## Конструктивно-технологические решения участков переменной жёсткости при проектировании высокоскоростных железнодорожных магистралей

**Аннотация.** Рассмотрена проблема обеспечения надёжности и безопасности движения поездов на участках с различными типами конструкций верхнего строения пути, в первую очередь при сопряжении балластного и безбалластного пути. В статье предложен комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений для проектирования параметров участка переменной жёсткости во всех рабочих зонах — рельсах, скреплениях, подрельсовом основании (шпалах), земляном полотне и основании.

Рассмотрены основные элементы конструкции переходных зон: переходные железобетонные плиты, удлинённые шпалы, дополнительные рельсы, подшпальные и подрельсовые прокладки, подбалластные маты, регулируемые рельсовые скрепления, геосинтетики, связующие составы, дренажные и морозозащитные слои. Для активной зоны основания земляного полотна и насыпи показана необходимость диагностики и прогноза влияния вибродинамических нагрузок на неоднородную структуру грунтов. Конструктивно-технологические решения могут влиять на несколько целевых характеристик одновременно, установлена мера их влияния для практического выбора в заданных условиях эксплуатации. Обобщён зарубежный и отечественный опыт деформаций пути на участках и инженерных мероприятий, обеспечивающих их компенсацию. Предложена организация стационарных постов и программа мониторинга состояния конструкции и основания участка, которые направлены на диагностику и регулирование надёжности всех рабочих зон на стадиях жизненного цикла.

Практическая ценность работы заключается в уточнении критериев и формировании системного подхода к проектированию участков переменной жёсткости, позволяющего повысить эксплуатационную надёжность и снизить затраты на их содержание при строительстве и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей.

**Ключевые слова:** высокоскоростная магистраль; железнодорожный путь; переменная жёсткость; нагрузки; деформации; конструктивно-технологические решения; мониторинг; надёжность

### 1. Актуальность и методические основы

Одной из сложных в инженерном отношении проблем проектирования высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСЖМ) является обеспечение надёжности и безопасности движения поездов на участках с различными типами конструкций верхнего строения пути. Эта проблема актуальна для участков сопряжения балластного и безбалластного пути, где происходит резкое изменение жёсткости рельсового основания. Именно здесь формируются участки переменной жёсткости (УПЖ). Сложность заключается в том, что безбалластный путь обладает значительно большей статической жёсткостью по сравнению с балластным. При отсутствии плавного перехода это различие вызывает резкий градиент в прогибах рельсов, что приводит к локальному росту динамических нагрузок, увеличению вибраций и ускоренному износу, как элементов пути, так и подвижного состава. В зонах перехода под циклической поездной нагрузкой могут возникать остаточные деформации, истирание балласта, переупаковка частиц балласта, усталостные повреждения рельсов и скреплений, что в совокупности снижает эксплуатационную надёжность и кратно повышает затраты на техническое обслуживание пути.

По данным международных исследований [1–4] переходные зоны к мостам и тоннелям требуют технического обслуживания в 3–6 раз чаще по сравнению с обычным путём, а стоимость ремонтных мероприятий на таких участках в среднем в два раза выше из-за труднодоступности и локализации дефектов. По результатам численного моделирования [5; 6] реакция пути на динамическую нагрузку в зоне безбалластного пути составляет в среднем ~150 кН, тогда как на балластном участке она может достигать ~170 кН при аналогичной кинематике. Это подтверждает, что балластный путь в переходной зоне испытывает большую ударную нагрузку, что требует дополнительных мер по снижению жёсткости. Анализ отечественных исследований и экспериментов также подтверждает, что именно переходные зоны являются наиболее уязвимыми элементами при эксплуатации скоростных магистралей [7–9]. Эта проблема весьма актуальна для ВСЖМ-1, у которой примерно 30 % трассы проходит по мостам и эстакадам.

*Цель исследования* — разработка методики выбора конструктивно-технологических решений по устройству участка переменной жёсткости во всех рабочих зонах — рельсах, скреплениях, подрельсовом основании (шпалах), земляном полотне и основании на высокоскоростных магистралях и функциональной классификации с учётом механизмов взаимодействия пути и подвижного состава. При расчете конструкции пути должен быть учтен многосторонний комплекс его состояния при переменных динамических нагрузках подвижного состава (скорости и нагрузки вертикальные, горизонтальные продольные, горизонтальные поперечные) и нестационарных природно-климатических факторах. Более того, необходим системный подход к проектированию всей конструкции пути (рельсы, скрепления, подрельсовое основание, балласт, слои насыпи, неоднородное по литологии основание земляного полотна и др.). На этой основе проведена функциональная классификация инженерных решений для УПЖ по схеме «нагрузки — механизм деградации — инженерное решение — ожидаемый эффект».

Проектирование и укладка участков железнодорожного пути переменной жесткости при сопряжении с разными конструкциями регламентированы специальными техническими условиями (СТУ) ВСЖМ-1, нормами и стандартами.<sup>1</sup> Недостатки существующей практики заключаются в том, что проектирование переходных зон сводится к обеспечению плавного изменения жёсткости конструкции. Такой подход не учитывает комплексную природу процессов, протекающих в зоне сопряжения: истирание и переупаковку частиц балласта, накопление остаточных осадок, формирование «висячих шпал», нарушение поперечной устойчивости пути, рост уровня шума и вибраций. Игнорирование этих факторов приводит к ускоренной деградации элементов верхнего строения пути и завышенным эксплуатационным расходам на содержание, а также к необходимости более частого проведения ремонтных мероприятий. В связи с этим требуется переход от однопараметрического подхода («жёсткость, как целевой показатель») к многофункциональной системе мер, основанной на комплексной классификации инженерных решений и их функциональной роли в составе УПЖ.

---

<sup>1</sup> ТР ТС 002/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта». // Министерство транспорта Российской Федерации. Федеральная служба по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор). — URL: [https://rostransnadzor.gov.ru/storage/МТУ%20ПО%20ДФО/ТР%20ТС%20002\\_2011.pdf](https://rostransnadzor.gov.ru/storage/МТУ%20ПО%20ДФО/ТР%20ТС%20002_2011.pdf).

ГОСТ Р 72044-2025. Конструкции железнодорожного пути. Методика расчётов участков переменной жесткости. — М.: Стандартинформ, 2025. — 12 с. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/849/84993.pdf>.

СТО РЖД 14.004-2025. Стандарт ОАО «РЖД». Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству (утв. и введен в действие Распоряжением ОАО "РЖД" от 04.04.2025 N 747/p). EN 16432-1:2014 Railway applications — Ballastless track systems.

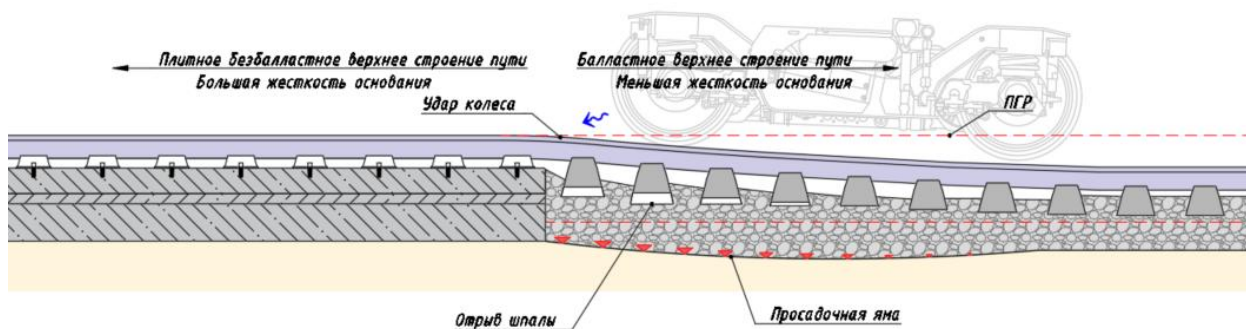
## 2. Особенности работы конструкций верхнего строения пути в переходных зонах УПЖ

При передаче нагрузок от колеса в переходных зонах возникает неравномерное распределение реакций опоры: более жёсткая часть конструкции воспринимает повышенную долю усилий, а менее жёсткая — деформируется с увеличенным прогибом. В результате формируется градиент вертикальных перемещений рельса, сопровождающийся локальной концентрацией напряжений и отражением упругих волн в теле пути. FEM-модели и полевые измерения показывают резкое перераспределение усилий между балластной и безбалластной частью. Это явление сопровождается концентрацией деформационной энергии в жёсткой части и повышением локальных напряжений [5; 10].

Переходная зона работает как система с переменными параметрами жёсткости, где подвижное колесо вызывает последовательную нагрузку и разгрузку опорных элементов с различной деформационной способностью.

На границе контрастных конструкций возникают скачки реакции опоры и пиковые усилия в контактах «рельс — шпала — балласт — земляное полотно», приводящие к циклическому сжатию и разрушению верхних граней щебня. При многократном повторении этих воздействий острые рёбра зерен дробятся, частицы переупаковываются, образуя уплотнённые зоны с пониженной дренирующей способностью. По данным [2] при длительных измерениях на сети дорог зарегистрировано увеличение контактных напряжений на 25 % у границы жёсткого элемента, сопровождающееся ростом доли разрушенных зёрен.

Потеря зерновой структуры и появление мелких фракций вызывают засорение порового пространства, ухудшение водопроницаемости и накопление влаги в теле балластного слоя. Влажный балласт теряет жёсткость и становится податливым при повторных циклах нагрузки, что приводит к возникновению эффекта «висячих шпал» (рис. 1), сопровождающийся ростом реактивных усилий и динамических ударов при проходе колёсной пары [3; 11].



**Рисунок 1.** Формирование просадочной ямы перед сопряжением балластного пути с безбалластным и эффекта «висячих» шпал (разработано авторами)

В этих зонах происходит накопление осадок и формирование локальной просадочной ямы непосредственно перед участком повышенной жёсткости. Постепенное увеличение остаточных деформаций создает неравномерный продольный профиль рельсовой нити и искажение проектной геометрии пути. Вдоль ослабленной зоны повышаются вертикальные и поперечные ускорения, увеличивается воздействие на элементы крепления и шпалы. Одновременно ухудшение дренажа и потеря структуры балласта снижают поперечную устойчивость рельсовой решётки, создавая предпосылки для смещений колеи и вибрационного износа шпал [3].

Накопление дефектов сопровождается ростом уровня шума и вибраций, связанных с ударным взаимодействием колеса и рельса, и ускоренным выходом из строя элементов верхнего строения пути — креплений, шпал и контактных прокладок. Эти процессы

протекают взаимосвязанно: локальные осадки вызывают дополнительную концентрацию усилий, что усиливает истирание балласта и ускоряет развитие деформаций.

Таким образом, без контрольного регулирования жёсткости и прогиба рельса переходная зона становится очагом накопления повреждений и главным фактором снижения долговечности пути на высокоскоростных магистралях. Задача переходной зоны заключается не в простом выравнивании жёсткости, а в обеспечении стабильности всей конструкции, при сохранении требуемых параметров по прогибу рельса и обеспечении комфортабельности и безопасности движения. Каждый элемент конструкции выполняет функцию, направленную на компенсацию конкретных механизмов деградации — концентрации усилий, накопления осадков, переупаковки балласта, потери дренажа и поперечной устойчивости.

Переходные железобетонные плиты перераспределяют реакции между участками с контрастной жёсткостью. Они обеспечивают плавное затухание изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе, снижают градиент прогиба и исключают концентрацию пиковых напряжений на границе конструкций. Плита работает как интегрирующий элемент, воспринимающий часть усилий с менее жёсткого основания и передающий их на жёсткий участок по более протяжённой длине, тем самым предотвращая образование локальных «просадочных ям».

Подбалластные маты создают дополнительное демпфирующее звено между балластом и основанием. Их основная функция — гашение высокочастотных составляющих нагрузки и снижение амплитуды отражённых волн, которые возникают при переходе колеса через участок с изменяющейся податливостью. Конструкция обеспечивает равномерное распределение давления, снижает измельчение щебня и стабилизирует контактную поверхность, замедляя процесс переупаковки частиц.

Подшпальные прокладки (ПШП) локализуют энергию удара на контакте «шпала — балласт», уменьшая пиковые контактные напряжения и замедляя абразивное разрушение граней щебня. Они повышают эффективную площадь контакта, формируют более равномерное поле реакций под шпалой и препятствуют развитию эффекта «висячих шпал». Несмотря на ограниченное влияние на системную жёсткость пути, ПШП повышают стабильность прогиба рельса и снижают вибрационные воздействия на элементы крепления.

Удлиненные шпалы и дополнительные рельсы обеспечивают постепенное изменение распределения нагрузки по длине пути и участвуют в формировании градиента прогиба рельса. За счёт увеличенной базы опирания шпалы перераспределяют вертикальные усилия, уменьшают осадки концов и повышают поперечную устойчивость пути.

Геосинтетические и армирующие элементы стабилизируют структуру балластного слоя и распределяют напряжения в верхней части земляного полотна. Они препятствуют разуплотнению основания, ограничивают накопление остаточных осадков и формируют равномерное поле деформаций под всей рельсовой решёткой.

Связующие составы для балласта применяются для повышения поперечной и продольной устойчивости, а также сохранения дренирующей способности слоя. Склейка частиц предотвращает их смещение под действием боковых и ударных нагрузок, уменьшает пылеобразование и выветривание, обеспечивает постоянную геометрию колеи в зоне сопряжения.

Регулируемые упругие рельсовые скрепления и подрельсовые прокладки позволяют компенсировать изменения жёсткости на уровне рельсового узла, обеспечивая допустимую величину упругого прогиба рельса вдоль зоны перехода. Эти элементы формируют требуемый профиль реакции опоры и служат основным инструментом согласования рельсовой линии с изменяющимся основанием.

Применение рассмотренных конструкций и конструктивно-технологических решений (КТР) направлено на стабилизацию формы прогиба рельса, снижение динамических пиковых усилий и предотвращение деградации балласта и основания (табл. 1).

При выборе конструктивно-технологических решений важно понимать, что конструктивные элементы выполняют разные функции или комбинацию функций, которые направлены на предотвращение возникновения проблем и на снижение последствий уже проявившихся дефектов. В контексте проектирования и расчёта переходных зон следует различать два фундаментальных понятия — статическая и динамическая жёсткость основания и пути. Они характеризуют сопротивление конструкции деформациям под нагрузкой, но относятся к разным условиям её приложения.

Таблица 1

**Влияние конструктивно-технологических решений верхнего строения пути на деформации и негативные проявления в переходной зоне**

<i>Реакции пути</i> <i>КТР</i>	Остаточные осадки	Висячие шпалы	Ступенька на стыке	Влияние на прогиб рельса	Горизонтальная стабильность	Шум	Вибрации
1	2	3	4	5	6	7	8
Переходные железобетонные плиты	значительное снижение	незначительное	устранение	локальное повышение жёсткости	незначительное	—	—
Подбалластные маты	умеренное	снижение	незначительное	незначительное	незначительное	снижение	значительное снижение
Подшпальные прокладки (ПШП)	незначительное	существенное снижение	незначительное	локальное смягчение	повышение	снижение	снижение
Удлиненные шпалы	умеренное	умеренное снижение	—	незначительное	повышение	—	—
Дополнительные рельсы в середине колеи	умеренное	устранение	устранение	повышение жёсткости	повышение	увеличение	увеличение
Геосинтетические и армирующие элементы	значительное	незначительное	стабилизация	незначительное	умеренное	—	незначительное
Связующие составы для балласта	умеренное	устранение	стабилизация	умеренное	высокая / устранение нестабильности	умеренное	умеренное
Связующие составы для насыпи	значительное	умеренное	выравнивание	незначительное	незначительное	—	незначительное
Регулируемые упругие скрепления	умеренное	уменьшение	умеренное	значительное / прямой эффект	—	значительное / прямой эффект	значительное / прямой эффект

*Разработано авторами*

Оптимальное сочетание КТР позволяет поддерживать требуемые эксплуатационные параметры пути — равномерность осадков, поперечную устойчивость и долговечность элементов верхнего строения — при минимальной чувствительности к изменению жёсткости подстилающих слоёв.

**3. Особенности конструктивно-технологических решений насыпи и основания земляного полотна УПЖ**

В соответствии с технологическим регламентом [12] переменная жесткость создается за счет отсыпки насыпи на подходе к искусственному сооружению из грунта улучшенных свойств переменной толщины в виде трапеции с меньшим основанием по подошве. В качестве грунта с улучшенными свойствами применяется щебеночно-песчаная-гравийная смесь с требованиями, аналогичными требованиям к грунту первого защитного слоя с добавлением портландцемента. Для улучшения свойств грунта и повышения его модуля деформации применяют дополнительно

методы обработки грунта вяжущими с достижением модуля деформации не менее 100 МПа. Длина участка земляного полотна с переменной жесткостью назначается расчетом, но не менее 20 м. Коэффициент уплотнения основания УПЖ должен быть не ниже 1,0. Для соответствия переменным по величине и виду воздействия нагрузкам на подходах к мостовым сооружениям ВСЖМ в [12] предложен комплексный подход к проектированию участков переменной жесткости. Разработаны групповые КТР по устройству земляного полотна в зоне примыкания к искусственному сооружению, в том числе способ усиления с инъектированием твердеющего раствора [11; 13].

Особенность и сложность упрочнения основания земляного полотна состоит в неоднородности характеристик грунтов по физико-механическим характеристикам, глубине, литологии и длине участка. Покажем, что их негативное сочетание во времени приводит к повышенному и недопустимому по нормам риску деформаций. В соответствии с нормативными требованиями следует обеспечить надежность основания земляного полотна по прочности, стабильности и устойчивости грунтов при динамическом воздействии поездов. Вибрации (до частоты 16 Гц) от проходящих через мост поездов передаются через устои и (или) непосредственно на основания, они приводят к виброползучести грунтов и соответственно снижению их расчетного сопротивления. Более того, несущая способность основания в наибольшей степени снижается при повышении влажности грунтов в условиях оттаивания после зимнего промерзания, при изменении режимов грунтовых вод и др. По нормам, результатам лабораторных испытаний, исследований свойств грунтов и расчетных обоснований в работах [12; 14] принято снижение физико-механических характеристик и модуля деформации грунтов повышенной влажности. В расчетах напряженно-деформированного состояния, устойчивости и стабильности оснований установлены понижающие коэффициенты в размере 0,6-0,8 для модуля деформации и прочностных характеристик грунтов.

При максимальных нагрузках необходима повышенная осторожность технологических режимов, чтобы не навредить неустойчивому состоянию не только строящегося объекта, но и окружающей среды. Поэтому концепция интенсивной технологии [15; 16] заключается в организации непрерывной диагностики напряженно-деформированного состояния сооружения и контроле процессов упрочнения и консолидации слабых грунтов в режиме реального времени. Динамическая нагрузка от виброкатка при уплотнении основания не должна превышать безопасный предел:

$$P_{k,t}(A_t, V_t, \nu_t) \leq \min[P_{np}, P_b, P_{mc}], \quad (1)$$

где:

$P_{k,t}$  — нагрузка, зависящая от веса, скорости движения  $V_t$ , амплитуды  $A_t$ , частоты  $\nu$  виброрыва катка и контактной жесткости уплотняемого слоя в  $t$ -й период интенсивной технологии;

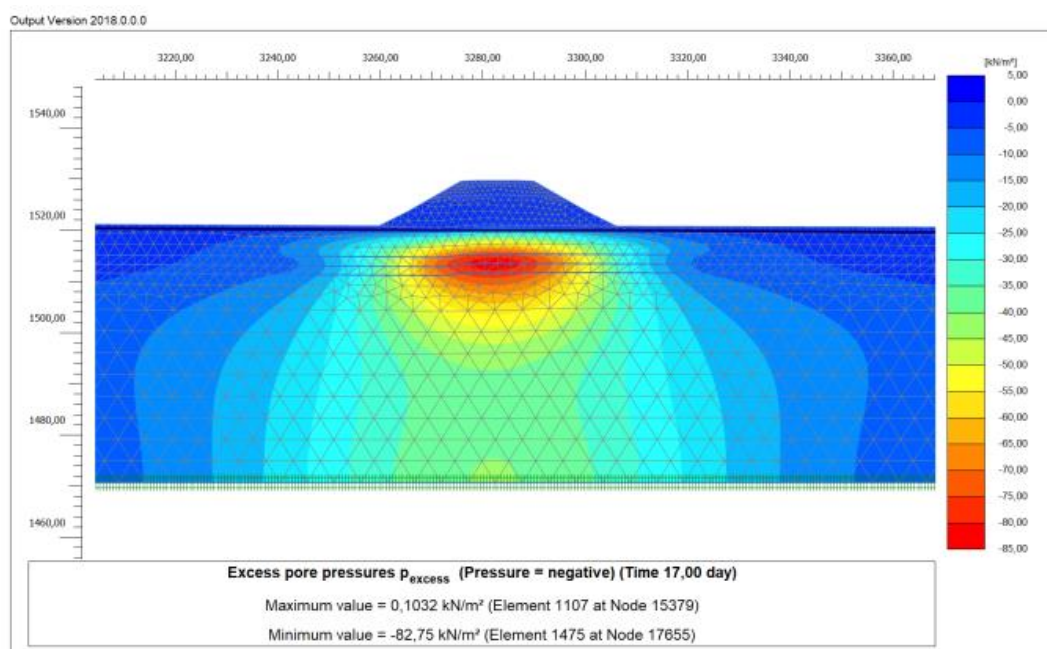
$P_{np}$  — предел прочности песчаного слоя с учетом коэффициента динамичности;

$P_b$  — безопасная нагрузка для верхнего слоя по сдвигу;

$P_{mc}$  — предельно допустимая по тиксотропии вибронагрузка.

Величины  $P_{np}$ ,  $P_b$  и  $P_{mc}$  определяются в зависимости от прочностных характеристик каждого слоя грунта, которые изменяются в технологическом цикле уплотнения основания. Технологический режим уплотнения верхнего нестабильного слоя основания виброкатком связан с необходимостью проверки: вибронагрузка должна быть близкой к пределу прочности грунтов и, вместе с тем, не превышать максимальную допустимую нагрузку для стабильности грунтов в основании с учетом коэффициента надежности [15].

На участках распространения слабых грунтов большой мощности (свыше 4 м) выполняют глубинное упрочнение активной зоны основания. Основными конструктивно-технологическими решениями по укреплению слабых оснований земляного полотна ВСЖМ являются свайные фундаменты с гибкими ростверками, которые применяют для снижения нагрузки на слабые грунты от веса тела насыпи, верхнего строения пути и высокоскоростного подвижного состава и передачи ее на нижележащие прочные слои основания, в том числе: буронабивные сваи СФА. Предложенная методика глубинного упрочнения основания обеспечивает повышение модуля деформации и несущей способности слабого основания за счёт уплотнения межсвайного пространства и геосвайного ростверка. В ходе работ следует контролировать датчиками изменение порового давления и соответственно консолидацию грунтов в основании (рис. 2). Расчеты и прогноз осадок и консолидации основания УПЖ необходимо выполнять по методике [15; 17] с моделированием в сертифицированных программных комплексах Midas GTS NX. Если по результатам проверочных расчетов время завершения консолидации превышает директивный срок строительства, принимают меры по снижению порового давления, например, замену слабо дренирующих грунтов в основании.



*Рисунок 2. Изолинии порового давления по завершении отсыпки насыпи ВСМ. (разработано авторами)*

Проектный уровень консолидации земляного полотна должен быть достигнут к стадии укладки первого защитного слоя и верхнего строения пути.

#### 4. Организация мониторинга УПЖ

В зонах проявления опасных природных процессов и явлений в соответствии с нормами<sup>2</sup> организуют систему мониторинга всех составных структур УПЖ, включающую комплекс

<sup>2</sup> СП 22.13330.2016. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений. — М.: Стандартинформ, 2016. — 228 с. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/783/sp-22.pdf>.

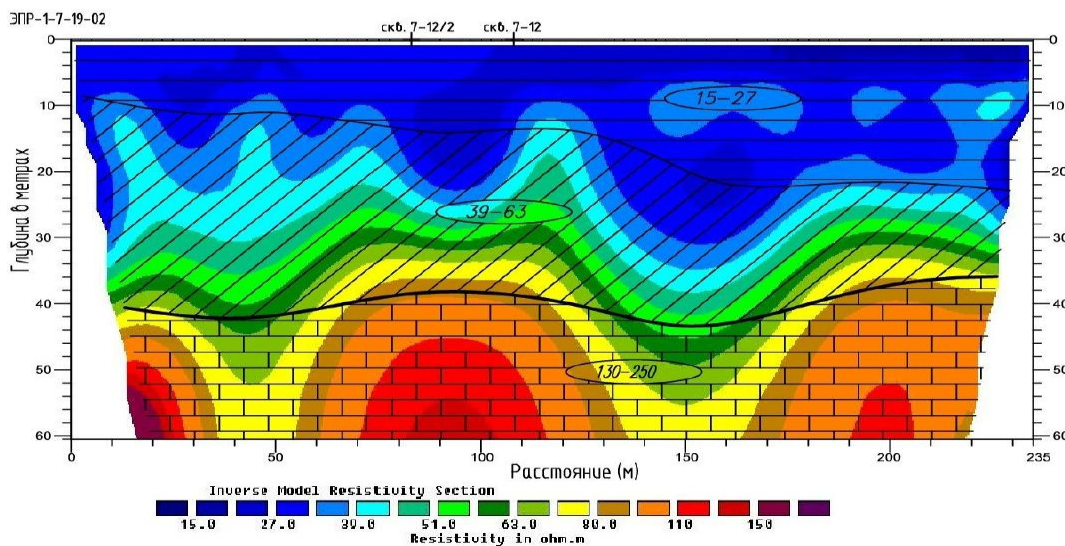
СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. — М.: Стандартинформ, 2017. — 61 с. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/16046/>.

СП 24.13330.2021. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. — М.: Стандартинформ, 2021. — 121 с. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/7f3/24.pdf>.

методов диагностики и режимных наблюдений на стадиях строительства и эксплуатации с учетом параметров нагрузок и инженерно-геологических условий. В программе мониторинга следует учитывать факторы, оказывающие влияние на надежность конструкций, основание сооружения и коммуникации окружающей застройки, а также динамические воздействия при строительстве и эксплуатации. Размеры зоны влияния должны определяться геотехническими расчетами. Уже на этапе упрочнения слабого основания и создания свайного поля важно отметить возможность активного регулирования конструкции и технологии работ в ходе строительного цикла за счет переменной сетки, глубины погружения свай и материалов георостверка. Для этого следует организовать геотехнологический мониторинг состояния всех слоев основания и прогноз несущей способности земляного полотна при переменных технологических нагрузках от свайного оборудования и виброкатков.

Выбор параметров режима интенсивной технологии основан на оценке взаимосвязи механических и геофизических процессов, протекающих в слоях слабого основания земляного полотна, и регулировании строительных нагрузок с применением взаимодополняющих геодезических, параметрических методов и геофизических исследований [12; 15].

При прогнозе несущей способности и анализе фактических осадок свайного поля целесообразно организовать опытные участки с проведением инженерно-геофизических исследований по уточнению литологии и неоднородности слабого основания. Такие работы были выполнены на участке ВСЖМ-1 ст. Новая Тверь — ст. Высоково. Пример обработки и интерпретации данных электротомографии [12] приведен на рисунке 3. Установлено распространение слабых глинистых грунтов в верхнем слое и неоднородность массива в основании земляного полотна для прогноза осадок и разработки проекта производства работ.



**Рисунок 3.** Пример обработки и интерпретации данных электротомографии основания земляного полотна на участке проектирования ВСЖМ-1 (разработано авторами)

Результаты электроразведки и электротомографии позволяют выполнить непрерывное прослеживание инженерно-геологического разреза в межскважинном пространстве по продольным и поперечным профилям на участках постройки инженерных сооружений, выявить и локализовать участки со специфическими грунтами и опасными процессами. Непрерывному изменению технологических нагрузок и воздействий должны соответствовать операционный контроль и прогнозирование рисков разжижения грунтов и хода консолидации в режиме производства работ. Программа мониторинга [12; 14] предусматривает устройство стационарных постов и оборудование контрольно-измерительной аппаратурой и контрольно-оповестительными

сигнализациями по ГОСТ 34783-2021<sup>3</sup>, особенно на участках со сложными инженерно-геологическими условиями для своевременной реакции контрольно-оповестительной системы о состоянии УПЖ на всех стадиях жизненного цикла.

### Заключение

1. Условием обеспечения надёжности и безопасности движения поездов на участках ВСЖМ с различными типами конструкций верхнего строения пути при сопряжении балластного и безбалластного пути является комплексный подход к взаимоувязанному выбору параметров проектирования УПЖ в рабочих зонах — рельсах, скреплениях, подрельсовом основании (шпалах), земляном полотне и грунтовом основании.

2. Комплексное применение конструктивно-технологических решений, особенно на участках со сложными инженерно-геологическими условиями позволяет сформировать функционально сбалансированную переходную структуру, адаптированную под заданные режимы эксплуатации, параметры подвижного состава, природные характеристики участка. Организация стационарных постов мониторинга и программа обследования состояния конструкции и основания УПЖ направлены на диагностику и регулирование надёжности всех рабочих зон на стадиях строительства и эксплуатации.

3. Конструктивно-технологические решения по устройству основания УПЖ на слабых грунтах и организационная структура геотехнического мониторинга вошли в состав Технологического регламента сооружения и контроля качества строительства земляного полотна ВСЖМ [12], разработанного коллективом ученых ИПСС и проектных институтов по заданию ЦТЕХ ОАО РЖД (НТР 2.413).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Fortunato E., Paixao A., Calçada R. Railway Track Transition Zones: Design, Construction, Monitoring and Numerical Modelling / E. Fortunato, A. Paixao, R. Calçada // International Journal of Railway Technology. — 2013. — Т. 2, № 4. — С. 33–58. — URL: <https://www.ctresources.info/ijrt/paper.html?id=49> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.4203/ijrt.2.4.3](https://doi.org/10.4203/ijrt.2.4.3).
2. Stark T., Wilk S., Rose J. Design and Performance of Well-Performing Railway Transitions / T. Stark, S. Wilk, J. Rose // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2016. — № 2545. — С. 20–26. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2545-03> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.3141/2545-03](https://doi.org/10.3141/2545-03).
3. Paixao A., Fortunato E., Calçada R. Transition zones to railway bridges: Track measurements and numerical modelling / A. Paixao, E. Fortunato, R. Calçada // Engineering Structures. — 2014. — Т. 80. — С. 435–443. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029614005616?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.1016/j.engstruct.2014.09.029](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.029).

<sup>3</sup> ГОСТ 34783-2021. Средства технического диагностирования и мониторинга железнодорожного пути высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования. — М.: Российский институт стандартизации 2021. — 20 с. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/769/76927.pdf>.

4. Jain A., Metrikine A., Steenbergen M., van Dalen K. Railway transition zones: evaluation of existing transition structures and a newly proposed transition structure / A. Jain, A. Metrikine, M. Steenbergen, K. van Dalen // International Journal of Rail Transportation. — 2024. — Т. 12, № 6. — С. 979–999. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23248378.2023.2272668> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.1080/23248378.2023.2272668](https://doi.org/10.1080/23248378.2023.2272668).
5. Shahraki M., Warnakulasooriya C., Witt K. Numerical study of transition zone between ballasted and ballastless railway tracks / M. Shahraki, C. Warnakulasooriya, K. Witt // Transportation Geotechnics. — 2015. — Т. 3. — С. 58–67. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391215000094> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.1016/j.trgeo.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.05.001).
6. Локтев, А.А. Моделирование железнодорожного пути переменной жесткости при динамических воздействиях на верхнее строение / А.А. Локтев, Г.Н. Талашкин, К.Д. Степанов // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 2-3(63-64). — С. 40–44. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26293037> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [WDJQGN](https://www.elibrary.ru/edn/WDJQGN).
7. Савин, А.В. Безбалластный путь: монография / А.В. Савин. — Москва: ИНФРА-М, 2024. — 394 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79692066> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [BEDYBO](https://www.elibrary.ru/edn/BEDYBO).
8. Савин, А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т груза брутто / А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 8. — С. 25–28. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39548743> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [LUVYRA](https://www.elibrary.ru/edn/LUVYRA).
9. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути / А.В. Савин, А.М. Бржезовский, В.В. Третьяков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2015. — № 6. — С. 23–32. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24871771> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [UYGZPT](https://www.elibrary.ru/edn/UYGZPT).
10. Cui X., Zhou R., Guo G., Du B., Liu H. Effects of Differential Subgrade Settlement on Slab Track Deformation Based on a DEM-FDM Coupled Approach / X. Cui, R. Zhou, G. Guo, B. Du, H. Liu // Applied Sciences. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 1384. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1384> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.3390/app11041384](https://doi.org/10.3390/app11041384). — EDN: [TMEWZD](https://www.elibrary.ru/edn/TMEWZD).
11. Усов, Д.А. Моделирование участков переменной жесткости перед искусственными сооружениями / Д.А. Усов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 1(56). — С. 79–85. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45611898> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.52170/1815-9262\\_2021\\_56\\_79](https://doi.org/10.52170/1815-9262_2021_56_79). — EDN: [LIPVXW](https://www.elibrary.ru/edn/LIPVXW).
12. Луцкий, С.Я. О технологическом регламенте сооружения и контроля качества строительства земляного полотна ВСМ / С.Я. Луцкий, Т.В. Шепитько, И.С. Уланов // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 10. — С. 8–11. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46664337> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [KZBXZI](https://www.elibrary.ru/edn/KZBXZI).
13. Кудрявцев, С.А. Деформационный критерий и эксплуатационный потенциал / С.А. Кудрявцев, В.В. Пупатенко, Е.С. Данильянц // Мир транспорта. — 2008. — Т. 6, № 2(22). — С. 136–142. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12051761> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [KDSYMR](https://www.elibrary.ru/edn/KDSYMR).

14. Шепитько, Т.В. Регулирование геотехнического строительства на слабых основаниях / Т.В. Шепитько, С.Я. Луцкий // Путь и путевое хозяйство. — 2025. — № 12. — С. 29–32. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=84297322> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [XPUAZR](#).
15. Луцкий, С.Я. Теория и практика транспортного строительства / С.Я. Луцкий, Б.В. Саун. — Москва: Первая Образцовая тип., 2018. — С. 303. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009784349> (дата обращения: 15.01.2026).
16. Патент № 2273687 С1 Российская Федерация, МПК E01C 3/06. Дорожное полотно и способ его возведения: № 2005104907/03: заявл. 24.02.2005: опубл. 10.04.2006 / С.Я. Луцкий, Е.С. Ашпиз, Д.В. Долгов. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37974593> (дата обращения: 15.01.2026). — EDN: [WDTGXO](#).
17. Тишин, Н.Р. Математическое моделирование роста порового давления в грунтах при приложении динамической нагрузки / Н.Р. Тишин, А.В. Пролетарский, О.Р. Озмидов // Математическое моделирование и численные методы. — 2025. — № 2(46). — С. 50–67. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82780185> (дата обращения: 15.01.2026). — DOI: [10.18698/2309-3684-2025-2-5067](https://doi.org/10.18698/2309-3684-2025-2-5067). — EDN: [BVKFED](#).

**Ulanov Ivan Sergeevich**

NPS High-Speed Technologies LLC, Moscow, Russia  
E-mail: [i.ulanov@npsst.ru](mailto:i.ulanov@npsst.ru)  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=949102](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=949102)

**Gorlov Aleksandr Vyacheslavovich**

NPS High-Speed Technologies LLC, Moscow, Russia  
E-mail: [a.gorlov@npsst.ru](mailto:a.gorlov@npsst.ru)  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=875880](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=875880)

**Lutsky Svyatoslav Yakovlevich**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia  
Institute of Track, Construction and Structures  
E-mail: [lsy40@mail.ru](mailto:lsy40@mail.ru)  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=846369](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=846369)

**Cherkasov Aleksandr Mikhailovich**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia  
E-mail: [a.m.cherkasov@edu.rut-miit.ru](mailto:a.m.cherkasov@edu.rut-miit.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8233-9803>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=472233](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=472233)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57200192573>

**Epifantsev Denis Vadimovich**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia  
Institute of Track, Construction and Structures  
E-mail: [epifantsev.d.2000@gmail.com](mailto:epifantsev.d.2000@gmail.com)  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1239138](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1239138)

## Structural and technological solutions for variable stiffness sections in the design of high-speed railway lines

**Abstract.** The article addresses the problem of ensuring the reliability and safety of train traffic on sections with different types of track superstructure, primarily at the interface between ballasted and ballastless track. A comprehensive approach to selecting design and technological solutions for designing the parameters of a variable stiffness track section across all working zones is proposed — rails, fastenings, sub-rail support (sleepers), roadbed, and subgrade.

The main elements of transition zone structures are considered: transition reinforced concrete slabs, elongated sleepers, additional guard rails, under-sleeper and under-rail pads, sub-ballast mats, adjustable rail fastenings, geosynthetics, stabilizing binders, drainage, and frost-protection layers. For the active zone of the roadbed and embankment foundation, the necessity of diagnosing and forecasting the impact of vibration-dynamic loads on the heterogeneous soil structure is demonstrated. Design and technological solutions can influence several target characteristics simultaneously; the degree of their influence is established for practical selection under given operational conditions. International and domestic experience regarding track deformations on such sections and the engineering measures ensuring their compensation is summarized. The organization of stationary monitoring posts and a program for monitoring the condition of the track structure and its foundation are proposed, aimed at diagnosing and regulating the reliability of all working zones throughout the lifecycle stages.

The practical value of the work lies in refining the criteria and forming a systematic approach to designing variable stiffness track sections, which allows for increasing operational reliability and reducing maintenance costs during the construction and operation of high-speed railway lines.

**Keywords:** high-speed railway; railway track; variable stiffness; loads; deformations; design and technological solutions; monitoring; reliability