

Научная статья

УДК 625.8

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/128-139>

Теоретический метод обоснования конструктивных решений для ремонта дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения

Артемий Викторович Черкашин^{1,✉}, Глеб Леонидович Огурцов¹, Юрий Георгиевич Лазарев¹,
Роман Евгеньевич Долгодворов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Морнефтегазпроект»,
Тюмень, Российская Федерация

✉ jizm@mail.ru

Аннотация. Данная статья представляет собой оригинальное научное исследование, так как впервые после принятия ГОСТ Р 71244-2024 «Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчёт» проводились исследования на базе новых требований. Цель работы – доказать эффективность внедрения предлагаемого метода обоснования конструктивных решений для ремонта дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения и показать его потенциал в улучшении характеристик дорог в малонаселённых регионах при стохастических величинах эксплуатационных показателей и свойств материалов слоёв конструкции дорожной одежды.

Ключевые слова: низкая интенсивность движения, ремонт, эксплуатационная эффективность, дорожные одежды, конструктивные решения, стохастические величины

Для цитирования: Черкашин А.В., Огурцов Г.Л., Лазарев Ю.Г., Долгодворов Р.Е. Теоретический метод обоснования конструктивных решений для ремонта дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 128–139.

Original article

Theoretical method of substantiation of constructive solutions for repair of road surfaces of roads with low traffic volume

Artemiy V. Cherkashin^{1,✉}, Gleb L. Ogurtsov¹, Yuriy G. Lazarev¹, Roman E. Dolgodvorov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation

² Limited Liability Company “Morneftegazprojekt”,
Tyumen, Russian Federation

✉ jizm@mail.ru

Abstract. This article is an original scientific study, since for the first time since the adoption of GOST R 71244-2024 “Low-traffic highways. Road pavement. Design and calculation” studies were conducted based on new requirements. The purpose of the work is to prove the effectiveness of the implementation of the proposed method for substantiating design solutions for repairing road pavements of low-traffic highways and

to show its potential in improving the characteristics of roads in sparsely populated regions with stochastic values of operational indicators and properties of materials of the layers of the road pavement structure.

Keywords: low-traffic roads, repairs, operational efficiency, road clothes, constructive solutions, stochastic values

For citation: Cherkashin A.Ch., Ogurtsov G.L., Lazarev Yu.G., Dolgodvorov R.E. Theoretical method of substantiation of constructive solutions for repair of road surfaces of roads with low traffic volume. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 128–139. (In Russ.).

Введение

Анализ международного и российского опыта показывает [1–3], что применение многофакторной корреляционной модели, в которой учтены различные параметры, такие как интенсивность движения, воздействие нагрузок и климатические условия, позволяет прогнозировать срок службы покрытий автомобильных дорог при различных вариантах проектных решений.

Наибольший экономический эффект достигается при использовании местных материалов, таких как уплотнённый грунт и полимерцементные смеси, что позволяет сократить расходы на строительство и содержание дорог до 30%. Известны исследования (начиная с первой половины 20 века) В.М. Безрука, И.И. Леоновича, Б.И. Врублевского, В.И. Врублевской, А.И. Лысихиной [4–6]. Авторами уже тогда была выявлена проблема использования местных грунтовых и гравийных смесей, которые необходимо укреплять добавками, в том числе вяжущими и смолами, что позволяет снизить транспортные расходы и ускорить строительство автомобильных дорог. Инновационные материалы и технологии играют ключевую роль в увеличении межремонтного срока службы дорог, и, как следствие, снижаются затраты на содержание [2, 7]. Использование материалов для стабилизации и укрепления [3] увеличивает срок службы автомобильных дорог до 20 лет [8]. Грунты, укрепленные цементно-зольными, стекольной пылью и другими добавками, позволяют подбирать более эффективные и экономичные решения, которые используются для оптимизации проектирования при строительстве и ремонте дорожной одежды, в частности объёма затрачиваемого материала и его размещения в слоях дорожной одежды [9–11]. За счёт базовых знаний о свойствах исходных материалов, расчётных подходов и опыта эксплуатации дорог возможна разработка метода обоснования конструктивных решений, который позволяет комплексно прогнозировать состояние дорожной одежды в период эксплуатации [12, 13].

Кроме того, снижение эксплуатационных расходов в зимний период до 32% можно достичь при использовании таких решений, как эксплуатация в накат [14]. В то же время описанные решения должны соответствовать требованиям нормативных стандартов и иметь технико-экономическое обоснование, что играет ключевую роль в адаптации эффективного распределения инвестиций и конструктивных решений дорожных одежд для автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения [8, 15, 16]. Некоторые подходы к устройству (или ремонту) автомобильных дорог не всегда экономически целесообразны, особенно в условиях небольшого транспортного потока, где регулярный капитальный ремонт не требуется, поэтому новые методические подходы, включая представленные в ГОСТ Р 71244–2024, направлены на повышение эффективности содержания таких дорог за счёт снижения эксплуатационных затрат.

Предлагаемый подход базируется на использовании альтернативных методов прогнозирования затрат на содержание, учитывающих уровень износа при низкой интенсивности движения, что может значительно снизить затраты на эксплуатационное содержание автомобильных дорог с сохранением их транспортно-эксплуатационных показателей.

Цель работы – доказать эффективность внедрения предлагаемого метода обоснования конструктивных решений для ремонта дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения и показать его потенциал в улучшении характеристик дорог в малонаселённых регионах при стохастических величинах эксплуатационных показателей и свойств материалов слоёв конструкции дорожной одежды.

Научная новизна исследования заключается в том, что предложенный метод, в отличие от существующих, позволяет для автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения через достижение требуемой величины модуля деформации обосновать конструктивные решения для нового строительства и ремонта дорожных одежд.

Материалы и методы

В настоящей работе исследования базируются на конструкциях дорожных одежд для одной дорожно-климатической зоны в условиях Северо-Западного федерального округа России (умеренно-континентальный климат со средней годовой температурой около +5°C и высокой влажностью) с применением характерных местных грунтов (щебёночно-гравийно-песчаная смесь), которые обеспечивают требуемый модуль деформации.

Одним из методов оценки эксплуатационной надёжности по ГОСТ Р 71244–2024 является проверка конструкции дорожной одежды на колееобразование. Межремонтный срок службы (T) конструкции дорожной одежды определяется временем, при котором величина глубины колеи, являющейся совокупностью остаточных деформаций слоёв конструкции дорожной одежды и истирания материала верхнего слоя, превышает предельно допустимые. Предельно допустимыми значениями по условиям эксплуатации для автомобильных дорог с покрытиями переходного типа категории IVБ-п составляет 30 мм, а на дорогах VA и VB – 35 мм. Тогда условие обеспечения заданных транспортно-эксплуатационных характеристик выражается по формуле (1):

$$\begin{aligned} h_{k(t)} &\leq 30 \text{ мм для IVБ – п,} \\ h_{k(t)} &\leq 35 \text{ мм для VA и VB,} \end{aligned} \tag{1}$$

где $h_{k(t)}$ – величина глубины колеи в течение времени, мм.

Глубина колеи является многомерной случайной величиной, которая зависит от совокупности воздействующих факторов, характерных для заданных условий эксплуатации автомобильной дороги с низкой интенсивностью движения. Поскольку межремонтный срок службы конструкции дорожной одежды зависит от величины глубины и соответствует моменту времени T , когда условие (1) не выполняется, то существует необходимость в выявлении закона распределения глубины колеи в течение времени.

Величину глубины колеи $h_{k(t)}$ предлагается вычислять по формуле (2) [ГОСТ Р 71244-2024]:

$$\tilde{h}_{k(t)} = \tilde{S}_{(t)} + \tilde{h}_{н(t)}, \tag{2}$$

где $S_{(t)}$ – остаточная деформация слоёв дорожной одежды и грунта земляного полотна в момент времени t , мм;

$h_{н(t)}$ – истирание материала верхнего слоя покрытия в полосе наката в течение времени t , мм.

В конструкции дорожной одежды возникают остаточные деформации. Такие деформации могут появляться как у конструкций, выполненных из суглинистого грунта или отсева дробления каменных материалов, или ГПС, так и у конструкций из асфальтобетона. Остаточная деформация, которая появляется при каждом приложении нагрузки, взаимосвязана с деформацией от первого воздействия, и в то же время это довольно длительный процесс ввиду того, что разовая нагрузка от транспортных средств не образует необратимых деформаций [17–20]. Величину накопления остаточных деформаций слоёв можно представить как функцию от времени, которая учитывает стохастический характер входных параметров и вычисляется по формуле (3):

$$\tilde{S}_{(t)} = \int_0^t 1,57 \frac{\tilde{P}_{(t)} \cdot \tilde{D}_{(t)} \cdot \tilde{K}_{(t)}}{\tilde{E}_{д.общ}} dt, \tag{3}$$

где $\tilde{P}_{(t)}$ – удельное давление на покрытие в момент времени t , МПа;
 $\tilde{D}_{(t)}$ – диаметр отпечатка неподвижного колеса расчётного автомобиля, величина, отражающая статистическое распределение фактических размеров пятна контакта за счёт различного давления в колёсах транспортных средств [21, 22], м;
 $\tilde{E}_{д,общ}$ – общий модуль деформации на поверхности покрытия, МПа;
 \tilde{K}_t – коэффициент, отражающий агрессивность повторных нагрузок, вызывающих нарастание остаточных деформаций в момент времени t , определяемый по формуле (4) [ГОСТ Р 71244-2024]:

$$K = 0,5 + 0,65 \cdot \lg(\tilde{N}_{p(t)}), \quad (4)$$

где $\tilde{N}_{p(t)}$ – интенсивность движения на момент времени t , ед./сут., определяемая по формуле (5) [ГОСТ Р 71244-2024]:

$$\tilde{N}_{p(t)} = f_{пол} \int_0^t \sum_{m=1}^n \tilde{N}_{m0,(t)} \cdot k_{з(t)} \cdot (K_{и} \cdot q_1)^T \cdot S_{m,сум} dt, \quad (5)$$

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения: $f_{пол} = 1$ – для однополосной проезжей части дороги; $f_{пол} = 0,55$ – для двухполосной;
 n – общее число различных видов транспортных средств в составе транспортного потока;
 $\tilde{N}_{m0,(t)}$ – число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -го вида дорожной одежды в первый год эксплуатации для наиболее загруженного периода времени, ед./сут.;
 $k_{з(t)}$ – коэффициент загруженности автомобильной дороги в момент времени t , принимающий значения в диапазоне от $k_{з,min}$ до $k_{з,max}$ по синусоидальному закону по формуле (6):

$$k_з = \frac{k_{з,max} + k_{з,min}}{2} + \frac{k_{з,max} - k_{з,min}}{2} \sin\left(2\pi\left(t + \frac{\varphi}{365}\right)\right), \quad (6)$$

где $k_{з,min}$ и $k_{з,max}$ – минимальный и максимальный прогнозируемый коэффициент загрузки автомобильной дороги соответственно;
 φ – параметр сдвига, дни;
 $K_{и}$ – коэффициент, учитывающий изменение в составе транспортного потока (при увеличении в составе транспортного потока количества легковых автомобилей $K_{и} = 1,05$, количества грузовых автомобилей $K_{и} = 1,07$);
 q_1 – показатель ежегодного роста интенсивности движения, составляющий более 1,0;
 $S_{m,сум}$ – суммарный по всем осям коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -го вида к нормативной нагрузке.

Истирание материала верхнего слоя в полосе наката в процессе эксплуатации автомобильной дороги возможно представить как функцию от времени, которая определяется по формуле (7):

$$\tilde{h}_{н(t)} = \int_0^t \tilde{k}_{ш(t)} \left(\tilde{a}_{(t)} + \frac{\tilde{b}_{(t)} \cdot \tilde{N}_{p(t)}}{1000} \right) dt, \quad (7)$$

где $\tilde{k}_{ш(t)}$ – коэффициент, учитывающий эксплуатацию дорог автомобилями с шинами с металлическими шипами в момент времени t , определяемый в диапазоне 2–3 при нормативной осевой нагрузке 60 кН (для укрепленных грунтов и малопрочных каменных материалов $k_{ш} = 3$; для прочных каменных материалов, при наличии поверхностной обработки $k_{ш} = 2$); при нормативной осевой нагрузке 100 кН коэффициент $k_{ш}$ увеличивается на 25%;

$\tilde{a}(t)$ – коэффициент, зависящий от стойкости покрытия к атмосферным и климатическим условиям;

$\tilde{b}(t)$ – коэффициент, зависящий от качества (в основном прочности) материала покрытия, степени его увлажнения, состава и скорости движения.

Возможно допустить, что входные параметры представленной математической модели подчинены нормальному закону распределения с известными значениями математических ожиданий и стандартных отклонений [23, 24]. Для установления аналитической зависимости закона распределения межремонтного срока службы применяется имитационное моделирование. Имитационная модель позволяет предсказать достижение предельного значения остаточной деформации и необходимости работ по профилированию с учётом стохастического характера транспортного потока, природно-климатических условий и конструктивно-технологических решений, что, в свою очередь, вырабатывает основу для оценки затрат на содержание дорог в зависимости от интенсивности движения.

Результаты

В качестве исходной для расчёта принята конструкция дорожной одежды (см. таблицу 1) переходного типа IVБ-п, II дорожно-климатическая зона, подзона 1. Ежегодный прирост интенсивности движения составляет 3%. Коэффициент надёжности дорожной одежды – 0,82.

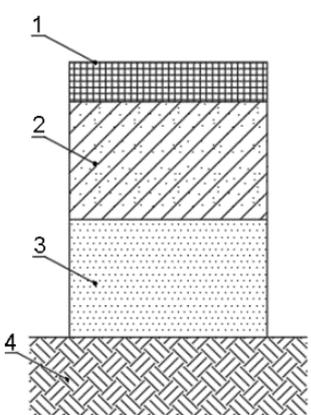
Таблица 1 / Table 1

Конструктивное решение дорожной одежды, разработанное по методике

ГОСТ Р 71244-2024

The constructive solution of a road surface developed according to the methodology

GOST R 71244-2024

Схема	Материал слоя	Толщина слоёв, см
	1 – одиночная шероховатая поверхностная обработка с двойным распределением щебня	3
	2 – щебёночно-гравийно-песчаная смесь, обработанная органическим вяжущим	12
	3 – крупный песок	52
	4 – лёгкий суглинок	Земляное полотно

Входными параметрами при реализации модели являются:

– коэффициент загрузки принимается: для расчётного периода времени $k_{3,max} = 1,0$ и малозагруженного $k_{3,max} = 0,25$;

– состав движения на первый год эксплуатации составляет: легковых автомобилей – 160 авт./сут.; двухосных грузовых автомобилей – 36 авт./сут.; трёхосных грузовых автомобилей – 11 авт./сут.; четырёхосных грузовых автомобилей – 4 авт./сут.;

– интенсивность ежегодного прироста интенсивности движения – 1,03;

– математическое ожидание расчётного модуля деформации конструкции дорожной одежды – 33,8 МПа;

– математическое ожидание давления на колесо – 0,6 МПа;

– математическое ожидание диаметра шины – 326 мм.

На основании входных параметров модели определяем величину глубины колееобразования в полосе наката в течение времени t без устройства слоя шероховатой поверхностной

обработки, а также с его устройством (рис. 1). Основываясь на результатах пробного числа испытаний, установлены статические характеристики для вычисления требуемого количества испытаний (имитаций) с заданной обеспеченностью 0,95.

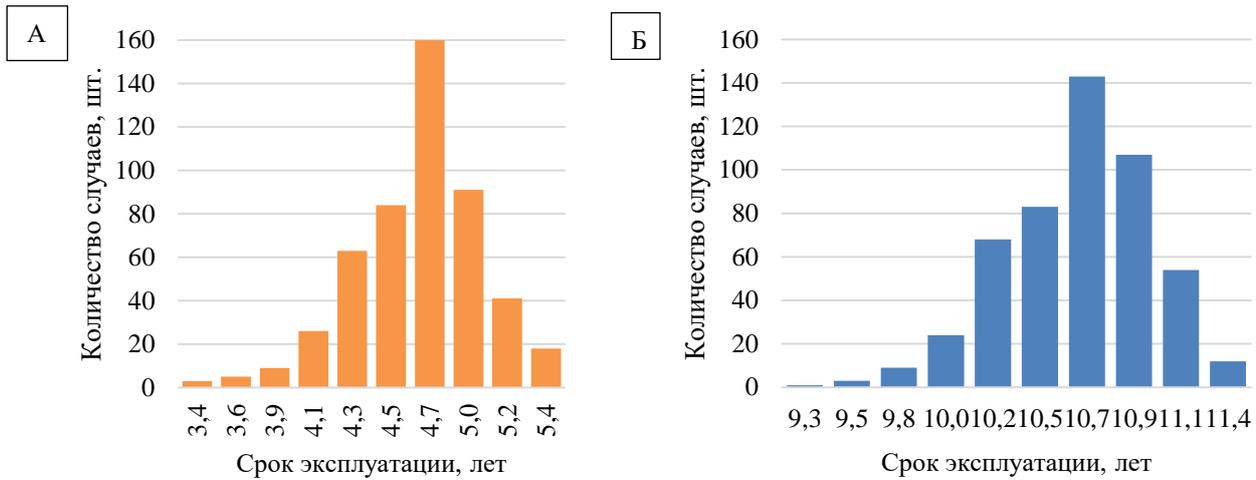


Рис. 1. Распределение времени колееобразования:

А – без устройства слоя шероховатой поверхностной обработки ($\bar{M} = 4,7$ года, $\sigma = 0,36$);

Б – с устройством слоя шероховатой поверхностной обработки ($\bar{M} = 10,7$ года, $\sigma = 0,35$)

Fig. 1. Distribution of track formation time: A – without the device of a rough surface treatment layer ($\bar{M} = 4.7$ years, $\sigma = 0.36$); Б – with the device of a rough surface treatment layer ($\bar{M} = 10.7$ years, $\sigma = 0.35$)

На рисунке 1 по осям абсцисс в качестве числовых представлено среднее значение временного интервала эксплуатации дорожной одежды в годах, когда выявляются случаи колееобразования (согласно формуле 1), количество которых представлено по оси ординат.

В рамках вариативного проектирования предложена конструкция дорожной одежды (табл. 2) с применением конструктивного слоя из укрепленного грунта, выполненного из местных материалов. Укрепленный грунт предложено использовать в качестве верхнего слоя дорожной одежды – покрытие со слоем износа.

Таблица 2 / Table 2

Конструктивное решение дорожной одежды, разработанное по методике ГОСТ Р 71244-2024

The constructive solution of a road surface developed according to the methodology GOST R 71244-2024

Схема	Материал слоя	Толщина слоёв, см
	1 – укрепленный грунт	10
	2 – крупный песок	20
	3 – лёгкий суглинок	Земляное полотно

При этом математическое ожидание общего модуля деформации конструкции дорожной одежды с оптимальным составом добавки составило 71 МПа. Данное решение позволяет сократить расходы при строительстве дорожной одежды относительно исходного варианта.

Результаты имитационного моделирования вероятности колееобразования в полосе наката в течение времени t для конструкции дорожной одежды с применением укрепленного грунта представлены на рисунке 2.

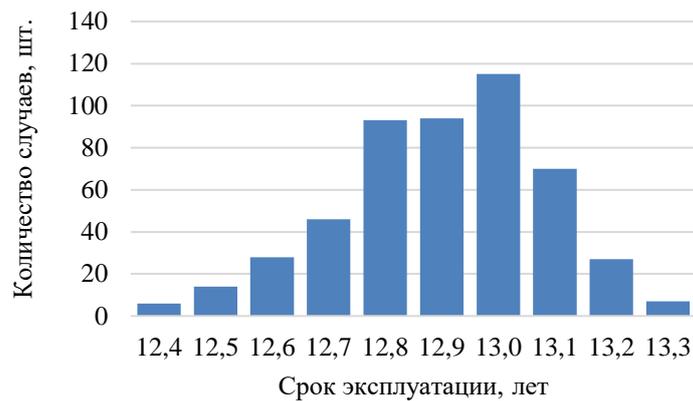


Рис. 2. Распределение времени колееобразования с укрепленным слоем грунта

Fig. 2. Distribution of rutting time with a reinforced soil layer

На рисунке 2 по осям абсцисс в качестве числовых представлено среднее значение временного интервала эксплуатации дорожной одежды в годах, когда выявляются случаи колееобразования (согласно формуле 1), количество которых представлено по оси ординат. Анализ результатов имитационного моделирования (рис. 1 и 2) показывает, что время наработки на отказ по колееобразованию подчиняется нормальному закону распределения во всех случаях.

Полученные аналитические функции плотности распределения времени наработки на отказ позволяют перейти к экономическому обоснованию принятых конструктивно-технологических решений. В обобщенном виде эффект от предлагаемых решений представлен в виде экономико-математической модели. Определение варианта конструкции дорожной одежды выполняется по минимальным суммарным затратам для стадий строительства и эксплуатации с учетом вероятности образования недопустимых дефектов на последнем году. Суммарные затраты вычисляются по формуле (8) [ГОСТ ИСО 2394-2016]:

$$C_{\text{общ}} = C_0 + Q_t \cdot C_{\text{рем}} \rightarrow \min, \tag{8}$$

где C_0 – единовременные капитальные (инвестиционные) расходы;
 Q_t – общее число выполненных ремонтов (отказов) за период t ;
 $C_{\text{рем}}$ – затраты, включающая все переменные затраты на восстановление.

Изменим конструкцию таблицы 1 на конструкцию укрепленного грунта (таблица 2). Результат расчёта стоимости устройств таких конструкций и срок до появления колеи представлен в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Расчёт стоимости работ по строительству участка автомобильной дороги, определяемый для 1 км с шириной проезжей части 7 метров
 Calculation of the construction cost of a road section, determined per 1 kilometer with a carriageway width of 7 meters

	Дорожная одежда с одиночной шероховатой поверхностной обработкой с двойным распределением щебня (таблица 1)	Дорожная одежда без одиночной шероховатой поверхностной обработки с двойным распределением щебня (таблица 1)	Укрепленная дорожная одежда (таблица 2)
Стоимость строительства	12,09 млн руб.	11,89 млн руб.	2,77 млн руб.
Вероятностный срок до появления колеи (согласно имитационной модели), лет	4,7 года	10,7 года	13,0 года

Обсуждение результатов

По результатам оценки представленных гистограмм можно сделать следующие выводы.

Распределение времени колееобразования подчиняется нормальному закону распределения. Низкие значения стандартного отклонения ($\sigma \approx 0,35$) в первых двух случаях свидетельствуют о том, что срок до колееобразования предсказуем вне зависимости от наличия или отсутствия слоя шероховатой поверхностной обработки.

Устройство слоя шероховатой поверхностной обработки позволяет:

– повысить срок эксплуатации до появления колеи в среднем на 6 лет (с 4,7 до 10,7 года), что в 2 раза выше. Модель подтверждает высокую эффективность метода обработки покрытия;

– существенно сократить частоту ремонтов в связи с увеличением межремонтного интервала при содержании автомобильной дороги, что позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы.

Автомобильные дороги без устройства шероховатой поверхностной обработки не подходят для участков дорог с высокой нагрузкой, так как быстрое образование колеи (через 4–5 лет) приводит к необходимости проведения повторных ремонтных мероприятий, что повышает стоимость их эксплуатации.

Использование поверхностной шероховатой обработки рекомендуется для тех автомобильных дорог, где снижение затрат на содержание является приоритетом, а также для тех дорог, где проблемы колейности проявляются быстрее.

По результатам имитационного моделирования конструкции дорожной одежды можно сделать вывод о том, что предложенный вариант конструкции удовлетворяет транспортно-эксплуатационным характеристикам в течение всего срока службы автомобильной дороги и проведение дополнительных мероприятий не требуется. При применении укрепленного грунта в конструкции дорожной одежды достигается снижение затрат на строительство и эксплуатацию автомобильной дороги.

Вероятность появления колеи недопустимой величины обусловлена накоплением остаточных деформаций, которые зависят от общего модуля деформации конструкции дорожной одежды, интенсивности и состава движения автомобилей. На общий модуль деформации конструкции дорожной одежды влияют физико-механические характеристики её конструктивных слоёв. Оптимальным решением для достижения требуемой величины модуля деформации является применение укрепленного грунта, свойства которого зависят от ряда факторов, таких как тип грунта и количество органического и неорганического вяжущего. Выявление зависимостей, определяющих значения физико-механических показателей укрепленного грунта, является направлением дальнейшего научного исследования.

Заключение

Полученные результаты подтверждают, что предлагаемый метод обоснования конструктивных решений через достижение требуемой величины модуля деформации для автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения является эффективным решением. На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Найден значительный потенциал улучшения характеристик дорог в малонаселённых регионах при стохастических величинах физико-механических показателей и свойств материалов слоёв конструкции дорожной одежды.

2. Исследуемые методы расчёта позволяют исключить превышение нормативного значения деформаций, что способствует увеличению межремонтных сроков и снижению частоты и необходимости мероприятий по ремонту.

3. Метод обоснования конструктивных решений направлен на обеспечение возможности адаптации и применения местных грунтов в заданных климатических условиях.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.В. Черкашин – разработка конструктивных решений для ремонта дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения; Г.Л. Огурцов – разработка имитационной и математической модели, вывод формул; Ю.Г. Лазарев – постановка задачи, научное руководство работой; Р.Е. Долгодворов – разработка входных параметров модели. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

A.V. Cherkashin – development of constructive solutions for the repair of road surfaces of road with low traffic volume; G.L. Ogurtsov – development of an imitation and mathematical model, derivation of formulas; Yu.G. Lazarev – problem statement, scientific guidance of the work; R.E. Dolgodvorov – development of input parameters of the model. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скоробогатченко Д.А., Засорина Г.Д. Техничко-экономическое обоснование строительства автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения на основании из переуплотнённого грунта // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 1. С. 121–133. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.12>
2. Голубева Е.А. Оценка экономической эффективности применения полимерцементогрунтовых смесей в дорожном строительстве // Вестник СибАДИ. 2014. Т. 6, № 40. С. 73–78.
3. Praticò F., Saride S., Puppala A. Comprehensive life-cycle cost analysis for selection of stabilization alternatives for better performance of low-volume roads // Transportation Research Record. 2011. № 2204. P. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.3141/2204-16>
4. Безрук В.М., Лысихина А.И. Основы стабилизации грунтов в дорожном строительстве. Москва, ДОРИЗДАТ, 1944. 90 с.
5. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов. Глав. упр. по строительству автомоб. дорог при Совете Министров СССР. Гос. Всесоюз. дор. науч.-исслед. ин-т Союздорнии. Москва: Автотрансиздат, 1956. 248 с.
6. Безрук В.М., Леонович И.И., Врублевский Б.И., Врублевская В.И. Укрепление грунтов нефтью с добавкой карбамидной смолы // Автомобильные дороги. 1969. № 5. С. 24–25.
7. Голубева Е.А., Карамышев И.М., Костюков Н.Е. Обоснование экономической эффективности дорожных конструкций с применением инновационных материалов отечественного производства // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 638–644.
8. Chamorro A., Tighe S.L. Optimized maintenance standards for unpaved road networks based on cost-effectiveness analysis // Transportation Research Record. 2015. № 2473(1). P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.3141/2473-07>
9. Majer S., Budziński B., Lehner P. Elastic modulus of Cement Bound Granular Material (CBGM) // Procedia Structural Integrity. 2024. № 63. P. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.008>
10. Yaghoubi E., Yaghoubi M., Guerrieri M., Sudarsanan N. Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance // Construction and Building Materials. 2021. № 302. P. 124384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124384>
11. Свалова К.В., Кривченко О.В. Укрепление дорожной одежды золошлаковыми смесями (на примере Забайкальского края) // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2023. № 3(56). С. 131–139. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/131-139>
12. Ozkaynak M.I., Yilmaz Y. Prediction of resilient modulus with pre-post experimental data of undisturbed subgrade soils using machine learning algorithms // Transportation Geotechnics. 2024. № 49. P. 101396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101396>
13. Клюев С.В., Слободчикова Н.А. Метод оценки состояния автомобильных дорог // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2024. № 4(61). С. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/139-150>
14. Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Буланов П.Е. Оценка эффективности зимнего содержания автомобильных дорог общего пользования Республики Татарстан с уплотнённым снежным покровом // Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. 2017. № 2(40). С. 288–296.

15. Аниссимов А.В. Эффективное распределение инвестиций на основе анализа расходов и доходов в дорожном строительстве // Экономические проблемы регионов и отраслевых комплексов. 2031. № 1(45). С. 169–171.
16. Kadhim A.J., Banyhussan Q.S., Jameel A.K. Cost-effectiveness analysis of a road improvement proposal based on sustainability Indicators: Case study Al-Nebai-Baghdad highway // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2020. № 8(2). P. 916–932.
17. Матуа В.П., Исаев Е.Н., Чирва Д.В. Методика исследования связных грунтов на накопление остаточных деформаций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 186–193.
18. Александров А.С. Расчёт пластических деформаций материалов и грунтов дорожных конструкций при воздействии транспортной нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 2. С. 3–11.
19. Мыгаль Г.А., Миронов Н.С., Матуа В.П. Снижение накопления остаточных деформаций в конструктивных слоях дорожных одежд и в грунте земляного полотна за счёт применения стабилизирующих и адгезионных добавок // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. № 4. DOI: <https://doi.org/10.15862/21SATS418>
20. Каримов Э.М., Ефименко, С.В., Ефименко, В.Н. Анализ результатов изучения свойств глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог на территории юго-западного Кыргызстана // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2024. № 4(61). С. 130–138. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/130-138>
21. Fernando E. G., Musani D., Park D.-W., Liu W. Evaluation of effects of tire size and inflation. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office. Austin, Texas, 2006. 288 p.
22. Bonaquist R., Surdahl R., Mogawer W. Effect of tire pressure on flexible pavement response and performance // Transportation Research Record. 1989. P. 97–106
23. Карелина М.Ю., Птицын Д.А., Ершов В.С., Акулов А.А. Модель определения объёма выборки транспортных средств для оценки математического ожидания количества исследуемых наземных транспортно-технологических средств. XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021: Материалы XIV мультиконференции в 4 томах. 2021. Т. 4. С. 117–119.
24. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путь навигатор. 2022. № 50(76). С. 30–41. EDN: LNFPMN

REFERENCES

1. Skorobogatchenko D.A., Zazorina G.D. Feasibility study for the construction of roads with low traffic intensity on the basis of over compacted soil. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 121–133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.12>
2. Golubeva E.A. Evaluation of economic efficiency of using polymer, cement and soil compositions in road construction. *Vestnik SibADI*, 2014, vol. 6, no. 40, pp. 73–78. (In Russ.).
3. Praticò F., Saride S., Puppala A. Comprehensive life-cycle cost analysis for selection of stabilization alternatives for better performance of low-volume roads. *Transportation Research Record*, 2011, no. 2204, pp. 120–129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.3141/2204-16>
4. Bezruk V.M., Ly`sixina A.I. Fundamentals of soil stabilization in road construction. Moscow, DORIZ-DAT, 1944. 90 p. (In Russ.).
5. Bezruk V.M. Theoretical foundations of soil stabilization. Main Directorate for Construction of Highways under the Council of Ministers of the USSR. State All-Union Road Research Institute of So-yuzdornii. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1956. 248 p. (In Russ.).
6. Bezruk V.M., Leonovich I.I., Vrublevskij B.I., Vrublevskaya V.I. Soil Stabilization using oil with a urea-formaldehyde resin additive. *Highways*, 1969, no. 5, pp. 24–25. (In Russ.).
7. Golubeva E.A., Karamyshev I.M., Kostyukov N.E. Justification of the economic efficiency of road structures using innovative road construction materials of domestic production. *Education. Transport. Innovations. Construction: Collection of materials of the III National scientific and practical conference*, 2020, pp. 638–644. (In Russ.).
8. Chamorro A., Tighe S.L. Optimized maintenance standards for unpaved road networks based on cost-effectiveness analysis. *Transportation Research Record*, 2015, no. 2473(1), pp. 56–65. DOI:

- <https://doi.org/10.3141/2473-07>
9. Majer S., Budziński B., Lehnerb P. Elastic modulus of Cement Bound Granular Material (CBGM). *Procedia Structural Integrity*, 2024, no. 63, pp. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.008>
 10. Yaghoubi E., Yaghoubi M., Guerrieri, M., Sudarsanan, N. Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance. *Construction and Building Materials*, 2021, no. 302, p. 124384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124384>
 11. Svalova K., Krivchenko O. Strengthening the road pad with ash and slag mixtures (on the example of the Transbaikal territory). *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2023, no. 3, pp. 132–140. (In Russ.).
 12. Ozkaynak M.I., Yilmaz Y. Prediction of resilient modulus with pre-post experimental data of undisturbed subgrade soils using machine learning algorithms. *Transportation Geotechnics*, 2024, no. 49, p. 101396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101396>
 13. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A. The method of assessing the condition of roads. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 4(61), pp. 139–150. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/139-150>
 14. Mavliev L.F., Vdovin E.A., Fomin A.Yu., Bulanov P.E. Evaluation of winter maintenance of highways of the common use of the Republic of Tatarstan with a dense snow cover. *Design and Construction of Roads, Subways, Airfields, Bridges and Transport Tunnels*, 2017, no. 2(40), pp. 288–296. (In Russ.).
 15. Anissimov A.V. Efficient allocation of investments based on cost-benefit analysis in road construction. *Economic Problems of Regions and Industrial Complexes*, 2031, no. 1(45), pp. 169–171. (In Russ.).
 16. Kadhim A.J., Banyhussan Q.S., Jameel A.K. Cost-effectiveness analysis of a road improvement proposal based on sustainability Indicators: Case study Al-Nebai-Baghdad highway. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2020, no. 8(2), pp. 916–932.
 17. Matua V.P., Isaev E.N., Chirva D.V. Research methods of residual deformation developed by soil compaction. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2016, no. 3, pp. 186–193. (In Russ.).
 18. Aleksandrov A.S. An analysis of plastic deformation of materials and soils of road structures caused by transport loading. *Structural Mechanics of Engineering Structures and Buildings*, 2009, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.).
 19. Mygal G.A., Mironov N.S., Matua V.P. Reducing the accumulation of residual deformations in the structural layers of pavements and in the subgrade soil through the use of stabilizing and adhesive additives. *Russian Journal of Transport Engineering*, 2018, no. 4(5). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15862/21SATS418>
 20. Karimov E.M., Efimenko S.V., Efimenko V.N. Analysis of the results of studying the properties of clay soils of the roadbed of motorways in the territory of southwestern Kyrgyzstan. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 4(61), pp. 130–138. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/130-138>
 21. Fernando E. G., Musani D., Park D.-W., Liu W. Evaluation of effects of tire size and inflation. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office. Austin, Texas, 2006. 288 p.
 22. Bonaquist R., Surdahl R., Mogawer W. Effect of tire pressure on flexible pavement response and performance. *Transportation Research Record*, 1989, pp. 97–106.
 23. Karelina M.Yu., Pticyn D.A., Ershov V.S., Akulov A.A. Model for determining the sample size of vehicles to estimate the expected value of the number of studied ground transport and technological vehicles. *XIV All-Russian Multi-Conference on Management Problems MKPU-2021: Proceedings of the XIV multi-conference in 4 volumes*, 2021, vol. 4, pp. 117–119. (In Russ.).
 24. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Aver`yanov D.A Simulation modeling of the risk of road structure failure during the inter-repair period. *Route Navigator*, 2022, no. 50(76), pp. 30–41. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Черкашин Артемий Викторович – научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

✉ jizm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6418-3270>

Artemiy V. Cherkashin, Research Fellow, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Огурцов Глеб Леонидович – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

✉ gleb_l_og@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5183-7420>

Gleb L. Ogurtsov, Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Лазарев Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, директор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

✉ lazarev-yurij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5616-1191>

Yuriy G. Lazarev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Долгодворов Роман Евгеньевич – руководитель проекта, Общество с ограниченной ответственностью «Морнефтегазпроект» (Тюмень, Российская Федерация)

✉ road01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0169-5222>

Roman E. Dolgodvorov, Project Manager, Limited Liability Company “Morneftegazproekt” (Tyumen, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 14.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 27.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025.