

УДК 625.141

Сравнительный анализ модуля упругости балластной призмы при использовании технологий объемного уплотнения и традиционных методов выправки пути в условиях среднего ремонта железнодорожного полотна

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. Сравнительный анализ модуля упругости балластной призмы при использовании технологий объемного уплотнения и традиционных методов выправки пути в условиях среднего ремонта железнодорожного полотна // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 107–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-107-123

Аннотация

Цель: Определение модуля упругости балластной призмы и его неравномерности на участках пути, выправленных способом объемного уплотнения балласта технологической цепочкой путевых машин непрерывного действия (ВПО-С и МПВ), и балластной призмы, выправленной по существующей технологии с применением машин непрерывного и непрерывно-циклического действия (ВПО-С + Dynamic 09-3X) в полном цикле среднего ремонта пути (РС). **Методы:** Измерения проводились при вырезанном шпальном ящике до подошвы шпал динамическим плотномером грунтов ПДУ-МГ4.01 «Удар» с тщательным планированием места установки штампа. На каждый поперечный профиль балластной призмы выполнялось по семь измерений. **Результаты:** Модуль упругости объемного уплотнения балластной призмы участка пути, отремонтированного в объеме капитального ремонта пути третьего уровня и выправленного одинарным проходом машин непрерывного действия ВПО-С и комплекса МПВ, не меньше модуля упругости балластной призмы участков пути, выправленных одинарным проходом с двойной-тройной подбивкой шпал по существующей технологии машиной непрерывно-циклического действия Dynamic 09-3X. Предлагаемая технология обеспечивает требуемые параметры стабилизации пути балластной призмы без дополнительного использования машины динамической стабилизации типа ДСП. Состояние пути после завершения работ по предлагаемой технологии позволяет открывать движение поездов сразу же с проектной скоростью и обеспечивает пропускную способность участка. **Практическая значимость:** Внесение изменений в нормативные документы для снятия барьеров и препятствий при выполнении работ по ремонту пути с применением машин ВПО-С и МПВ. Внесение изменений в нормативные документы в части формирования нормативной базы по учету модуля упругости и деформации балластной призмы при выполнении работ по ремонту пути с применением различных машин, понятия — объемное уплотнение балластной призмы, состояние уплотнения, модуль упругости и модуль деформации балластной призмы и основной площадки земляного полотна и т. д. В процессе продолжения исследований необходимо разработать технологии выправки пути, обеспечивающие сохранение упругих и дренирующих свойств щебеночного балласта и увеличение жизненного цикла верхнего строения пути.

Ключевые слова: Модуль упругости, щебень, выправочные машины, балластная призма, шпальный ящик.

Введение

Балластная призма — ключевой элемент верхнего строения железнодорожного пути, обеспечивающий распределение нагрузки и устойчивость рельсошпальной решетки. Ее упругие и дренирующие свойства напрямую влияют на долговечность пути и безопасность движения. В последние годы внедрение новых технологий ремонта, таких как объемное уплотнение с применением машин непрерывного действия (ВПО-С, МПВ), требует комплексного анализа их эффективности в сравнении с традиционными методами (например, Dynamik 09-3X).

Основным инструментом для оценки упругих свойств балласта является динамический плотномер. Исследования [1, 2] подтвердили, что динамические плотномеры позволяют быстро и с высокой точностью определять деформационные характеристики грунтов, что важно для обеспечения качества ремонтных работ на пути. Важным аспектом является планирование мест установки штампа, что минимизирует влияние локальных неоднородностей балласта.

Технологии объемного уплотнения, основанные на непрерывном воздействии машин ВПО-С и МПВ, демонстрируют повышенную эффективность. Это связано с тем, что МПВ совмещает функции электробалластера, выправочно-подбивочно-отделочной машины, планировщика балласта, динамического стабилизатора пути и подбивочного блока [3]. Важным преимуществом является отсутствие необходимости в динамической стабилизации (ДСП), что сокращает время и стоимость работ.

Машины непрерывно-циклического действия, такие как Dynamik 09-3X, широко применяются в существующей практике. Однако введение новых технологий, высокие затраты на обслуживание техники и независимость от импорта обуславливают необходимость использования современных отечественных машин.

Внедрение технологии объемного уплотнения сталкивается с нормативными ограничениями. В автодорожном строительстве применяются измерения модуля деформации, на основе которого разработан стандарт [4].

Г. Г. Болдырев в своей монографии [5] отмечает, что деформационные характеристики грунтов, такие как модуль упругости и модуль деформации, зависят от метода их определения.

Наиболее информативными являются два способа:

- **статический метод** — непосредственные измерения на месте проведения строительных или ремонтных работ;
- **лабораторный метод** — трехосные стадиометрические испытания.

Однако первый метод сложно реализовать в условиях железной дороги, а второй, хотя и обеспечивает наиболее точные значения, требует значительного времени и не полностью соответствует реальным условиям.

По этой причине наиболее эффективными способами определения деформационных характеристик являются **динамические плотномеры**.

Необходимо отметить, что модуль упругости всегда больше модуля общей деформации и определяется при разгрузке образца, в то время как модуль деформации, характеризующий поведение грунта не только при наличии упругих, но и остаточных деформаций, вычисляется при нагружении образца [6]. В СП [7] дается приблизительная разница между упругим модулем и модулем деформации — примерно в 5 раз.

Таким образом, задачами измерений стали:

1. Определение значений модуля упругости балластной призмы измерителем модуля упругости ПДУ-МГ4.01 «УДАР» до выполнения работ по глубокой очистке балластной призмы и после выправленной машинами непрерывного способа действия ВПО-С, МПВ и непрерывно-циклического способа действия типа Dynamic 09-3X.

2. Получение подтверждения технологии качественной выправки пути с объемным уплотнением балластной призмы машиной МПВ без применения машин с непрерывно-циклическим способом действия и динамического стабилизатора ДСП.

3. Получить подтверждение об отсутствии необходимости проведения послеосадовой выправки пути.

Измерительное оборудование и методика

Измерительное оборудование

При выполнении измерений методом динамического нагружения используется штамповая установка динамического нагружения — измеритель модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «УДАР» (см. рис. 1).

Динамический измерительный комплекс ПДУ-МГ4.01 «УДАР» служит для определения упругих характеристик грунтовых массивов и дорожных конструкций. Принцип работы основан на фиксации величины смещения штампа и регистрации импульсного воздействия, прикладываемого к жесткому цилиндрическому индентору. Основная сфера использования устройства — проверка степени уплотнения земляного полотна и балластной призмы ж/д путей. Конструкция динамического штампа обязана обеспечивать фиксацию деформационных изменений с максимальной погрешностью до 5 % от фактического значения и включать в себя следующие составные части:

1) механизм нагружения — падающий по направляющей штанге груз, создающий импульс нагружения до 10 кН;

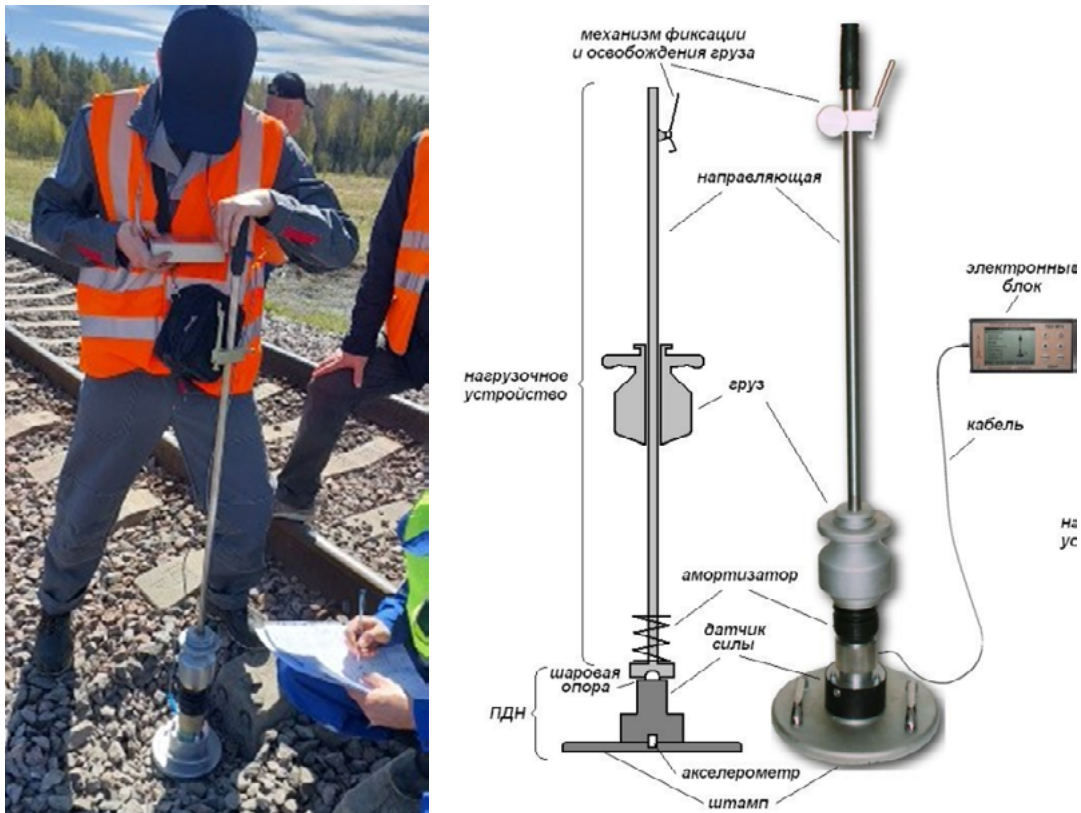


Рис. 1. Измеритель модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «Удар».
Автор: Д. Н. Сомов

- 2) нагрузочную плиту с ручками для переноски, выполненную из стали диаметром $(200,00 \pm 0,25)$ мм толщиной не менее 20 мм;
- 3) переходный упругий элемент (амортизатор) между нагрузочной плитой и нагрузочным устройством;
- 4) регистрирующее устройство.

Методика измерений

Методика динамического воздействия основана на приложении импульсной нагрузки к поверхности балластного слоя или грунтового основания с последующей регистрацией величины проседания нагружаемого элемента под действием приложенного усилия и вычислением деформационных характеристик. Проведение замеров допускается только при положительных температурах воздуха (выше нуля по Цельсию). Балластный материал и грунты основания не должны иметь признаков промерзания.

Точки для проведения измерений выбирают в произвольном порядке по мере необходимости получения результатов измерений на каждом из подконтрольных участков пути. Измерения производятся в межшпальном пространстве на уровне подошвы шпал.

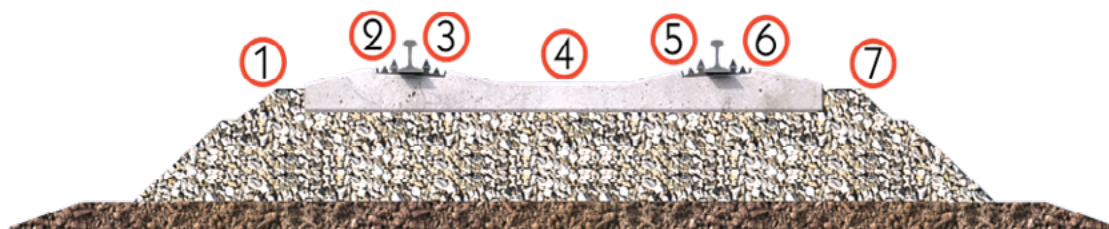


Рис. 2. Места проведения измерений модуля упругости балластной призмы.

Автор: Д. Н. Сомов

В каждом из указанных мест измерений контроль модуля упругости объемного уплотнения балластной призмы проводился в шпальных ящиках в семи местах, указанных на рис. 2:

- на плече балластной призмы по торцам железобетонных шпал по обочине и междупути — 2 измерения;
- в шпальном ящике снаружи и внутри колеи правого и левого рельса — 4 измерения;
- в шпальном ящике по оси пути — 1 измерение.

Перед началом измерений необходимо провести тщательную подготовку поверхности исследуемого слоя. Участок, где будет размещаться измерительная платформа, следует аккуратно выровнять с использованием ручного инструмента, такого как лопата или грабли, соблюдая осторожность, чтобы не нарушить естественную структуру подстилающих слоев. Особое внимание уделяется плотности прилегания платформы к поверхности — между ними не должно оставаться зазоров. Верхний слой в зоне контакта необходимо очистить от каменных включений размером более 5 см, что проверяется визуальным осмотром.

Для обеспечения идеального прилегания и компенсации возможных неровностей допускается использование сухого песка или мелкофракционного щебня. В этом случае на поверхности создают дополнительную выравнивающую прослойку из щебня мелкой фракции, которая должна повторять контуры основания и немного превышать размеры измерительной платформы. Прослойку тщательно уплотняют, не допуская нарушения целостности основного слоя, а количество выравнивающего материала используют минимально — ровно столько, чтобы заполнить имеющиеся неровности.

После завершения подготовительных работ измерительную платформу устанавливают на поверхность. Для достижения максимального прилегания и горизонтального положения допускается легкое притирание или осторожное постукивание по платформе. Затем монтируют измерительную систему, включающую штатив с ударным механизмом и подключаемый электронный блок, который фиксирует необходимые параметры. Все операции выполняются аккуратно, чтобы не сместить платформу и не исказить результаты измерений.

Выполнение измерений проводят в следующей последовательности в каждом месте измерения:

- 1) в шпальном ящике и по торцам шпал подготавливаются места установки прибора;
- 2) выполняют предварительное нагружение тремя сбросами груза без регистрации деформаций для устранения возможных случайных деформаций;
- 3) выполняют три сбрасывания груза с регистрацией деформации при каждом сбрасывании на блоке управления и в журнале результатов работ.

Модуль упругости определены по результатам проведенных измерений для каждой технологической цепочки выправки пути. На ОАО «РЖД» такие замеры по плотности балластной призмы не проводились.

Технологии выправки пути

Существующая технология выправки пути (РС) (рис. 3):

1 этап по старогодным бесстыковым плетям:

ЩОМ-2000 — ВПО-С — ХДВ — Dynamik 09-3X (двух-трехкратный обжим) — РБП;

2 этап по уложенным и сваренным рельсовым плетям:

ХДВ — Dynamik 09-3X — РБП.

Технология объемного уплотнения балласта (РС) (рис. 4):

По уложенным и сваренным рельсовым плетям:

ЩОМ-2000 — ВПО-С — ХДВ — МПВ 1 секция + МПВ 2 секция.

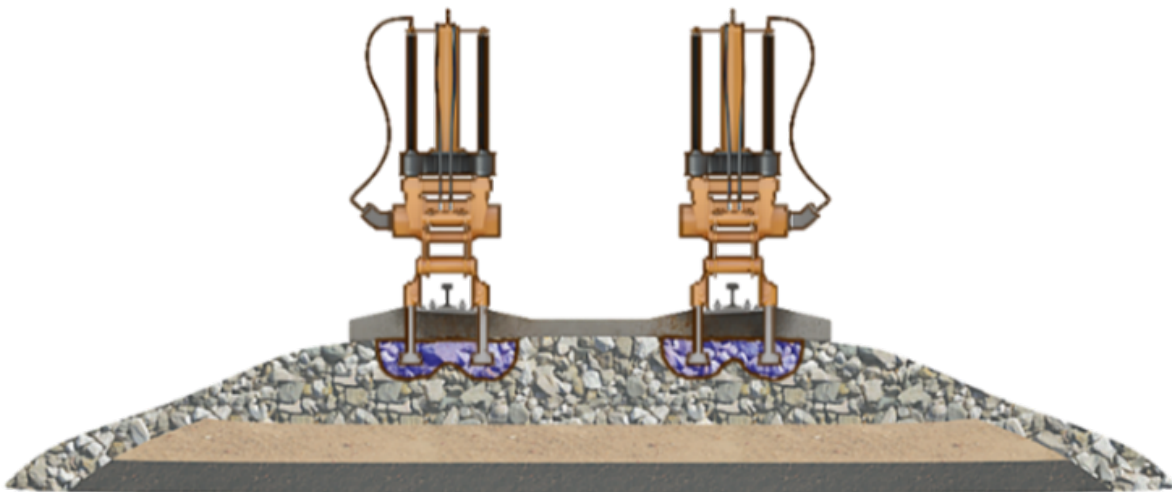


Рис. 3. Подбивочные блоки Dynamik 09-3X (существующая технология).

Автор: Д. Н. Сомов

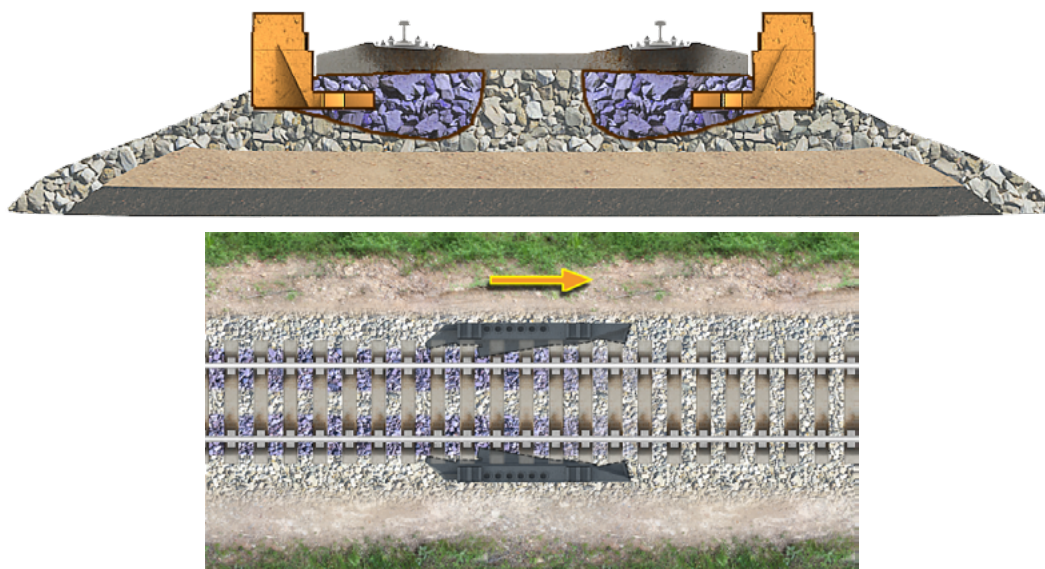


Рис. 4. Технология объемного уплотнения балласта на МПВ. Автор: Д. Н. Сомов

Проведение измерений

Замеры модуля упругости объемного уплотнения балласта проводились на участке капитального ремонта 3-го уровня (1-й путь участка Беклемишево — Рязанцево — Шушково) в 2024 г. Измерения выполнялись:

- до начала ремонтных работ;
- после выправки пути каждой выправочной машиной;
- по завершении работ как по существующей технологии, так и по технологии объемного уплотнения балластной призмы».

Грузонапряженность 1-го пути составляет 73,34 млн т брутто в год. Пропущенный тоннаж участка — 912,84 млн т брутто/км. Проведены замеры в 47 местах на 7 участках. Всего было проведено 332 замера. Время проведения одного замера при предварительно подготовленной площадке в шпальном ящике на уровне подошвы шпал составляет 4 мин.

Результаты измерений

Значение модуля упругости определяется из выражения (1)

$$E = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma}{4L} (1 - \mu^2), \quad (1)$$

где L — амплитуда перемещения, м;

μ — коэффициент Пуассона;

d — диаметр нагружаемого штампа, м;

σ — значение контактного напряжения, рассчитанное по формуле (2)

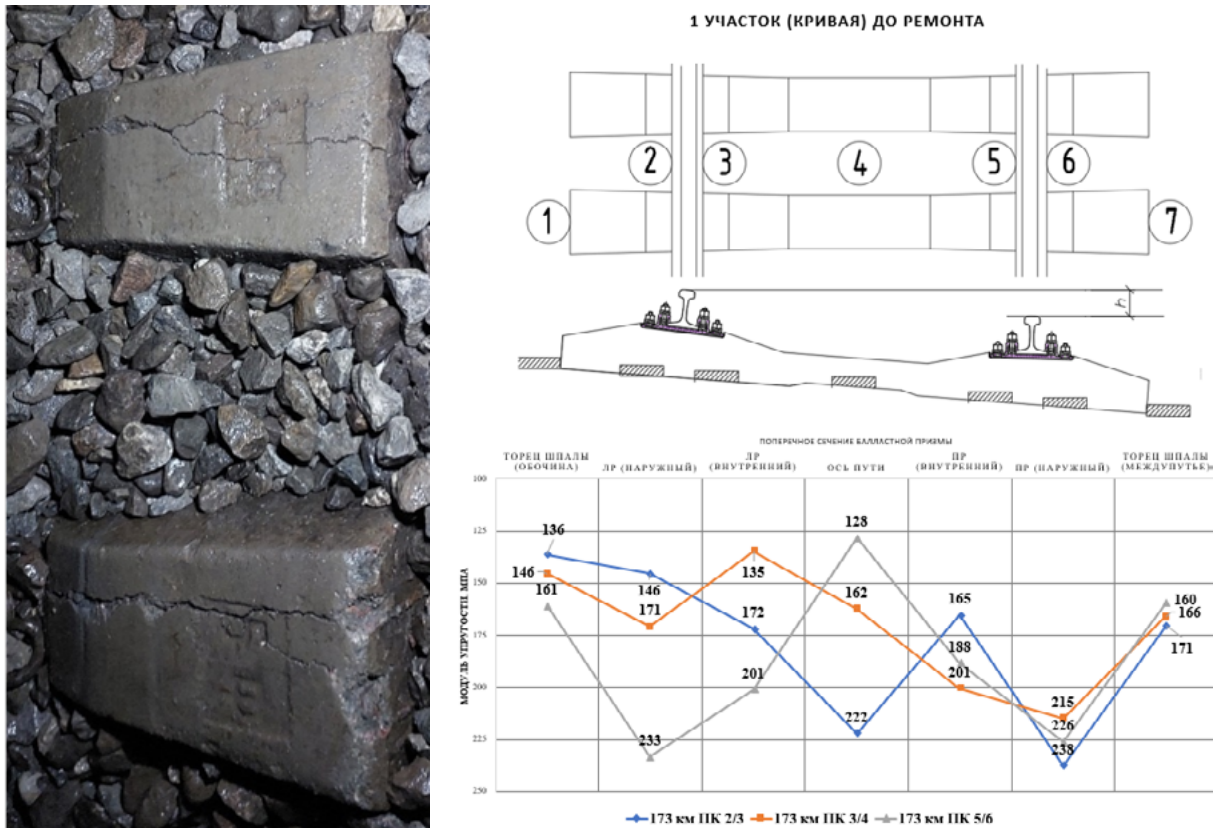


Рис. 5. Анализ объемного уплотнения в круговой кривой 173 км (правая) по состоянию до ремонта пути, в МПа. Автор: Д. Н. Сомов

$$\sigma = \frac{4F}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где F — сила удара, Н.

В процессе текущего содержания пути в круговой кривой при многократных выправках непрерывно-циклическими машинами произошло значительное уплотнение балластной призмы. Достигнутые показатели составили 215–238 МПа, что привело к потере дренирующих и упругих свойств балластной призмы. Это, в свою очередь, стало причиной разрушения верхнего строения пути (рис. 5).

В ходе объемного уплотнения балластной призмы на той же кривой машина ВПО-С работала вслед за щебнеочистительной машиной ЩОМ-2000 с объемным уплотнением первого слоя балластной призмы. Модуль упругости подшпального основания составил примерно 100 МПа (рис. 6).

Машина МПВ работала вслед за хоппер-дозаторной вертушкой с объемным уплотнением второго слоя балластной призмы. Модуль упругости подшпального основания составил примерно 120 МПа (рис. 7).

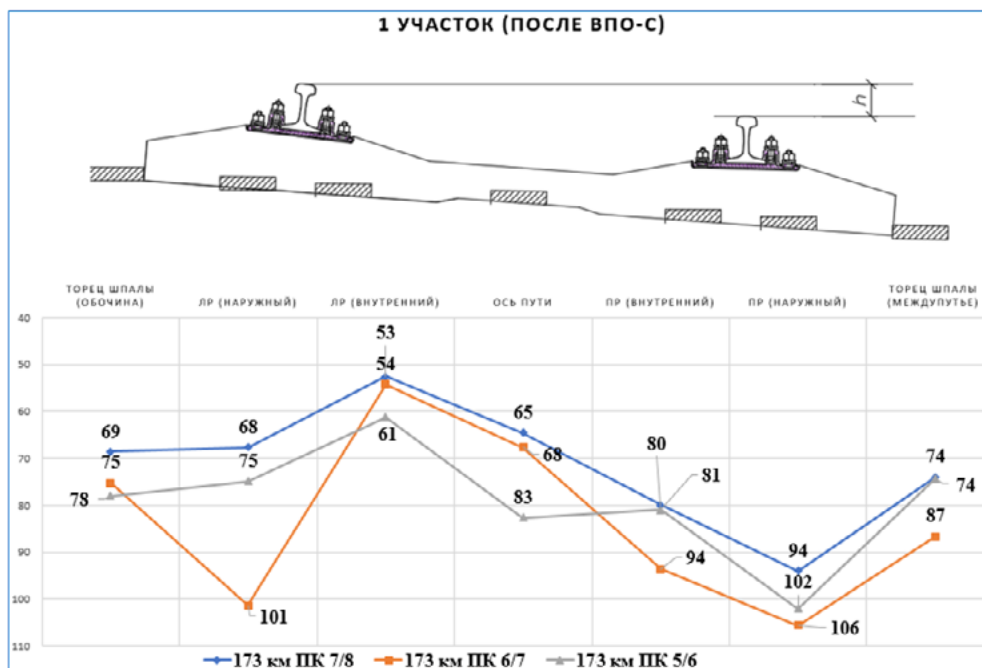


Рис. 6. Результаты объемного уплотнения балластной призмы участка пути в круговой кривой 173 км после выправки пути машиной ВПО-С, в МПа. Автор: Д. Н. Сомов

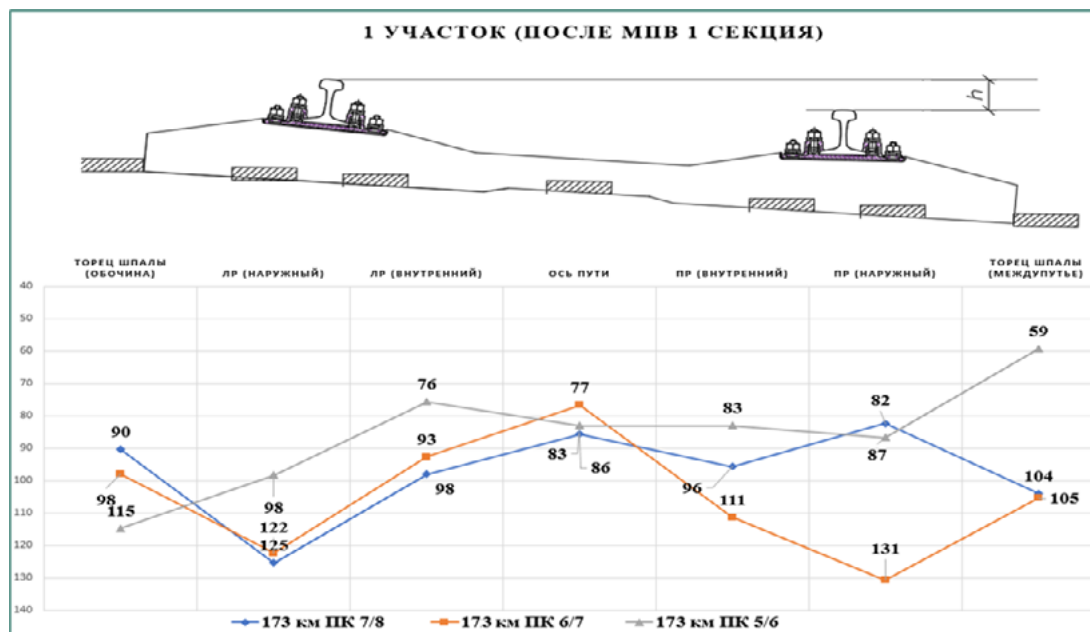


Рис. 7. Результаты объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы в круговой кривой 173 км после выправки пути машиной МПВ 1 секция, в МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Машина МПВ (2-я секция) работала динамическим стабилизатором по стабилизации балластной призмы вслед за МПВ (1-й секцией). Модуль упругости подшпального основания балластной призмы увеличился до 150 МПа (рис. 8).

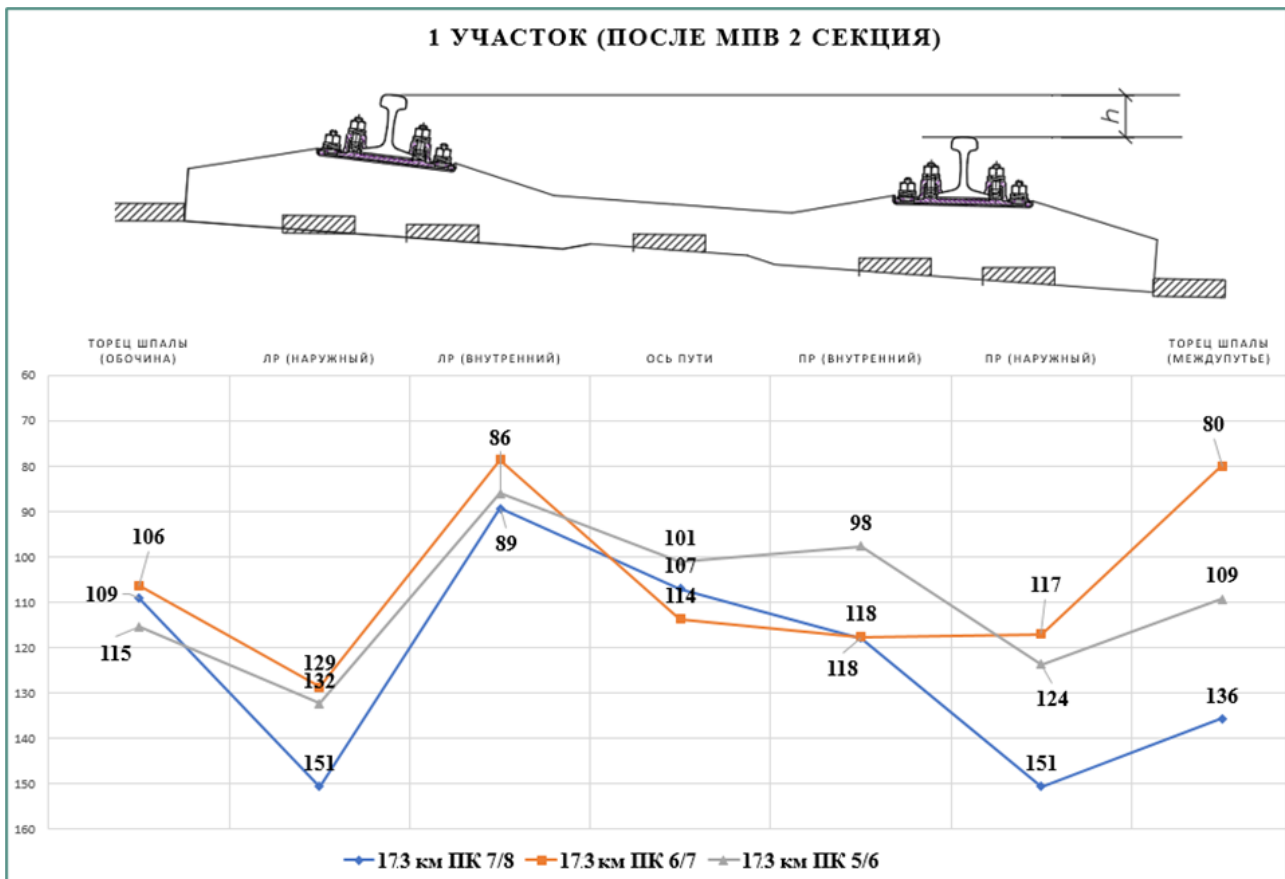


Рис. 8. Результаты объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы в круговой кривой (173 км) после выправки пути машиной МПВ (2-я секция), МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Выполненные измерения объемного уплотнения подрельсового основания балластной призмы на перегоне Беклемишево — Рязанцево в круговой кривой (173 км) после выправки и стабилизации пути машиной МПВ показали среднее значение модуля упругости 130 МПа. Уплотнение балластной призмы, измеренное до ремонта пути, составляет в основном более 180 МПа (рис. 9).

Обратимся к измерениям в круговой кривой (171 км) перегона Беклемишево — Рязанцево перед ремонтом пути.

В процессе текущего содержания пути при многократных выправках непрерывно-циклическими машинами типа ДМ-09-32 уплотнение балластной призмы достигло значительных величин, превышающих 250 МПа. При таких показателях балластная призма теряет свои дренирующие и упругие свойства, что приводит к разрушению верхнего строения пути (рис. 10).

Итоговые значения модуля упругости объемного уплотнения балластной призмы в круговой кривой (165 км) перегона Беклемишево — Рязанцево после выправки пути машиной МПВ (2-я секция) составили около 130 МПа (рис. 11).

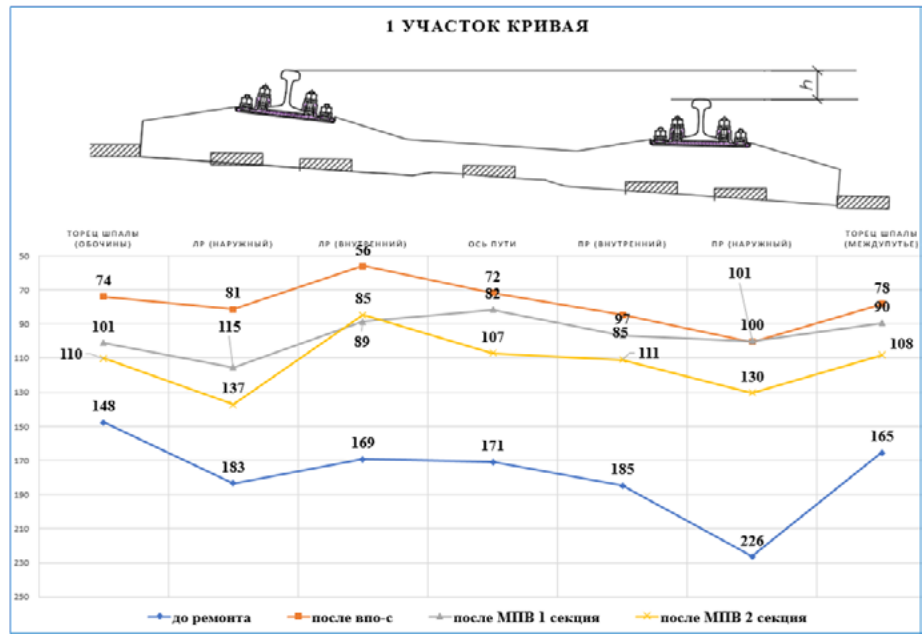


Рис. 9. Итоговые значения модуля упругости по кривой 173 км, МПа.
Автор: Д. Н. Сомов

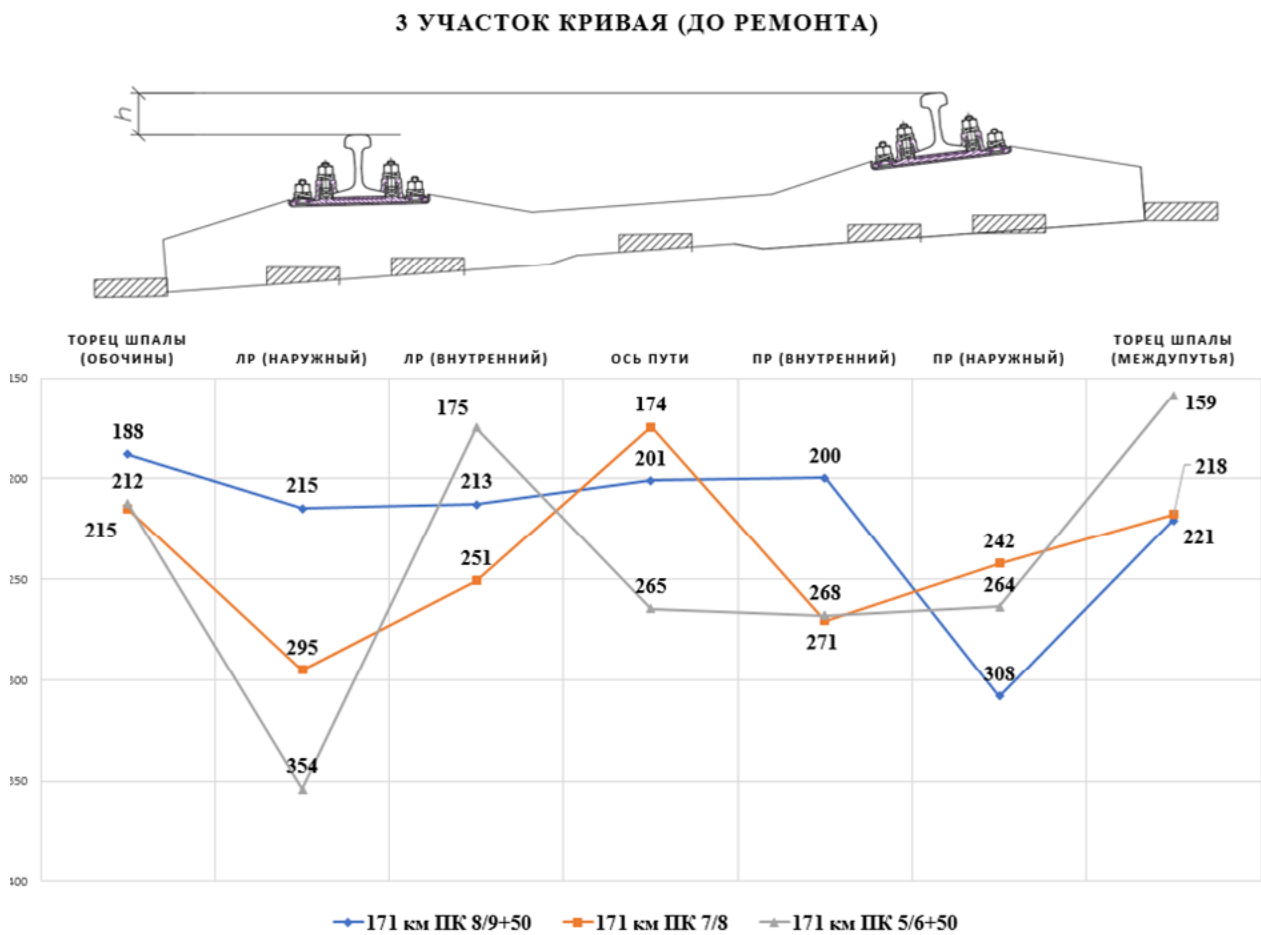


Рис. 10. Анализ объемного уплотнения в левой круговой кривой (171 км) по состоянию до ремонта пути, МПа. Автор: Д. Н. Сомов

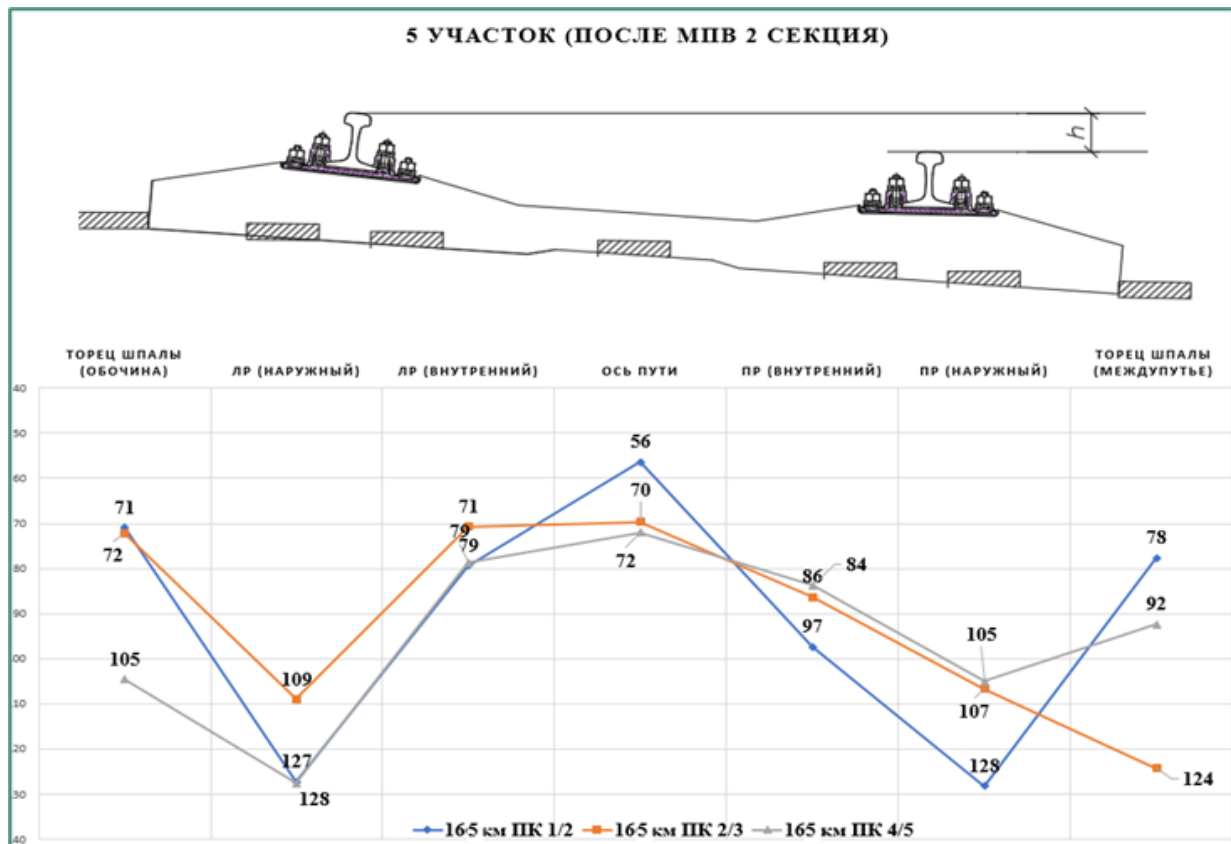


Рис. 11. Результаты средних значений объемного уплотнения балластной призмы в круговой кривой (165 км) после выправки пути машиной МПВ (2-я секция), МПа. Автор: Д. Н. Сомов

Выполненные измерения объемного уплотнения подшпального основания балластной призмы 1-го пути перегона Рязанцево — Шушково в левой круговой кривой после выправки пути машиной Dynamik 09-3X (с двух-трехкратным обжимом и динамической стабилизацией пути) показали модуль упругости 100–130 МПа (рис. 12).

Выводы

По результатам проведенной научно-исследовательской работы по измерению величин модуля упругости участков до выполнения работ и отремонтированных по существующей и технологии объемного уплотнения балластной призмы после выполнения работ в объеме среднего ремонта пути можно сделать следующие основные выводы:

1. Состояние пути всех измеренных участков по данным вагона-путеизмерителя оценивается как «хорошее» и «отличное».
2. Результаты проведенных измерений модуля упругости балластной призмы на разных этапах ее жизненного цикла подтвердили версию об отсутствии равномерного уплотнения щебеночного балласта в подшпальном основании.

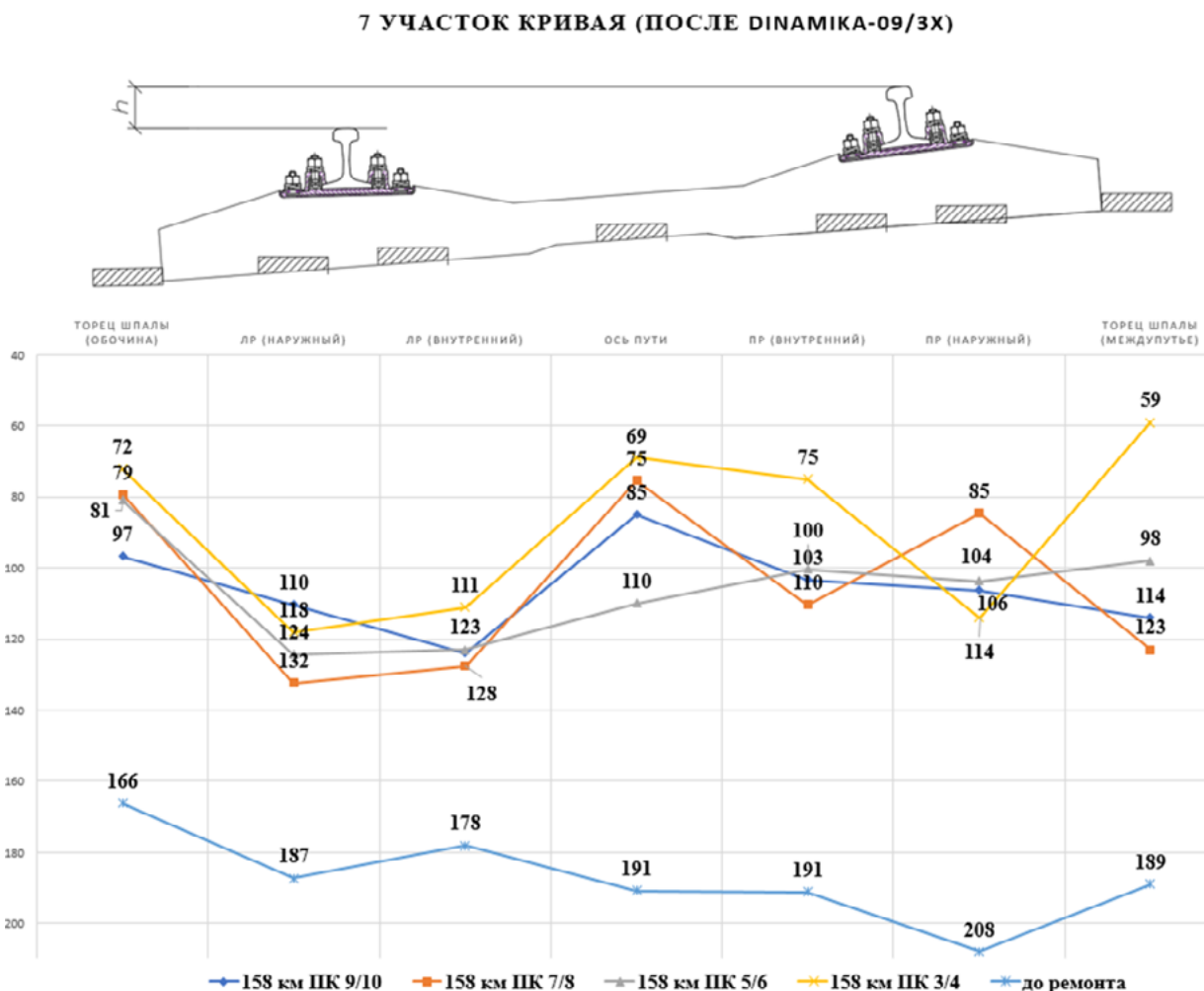


Рис. 12. Анализ объемного уплотнения балластной призмы 1-го пути перегона Рязанцево — Шушково (158 км) в левой кривой по состоянию после работы Dynamik 09-3X, Мпа. Автор: Сомов Д. Н.

3. Измеренная величина модуля упругости подшпального основания балластной призмы перегонов Беклемишево — Рязанцево — Шушково при пропущенном тоннаже более 900 млн т брутто/км в прямом участке составила в диапазоне 200–245 МПа, а в кривых участках пути — в диапазоне от 200 до 350 МПа. Это является чрезмерным уплотнением балластной призмы, при котором щебеночный балласт полностью теряет свои упругие свойства. В результате элементы верхнего строения пути начинают работать с перенапряжением и выходят из строя.

4. Применение последовательной технологии обработки пути с использованием выправочно-подбивочных машин ВПО-С и комплекса МПВ позволяет достичь требуемых параметров стабилизации балластной призмы без необходимости дополнительного привлечения специализированных машин динамической стабилизации. В процессе работ первая секция МПВ осуществляет объемное уплотнение балласта, тогда как вторая секция обеспечивает динамическую стабилизацию пути, что в совокупности дает необходимый эффект уплотнения.

5. Особый интерес представляют результаты измерений модуля упругости на участках, отремонтированных по технологии капитального ремонта 3-го уровня. Как показывают исследования, показатели упругости балластного слоя, обработанного однократным проходом машин непрерывного действия ВПО-С в комплексе с МПВ, оказываются не ниже, а в некоторых случаях даже превышают аналогичные параметры при использовании традиционных методов с многократной (двойной-тройной) подбивкой шпал машинами циклического действия типа Dynamik-09-3X.

Будущие исследования

Проведенные замеры упругих характеристик балластного слоя во время технологических «окон» после выполнения среднего ремонта пути с применением как традиционных, так и новых технологических решений (при полученных значениях модуля упругости в диапазоне 100–130 МПа) указывают на необходимость дальнейших комплексных исследований.

Для всестороннего понимания процессов стабилизации балластной призмы в реальных эксплуатационных условиях требуется организация долгосрочного мониторинга, охватывающего период от момента ввода отремонтированного участка в эксплуатацию до истечения гарантийного срока службы.

Особое внимание в ходе предстоящих исследований следует уделить сравнительному анализу эффективности инновационных и традиционных технологий ремонта при различных условиях эксплуатации и в различные временные периоды. Важнейшей задачей является разработка усовершенствованных методов выправки пути, которые позволят не только сохранить, но и оптимизировать ключевые эксплуатационные характеристики щебеночного балласта — его упругие свойства и дренажную способность. Решение этой задачи напрямую связано с перспективой значительного увеличения ресурса верхнего строения пути и снижением эксплуатационных затрат на его содержание.

Проведение таких исследований позволит получить принципиально новые данные о закономерностях изменения состояния балластного слоя в процессе эксплуатации и разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию технологий ремонта железнодорожного пути.

Список источников

1. Сазонова С. А. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов / С. А. Сазонова, С. Д. Румянцев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8. — № 3. — С. 113–120. — DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13.

2. Комаров Д. А. Определение деформационных характеристик армогрунтового основания экспресс-методом с помощью динамического плотномера / Д. А. Комаров, В. И. Клевко // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 10, № 4. — С. 5–12. — DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01.
3. Борецкий А. Разработка и внедрение новых технологий ремонта пути с применением Универсального путевого комплекса / А. Борецкий // Гудок. — 2021. — № 13. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1551112> (дата обращения: 08.02.2024).
4. ГОСТ Р 59866—2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. — Введ. 2022-04-01. — М.: Стандартинформ, 2022. — 39 с.
5. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: монография / Г. Г. Болдырев. — 2-е изд., доп. и испр. — М.: ООО «Прондо», 2014. — 812 с.
6. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учеб. пособие / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев. — 4-е изд., перераб. и доп. — Пенза: ПГУАС, 2009. — 412 с.
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. — Введ. 2017-06-01. — М.: Минстрой России, 2016. — 156 с.

Дата поступления: 14.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

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

A Comparative Analysis of the Elastic Modulus of the Ballast Prism When Using Volumetric Compaction Technologies and Traditional Methods of Track Straightening in Medium-Scale Railway Track Repair Conditions

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, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For Citation: Somov D. N., Petriaev A. V., Parakhnenko I. L., Teniryadko N. I. A Comparative Analysis of the Elastic Modulus of the Ballast Prism When Using Volumetric Compaction Technologies and Traditional Methods of Track Straightening in the Medium-Scale Railway Track Repair Conditions. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 107–123. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-107-123

Summary

Purpose: To determine the elasticity modulus of the ballast prism and its unevenness in sections straightened by the method of volumetric ballast compaction, using a string of continuous-action track machines (CTM-C and PSM), and the ballast prism levelled with the standard technology, using continuous and continuous-cyclic machines (CTM-C + Dynamic 09-3X), in a full cycle of standard track repair (TR). **Methods:** The measurements were obtained with the sleeper box removed to the bottom of the sleepers. The PDU-MG4.01 'Udar' dynamic soil density meter was employed for this purpose, and the most suitable location for stamp installation was selected. A total of seven measurements were obtained for each cross-section of the ballast prism. **Results:** It has been determined that the modulus of elasticity of the track ballast prism by the method of volumetric compaction repaired as part of level-3 track overhaul and straightened by a single pass of continuous-action machines CTM-C and PSM complex, is not lower than that of the track ballast prism of sections straightened by a single pass of the Dynamic 09-3X continuous-cyclic machine performing standard double-triple piling of sleepers. The technology under discussion provides the required parameters of ballast prism track stabilization without the need for additional DSM dynamic stabilization machines. Following the implementation of the technology in question, it is anticipated that the condition of the track will permit the movement of trains at design speeds. Furthermore, it is expected that the implementation will provide throughput capacity for the section. **Practical significance:** The following amendments have been made to the regulatory documentation in order to establish a regulatory framework that accounts for the elasticity and deformation modulus of the ballast prism during track repair work performed by various machines. The framework must include provisions for the volumetric compaction of the ballast prism, the state of compaction, modulus of elasticity and modulus of deformation of the ballast prism and the main subgrade area, and so forth. In the course of further research, it will be necessary to develop track-straightening technologies that preserve the elastic and draining properties of crushed stone ballast and increase the life cycle of the track superstructure.

Keywords: Modulus of elasticity, crushed stone, track renewal machines/trains, ballast prism, sleeper box.

References

1. Sazonova S. A., Rumyantsev S. D. Primenenie ekspress-metodov dlya opredeleniya kharakteristik nasypnykh gruntov [Application of express methods for determining the characteristics of bulk soils]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture]. 2017, vol. 8, Iss. 3, pp. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13. (In Russian)

2. Komarov D. A., Kleveko V. I. *Opredelenie deformatsionnykh kharakteristik armogruntovo-go osnovaniya ekspress-metodom s pomoshch'yu dinamicheskogo plotnomera* [Determination of deformation characteristics of reinforced soil base by express method using dynamic densitometer]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture]. 2019, vol. 10, Iss. 4, pp. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01. (In Russian)
3. Boretskiy A. *Razrabotka i vnedrenie novykh tekhnologiy remonta puti s primeneniem Universal'nogo putevogo kompleksa* [Development and implementation of new track repair technologies using the Universal track complex]. *Gudok*, 2021, Iss. 13. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1551112> (accessed: February 8, 2024). (In Russian)
4. *GOST R 59866—2022. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Pokazateli deformativnosti konstruktivnykh sloev dorozhnoy odezhdy iz nesvyaznykh materialov i gruntov zemlyanogo polotna. Tekhnicheskie trebovaniya i metody opredeleniya* [GOST R 59866—2022. National Standard of the Russian Federation. Public roads. Indicators of deformability of structural layers of road pavement made of unbound materials and subgrade soils. Technical requirements and determination methods]. Introd. 2022-04-01. Moscow: Standartinform Publ., 2022. 39 p. (In Russian)
5. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248—2010, 2-e izd., dop. i ispr.* [Methods for determining mechanical properties of soils with comments to GOST 12248—2010: monograph, 2nd ed., rev. and corr.]. Moscow: OOO “Prondo” Publ., 2014, 812 p. (In Russian)
6. Boldyrev G. G., Malyshev M. V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty (v voprosakh i otvetakh): ucheb. posobie, 4-e izd., pererab. i dop.* [Soil mechanics. Foundations and footings (in questions and answers): textbook, 4th ed., rev. and corr.]. Penza: PGUAS Publ., 2009. 412 p. (In Russian)
7. *SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83* [SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNIp 2.02.01-83]. Introd. 2017-06-01. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2016, 156 p. (In Russian)

Received: June 14, 2025

Accepted: August 12, 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