

УДК: 625.7/8; 691.3; 625.068.2  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.25  
EDN: VXWLUB



## Устойчивость укрепленных грунтов к циклическим нагрузкам в конструкциях дорожных одежд

Е.А. Вдовин<sup>1</sup>, В.Ф. Строганов<sup>1</sup>, П.Е. Буланов<sup>1</sup>, Д.Р. Выборнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Актуальность исследования обоснована необходимостью повышения межремонтных и сроков службы дорожных одежд со слоями из укрепленных грунтов в связи с увеличением нагрузок и интенсивности дорожного движения. Достижение требуемых показателей может обеспечить применение метода комплексной модификации укрепленных грунтов при устройстве слоев дорожных одежд. Однако, данные лабораторных испытаний не отражают реальные условия эксплуатации укрепленных грунтов в дорожных одеждах, что может являться одной из причин недостоверного прогнозирования их сроков службы, т.к. в процессе многократного динамического нагружения материал способен разрушаться и при более низких напряжениях, чем при стандартных испытаниях. За критерии, определяющие поведение в таких случаях, целесообразно принимать показатели выносливости и относительные деформации. Целью работы - повышение устойчивости укрепленных грунтов к циклическим нагрузкам от транспортных средств и погоднo-климатических воздействий в конструкциях дорожных одежд. Задачи - подобрать составы комплексно-модифицированных укрепленных глинистых грунтов для слоев оснований дорожных одежд в III дорожно-климатической зоне; установить зависимости изменения прочности на сжатие и относительных деформаций комплексно-модифицированных укрепленных грунтов в сухом, влажном состояниях и при переменном замораживании-оттаивании от количества приложений циклической нагрузки.

*Результаты.* Проведены испытания укрепленных грунтов на воздействие циклических нагрузок, позволяющие учитывать совместное влияние транспортных средств и изменения погоднo-климатических условий, а также более достоверно прогнозировать сроки службы конструктивных слоев дорожных одежд. Установлены зависимости изменения прочности на сжатие и относительных деформаций укрепленных грунтов от количества циклов нагружения и замораживания-оттаивания при применении методов комплексной модификации.

*Выводы.* Установлена возможность значительного повышения устойчивости укрепленных грунтов к циклическим нагрузкам от транспортных средств и погоднo-климатических воздействий в конструкциях дорожных одежд методом комплексной модификации, что будет способствовать увеличению сроков службы автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** циклические нагрузки, укрепленные грунты, методика испытаний, дорожная одежда, коэффициент выносливости, относительные деформации, комплексная модификация.

**Для цитирования:** Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Буланов П.Е., Выборнов Д.Р. Устойчивость укрепленных грунтов к циклическим нагрузкам в конструкциях дорожных одежд // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 289-302, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.25, EDN: VXWLUB

# Resistance of strengthened soils to cyclic loads in road pavement structures

E.A. Vdovin<sup>1</sup>, V.F. Stroganov<sup>1</sup>, P.E. Bulanov<sup>1</sup>, D.R. Vybornov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The relevance of this study is motivated by the lack of regulatory requirements for the resistance of structural layers of strengthened soil pavements to cyclic vehicle loads, either individually or in combination with weather and climate impacts. As a result, laboratory test data do not reflect the actual operating conditions of strengthened soils in pavements, which may be one of the reasons for unreliable service life predictions. It is known that, under repeated dynamic loading, the material can fail even at lower stresses than those observed in standard tests. Fatigue and relative deformation are recommended as the criteria determining behavior in such cases. Achieving the required fatigue and relative deformation indicators can be achieved by using a method of integrated modification of strengthened soils in the construction of pavement layers. The objective of this study is to improve the stability of strengthened clay soils under cyclic loads from vehicles and weather and climate impacts in road pavement structures. The objectives are to select compositions of complex-modified strengthened clay soils for road base layers in road climate zone III; to establish the dependence of changes in compressive strength and relative deformations of complex-modified strengthened soils in dry, wet, and freeze-thaw conditions on the number of cyclic load applications.

*Results.* A pilot test setup was developed and a methodology for accounting for cyclic loads was improved. Dependences on the number of loading and freeze-thaw cycles for changes in compressive strength and relative deformations of strengthened soils were obtained.

*Conclusions.* Increasing the resistance of strengthened soils to cyclic loads from vehicles and weather and climate impacts in road pavement structures will contribute to increasing their service life when using complex modification methods.

**Keywords:** cyclic loads, strengthened soils, road pavement, fatigue coefficient, relative deformations, complex modification.

**For citation:** Vdovin E.A., Stroganov V.F., Bulanov P.E., Vybornov D.R. Resistance of strengthened soils to cyclic loads in road pavement structures // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 289- 302, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.25, EDN: VXWLUB

## 1. Введение

Социально-экономическое развитие общества предъявляет повышенные требования к функционированию всех элементов транспортной инфраструктуры. Транспортная инфраструктура является одним из ключевых компонентов экономики страны и обеспечивает базовые потребности в мобильности и грузоперевозках [1, 2]. Рост интенсивности движения является одним из факторов, формирующих спрос на транспортные услуги, определяющие долгосрочные стратегии развития дорожной сети страны. Уровень автомобильного трафика служит комплексным индикатором, отражающим как функциональное состояние сети (пропускная способность, надежность), так и ее эксплуатационные (скоростной режим, безопасность) и экономические показатели [3, 4]. Следовательно, поддержание высоких транспортно-эксплуатационных показателей и уровня безопасности дорожного движения представляет собой одну из первостепенных задач для государственных органов и подрядных организаций, эксплуатирующих дорожную сеть [5, 6]. В целях повышения экономической эффективности грузоперевозок наблюдается устойчивая тенденция к увеличению габаритов и массы транспортных средств, прежде всего за счет роста грузоподъемности большегрузного транспорта [7, 8]. Сохранение текущих темпов роста интенсивности движения влияет на увеличение проектных нормативных требований, непредвиденных финансовых затрат на содержание и реконструкцию объектов дорожного хозяйства [9, 10].

В процессе эксплуатации дорожная конструкция находится под комплексным воздействием механических нагрузок от транспортного потока и природно-климатических факторов, что закономерно приводит к постепенному накоплению усталостных повреждений и износу конструктивных слоев дорожных одежд. Воздействие движущегося транспортного средства является результатом суперпозиции статической составляющей от массы и динамических нагрузок, возникающих вследствие вертикальных и горизонтальных возмущений от неровностей покрытия [11]. Благодаря большей длительности приложения, статические нагрузки формируют максимальные деформации в дорожных материалах. В отличие от них, динамические воздействия носят кратковременный импульсный характер, а их интенсивность и спектр определяются параметрами движения (интенсивность, категория транспорта, осевые нагрузки, скорость, полная масса) [12]. Отношение величины динамической нагрузки, инициированной вертикальными колебаниями автомобиля, к статической часто превышает единицу. Кроме того, динамическая составляющая нагрузки усиливается при движении на спусках и значительно повышается с увеличением массы транспортного средства [13].

Напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции формируется под влиянием климатических факторов, в основном от влияния температурно-влажностных колебаний и циклов высыхания. Эти воздействия генерируют в материалах покрытия комплексные напряжения (растяжения, сжатия, сдвига, кручения), что обуславливает снижение их расчетной прочности и долговечности. Ключевым аспектом обеспечения устойчивости дорожной одежды является регулирование влажностного режима в конструкции, т.к. избыточное увлажнение является основной причиной дефектов (трещинообразования, эрозии), требующих восстановления [14, 15]. Повышенная влажность снижает сцепление между частицами материала и его модуль упругости, что нарушает структурную целостность покрытия и резко интенсифицирует его износ под транспортной нагрузкой. Деструктивное влияние влажности потенцируется температурными колебаниями, которые вызывают циклическое расширение и сжатие материалов, способствуя развитию усталостных трещин и прогрессирующему ослаблению всей конструкции. Кумулятивный эффект этих процессов проявляется в ускоренном разрушении дорог, росте эксплуатационных затрат и снижении транспортно-эксплуатационных показателей, что негативно отражается на экономике регионов и комфорте пользователей. Следовательно, учет выявленных взаимосвязей при проектировании и выборе материалов является основой для создания климатически адаптированных дорожных конструкций и рационального использования ресурсов [16].

Прогнозирование ресурса дорожной конструкции представляет собой комплексную оценку ее потенциальной долговечности с учетом проектных параметров транспортного потока и воздействия внешней среды [17, 18]. Основой для такого прогноза является моделирование планируемой интенсивности и состава транспортного потока, а также учет региональных климатических и геотехнических условий, определяемых по результатам метеонаблюдений и инженерных изысканий. Совокупное влияние этих переменных обуславливает накопление повреждений в материале покрытий от циклических нагрузок [19, 20]. Данный процесс является многофакторным, в котором значительное влияние оказывают динамика нагрузок, характеристики применяемых материалов, агрессивность природных факторов и качество строительно-монтажных работ. Анализ механизмов и движущих сил этого процесса составляет основу для разработки научно-обоснованной системы содержания и ремонта, направленной на максимальное использование проектного ресурса конструкции. Таким образом, установление и оценка закономерностей развития усталостных разрушений в конструкциях дорожных одежд является актуальным научным направлением для решения проблем, связанных с надежностью, безопасностью и экономической эффективностью функционирования автомобильных дорог [21, 22].

Применение композитов в дорожных одеждах на основе местных грунтов, укрепленных вяжущими, формирует рациональную стратегию для выполнения работ по возведению автомобильных дорог [23]. Однако, укрепленные глинистые грунты с высокой удельной поверхностью частиц обладают выраженным снижением несущей способности при возрастании влажности [24]. С учетом приоритетов на рациональное использование ресурсов в строительстве, методы модификации свойств укрепленных глинистых грунтов

приобретают особую значимость для дорожно-транспортной отрасли, как один из наиболее перспективных технологических векторов [25, 26].

Наиболее перспективным методом модификации укрепленных грунтов является разработанный метод комплексной модификации [27, 28], эффективность которого подтверждена результатами лабораторных исследований и опытно-промышленной апробации [29]. Однако, для достоверного прогнозирования сроков службы дорожных одежд со слоями из укрепленных грунтов необходимо учитывать реальные условия эксплуатации автомобильных дорог, которые в отличие от лабораторных испытаний, включают совместное воздействие циклических нагрузок от транспортных средств и изменений погодно-климатических факторов. В процессе многократного динамического нагружения материал способен разрушаться и при более низких напряжениях, чем при стандартных испытаниях. Известно, что в качестве основных критериев, определяющих степень устойчивости композитных материалов к циклическим нагрузкам, характеризуются остаточной прочностью (коэффициент выносливости) и величиной относительных деформаций после воздействий<sup>12</sup>. Этот подход может быть применен при испытании материалов дорожных из укрепленных грунтов на устойчивость к совместному воздействию циклических нагрузок от транспортных средств и погодно-климатических факторов. Проведение данных испытаний обеспечит возможность определения степени эффективности методов модификации укрепленных грунтов в повышении устойчивости к циклическим нагрузкам, что недостаточно изучено.

Целью работы является повышение устойчивости укрепленных глинистых грунтов к циклическим нагрузкам от транспортных средств и погодно-климатических воздействий в конструкциях дорожных одежд.

Задачи:

- подобрать составы комплексно-модифицированных укрепленных глинистых грунтов для слоев оснований дорожных одежд в III дорожно-климатической зоне;
- установить зависимости изменения прочности на сжатие и относительных деформаций комплексно-модифицированных укрепленных грунтов в сухом и влажном состояниях от количества приложений циклической нагрузки;
- установить зависимости изменения прочности на сжатие и относительных деформаций комплексно-модифицированных укрепленных грунтов от количества приложений циклических нагрузок и переменного замораживания-оттаивания.

## 2. Материалы и методы

В исследованиях применяли глинистый грунт - суглинок легкий пылеватый. Грунт имел следующие физические свойства: влажность на границе текучести – 30,04 %, на границе раскатывания – 18,42 %, число пластичности – 0,1162, содержание песчаных частиц (2,00-0,05 мм) в грунте по массе – 9,14 %. Укрепление глинистого грунта производили портландцементом (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н. Содержание портландцемента в укрепленных грунтах составляло: 6 %, 10 % и 14 % от массы глинистого грунта. Для изучения влияния метода комплексной модификации укрепленных грунтов на устойчивость к циклическим нагрузкам применяли в качестве модификаторов: додецилтриэтоксисилан (ДТЭС), эфир поликарбоксилата (ПКС) и гидроксид натрия (ГН).

Максимальную плотность и оптимальную влажность глинистых грунтов и укрепленных грунтовых смесей определяли по ГОСТ 22733. Для приготовления и испытания образцов смесей использовали малый прибор стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ.

В соответствии с ГОСТ 23558 определяли следующие показатели образцов в возрасте 28 суток: предел прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при изгибе, коэффициент морозостойкости. Морозостойкость определяли после 15 циклов

<sup>1</sup> Веренько В.А. Дорожные композиционные материалы. Структура и механические свойства / В.А. Веренько. – Мн.: Наука и техника, 1993. – С. 65.

<sup>2</sup> Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – С.272.

переменного замораживания-оттаивания образцов укрепленных грунтов с последующим испытанием на предел прочности при сжатии.

Для определения оптимального количества портландцемента и модификаторов у комплексно-модифицированных укрепленных грунтов проведена оптимизация составов с применением ротатбельного планирования эксперимента второго порядка. При оптимизации в качестве независимых переменных принято содержание модификаторов:  $X_1$  - количество ГН (от 0,05 до 0,15 %),  $X_2$  - ДТЭС (от 0,02 до 0,06),  $X_3$  - ПКС (от 0,10 до 0,30 %) от массы грунта.

Показатели, характеризующие устойчивость к циклическим нагрузкам слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов (коэффициент выносливости и относительные деформации) определяли в условиях, сочетающих динамическую циклическую нагрузку от колес автомобилей и изменение погодных-климатических факторов (сухое и влажное состояние, замораживание-оттаивание). Величины остаточной прочности и абсолютных деформаций укрепленных грунтов определяли при приложении расчетной нагрузки (400000 раз), соответствующей минимальной нагрузке на покрытие автомобильной дороги V технической категории за срок службы.

Экспериментальная установка для испытания образцов методом циклического нагружения состоит из устройства для вертикального нагружения образца (прибор компрессионный КПр-1М), механизма для приложения-снятия нагрузки и климатической камеры (КК-9.4) [30]. Образцы укрепленных грунтов для испытаний изготавливали в форме цилиндров диаметром и высотой ( $h$ ) 50 мм.

В процессе испытаний определяли начальную прочность на сжатие укрепленных грунтов в возрасте 28 суток ( $R_{сж}$ , МПа - до циклических воздействий), остаточную прочность ( $R_{сж\text{ ост}}$ , МПа - после циклических воздействий) и величину абсолютных деформаций ( $\epsilon_a$ , мм - после циклических воздействий).

Коэффициент выносливости ( $K_v$ ) определяли по формуле:

$$K_v = R_{сж\text{ ост}} / R_{сж}, \quad (1)$$

Относительные деформации ( $\epsilon_{отн}$ ) определяли по формуле:

$$\epsilon_{отн} = \epsilon_a / h, \quad (2)$$

Для исследования устойчивости к циклическим нагрузкам укрепленных грунтов применялись комплексно-модифицированные глинистые грунты, укрепленные портландцементом. В качестве сравнения использовали укрепленные грунты без модификации с большим содержанием вяжущего для достижения равного предела прочности на сжатие, как у комплексно-модифицированных укрепленных грунтов.

### 3. Результаты и обсуждение

При обработке результатов экспериментов получены уравнения регрессии второго порядка для физико-механических характеристик: предела прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ), предела прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ), коэффициента морозостойкости ( $K_{мор}$ ) комплексно-модифицированных укрепленных грунтов. Эти модели в кодированных переменных при содержании портландцемента 10 % от массы грунта имеют следующий вид:

$$R_{сж} = 0,97 + 16,29X_1 + 45,35X_2 + 13,11X_3 + 5,36X_1X_2 + 1,07X_1X_3 + 33,04X_2X_3 - 69,47X_1^2 - 661,02X_2^2 - 31,73X_3^2, \quad (3)$$

$$R_{изг} = -0,16 + 4,73X_1 + 18,08X_2 + 2,86X_3 + 0,00X_1X_2 - 0,67X_1X_3 - 13,33X_2X_3 - 20,56X_1^2 - 187,29X_2^2 - 3,96X_3^2, \quad (4)$$

$$K_{мор} = 0,08 + 1,69X_1 + 17,93X_2 + 2,13X_3 + 5,10X_1X_2 + 0,52X_1X_3 - 15,87X_2X_3 - 8,10X_1^2 - 151,74X_2^2 - 2,75X_3^2 \quad (5)$$

Обработка результатов планирования эксперимента обеспечила возможность графического изображения влияния метода комплексной модификации на физико-механические свойства укрепленных грунтов в виде поверхностей отклика (рис. 1).

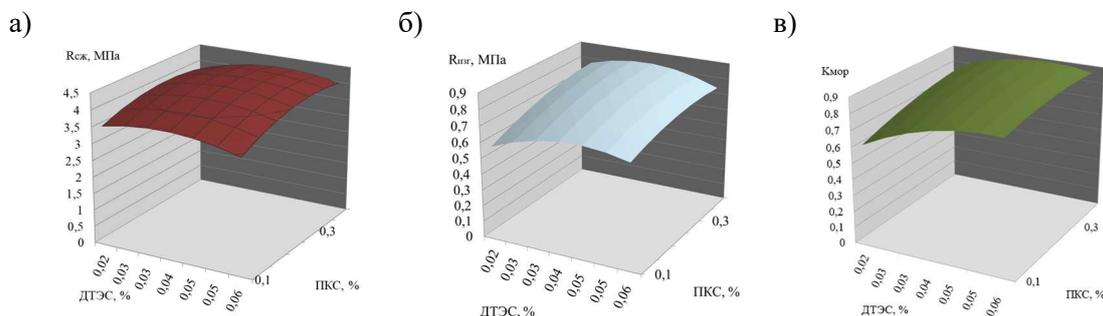


Рис. 1. Влияние комплексной модификации на физико-механические характеристики укрепленных грунтов при содержании 10 % ПЦ и 0,1 % ГН:

а)  $R_{сж}$  б)  $R_{нзг}$  в)  $K_{мор}$   
(иллюстрация авторов)

Fig. 1. Effect of complex modification on the physical and mechanical properties with a content of 10% Portland cement and 0.1% sodium hydroxide:

а)  $R_{str}$  б)  $R_{tens}$  в)  $K_{frost}$   
(illustration by the authors)

В результате оптимизации, подобраны и рекомендованы составы комплексно-модифицированных укрепленных грунтов с прочностью на сжатие в водонасыщенном состоянии  $R_{сж}=4$  МПа, которые могут быть применены для оснований дорожных одежд в III дорожно-климатической зоне (табл.).

По результатам испытаний укрепленных грунтов установлены зависимости изменений прочности на сжатие и относительных деформаций от числа приложений нагрузок, графики функций которых описаны уравнениями второго порядка (рис. 2-7).

Таблица  
Рекомендуемые составы укрепленных грунтов для оснований дорожных одежд в III дорожно-климатической зоне

Наименование грунта	Содержание ПЦ и модификаторов, %		$R_{сж}$ , МПа	$R_{нзг}$ , МПа	$K_{мор}$
Суглинок легкий пылеватый	ПЦ	12,5	4,0	0,76	0,43
	ПЦ	8,0			
	ГН	0,15	4,0	0,80	0,83
	ДТЭС	0,027			
	ПКС	0,30			

Определены коэффициенты выносливости сухих образцов укрепленных грунтов после циклических нагружений (рис. 2): у немодифицированных - 0,84, у комплексно-модифицированных - 0,91, а также величины относительных деформаций: у немодифицированных - 0,003, у комплексно-модифицированных - 0,0025 (рис. 3). После проведения испытаний в сухих условиях установлено, что применение метода комплексной модификации при укреплении грунтов обеспечивает возможность повышения коэффициента выносливости до 8 % и снижения величины относительных деформаций укрепленных грунтов модифицированных составов до 17 % по сравнению с показателями у немодифицированных.

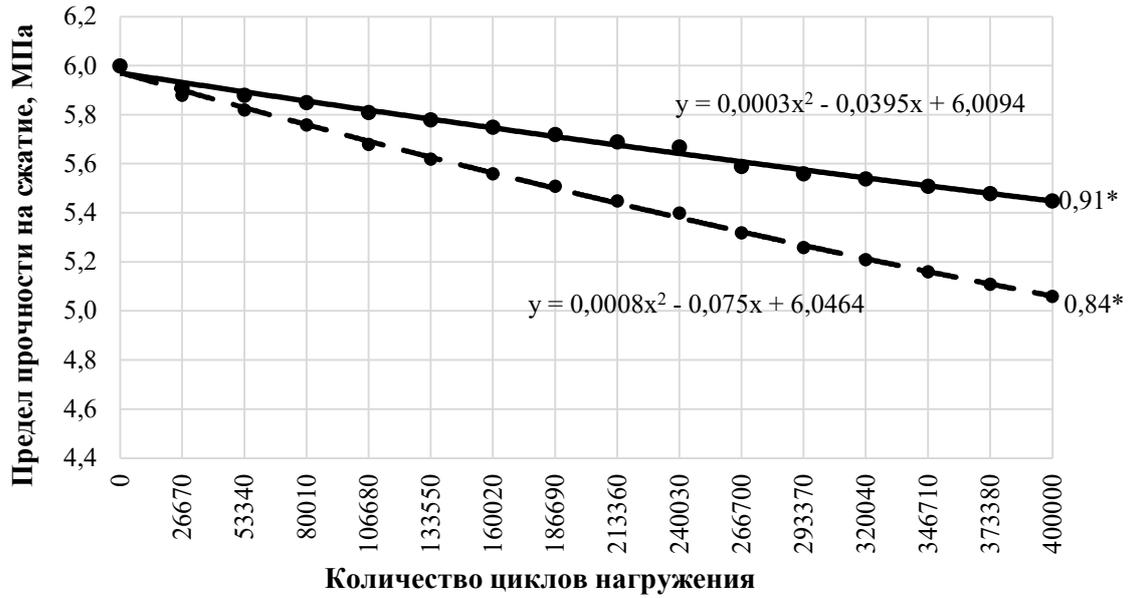


Рис. 2. Зависимость изменения прочности на сжатие укрепленных грунтов в сухом состоянии от количества приложений нагрузки

--- - немодифицированный; — - комплексно-модифицированный;  
\* – коэффициент выносливости укрепленных грунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Compressive strength of dry soil-cement as a function of the number of times the standard load is applied

--- - unmodified; — - complex-modified; \* – endurance coefficient of strengthened soils (illustration by the authors)

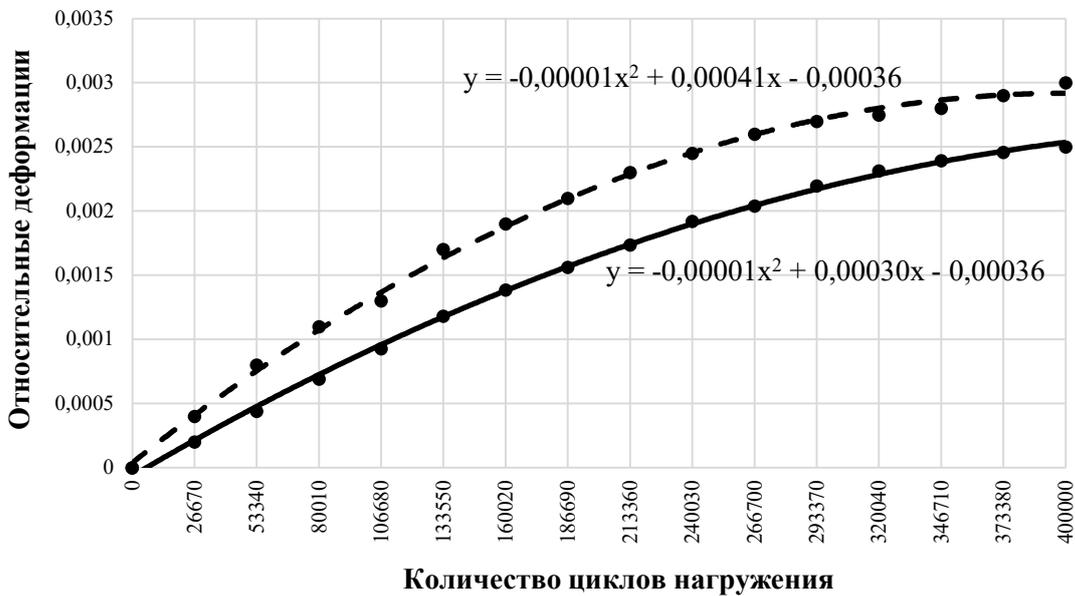


Рис. 3. Зависимость изменения относительных деформаций укрепленных грунтов в сухом состоянии от количества приложений нагрузки

--- - немодифицированный; — - комплексно-модифицированный (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of relative deformations of soil-cement in a dry state on the number of applications of the standard load

--- - unmodified; — - complex-modified (illustration by the authors)

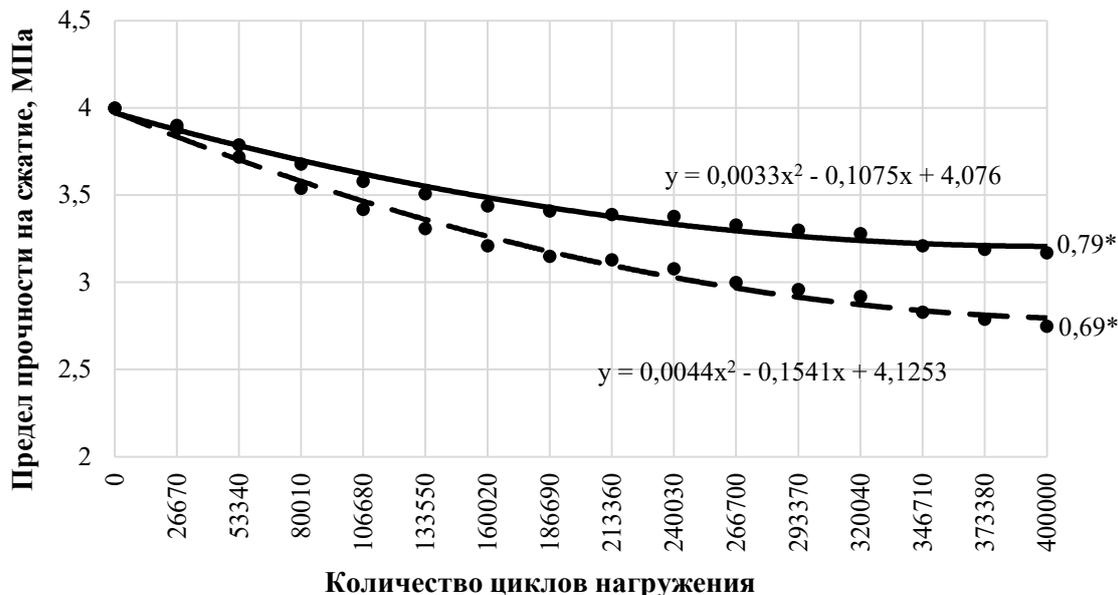


Рис. 4. Зависимость изменения прочности на сжатие укрепленных грунтов в водонасыщенном состоянии от количества приложений нагрузки

--- - немодифицированный; ——— - комплексно-модифицированный;  
 \* – коэффициент выносливости укрепленных грунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Dependence of the compressive strength of soil-cement in a water-saturated state on the number of applications of the standard load

--- - unmodified; ——— - complex-modified;  
 \* – endurance coefficient of strengthened soils (illustration by the authors)

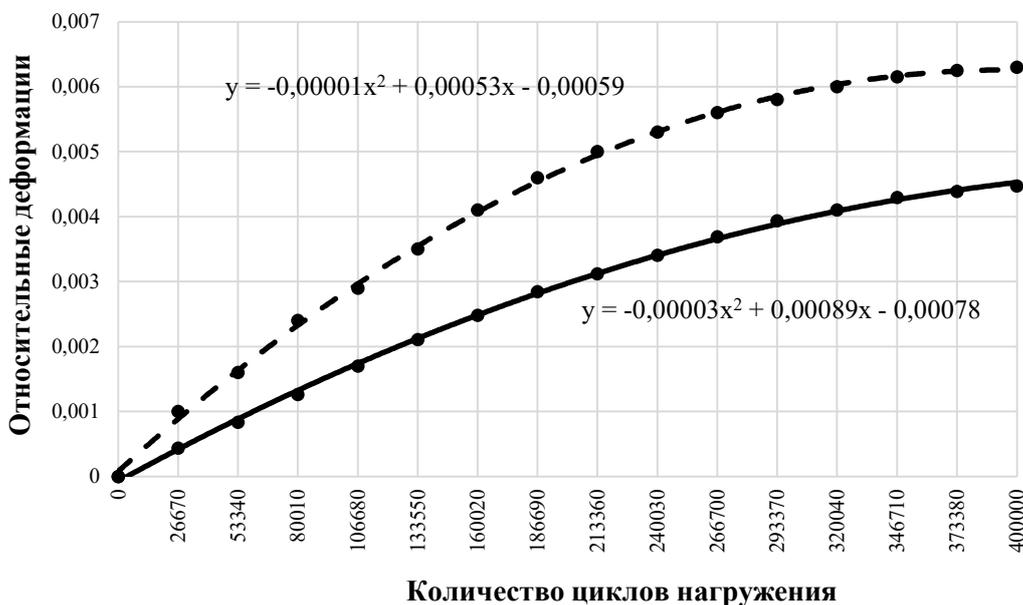


Рис. 5. Зависимость изменения относительных деформаций укрепленных грунтов в водонасыщенном состоянии от количества приложений нагрузки

Fig. 5. Dependence of relative deformations of soil-cement in a water-saturated state on the number of applications of the standard load

--- - unmodified; ——— - complex-modified (illustration by the authors)

Коэффициенты выносливости водонасыщенных укрепленных грунтов после циклических нагружений (рис. 4) составили: у немодифицированных - 0,69, у комплексно-модифицированных – 0,79, а величины относительных деформаций: у укрепленных грунтов без модификации – 0,0063, у комплексно-модифицированных составов – 0,0045 (рис. 5). При испытаниях в водонасыщенном состоянии установлено, что применение

метода комплексной модификации обеспечивает возможность повышения коэффициента выносливости до 15 % и снижения величины относительных деформаций укрепленных грунтов модифицированных составов до 29 % по сравнению с показателями у немодифицированных.

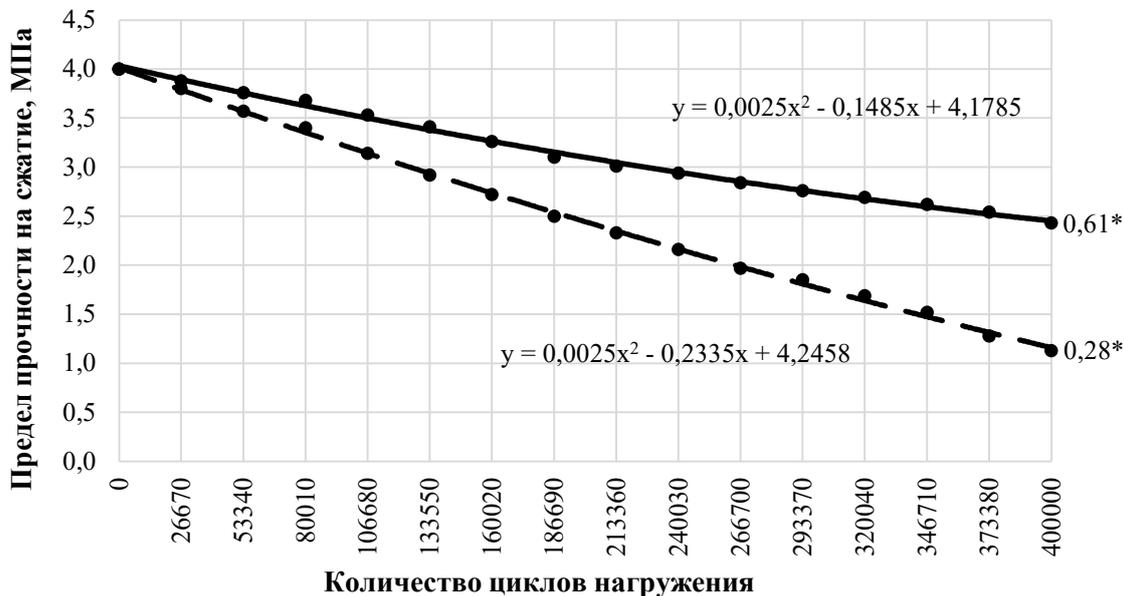


Рис. 6. Зависимость изменения прочности на сжатие укрепленных грунтов при переменном замораживании-оттаивании от количества приложений нагрузки

--- - немодифицированный; ——— - комплексно-модифицированный;  
\* – коэффициент выносливости укрепленных грунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Compressive strength of soil-cement under alternating freezing and thawing as a function of the number of standard load applications

--- - unmodified; ——— - complex-modified;  
\* – endurance coefficient of strengthened soils (illustration by the authors)

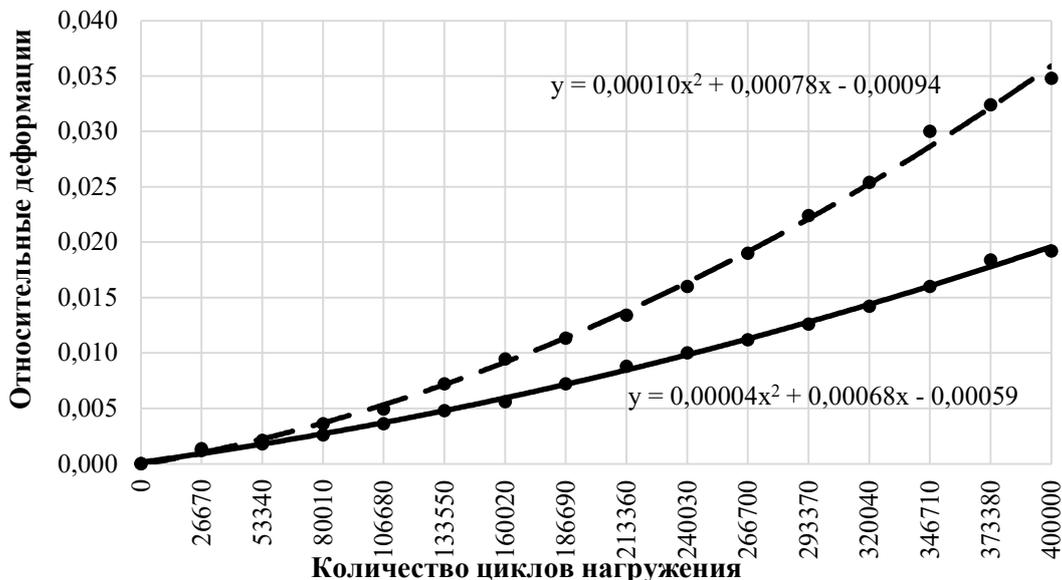


Рис. 7. Зависимость изменения относительных деформаций укрепленных грунтов при переменном замораживании-оттаивании от количества приложений нагрузки

--- - немодифицированный; ——— - комплексно-модифицированный  
(иллюстрация авторов)

Fig. 7. Dependence of relative deformations of soil-cement under alternating freezing and thawing on the number of standard load applications

--- - unmodified; ——— - complex-modified (illustration by the authors)

В условиях сочетания циклических нагрузжений и переменного замораживания-оттаивания (рис. 6, 7) комплексная модификация обеспечила значительное повышение коэффициента выносливости в 2,2 раза и снижение величины относительных деформаций на 84 % по сравнению с использованием технологии укрепления грунтов без модификации.

В результате проведенных исследований определена целесообразность повышения устойчивости укрепленных глинистых грунтов к циклическим нагрузкам от транспортных средств и погодно-климатических воздействий в конструкциях дорожных одежд методом комплексной модификации. Полученные результаты согласуются с подходами в нивелировании отрицательного влияния циклических воздействий при модифицировании бетонных и асфальтобетонных смесей в других строительных материалах и конструкциях [31, 32]. Наибольшая эффективность комплексной модификации укрепленных грунтов обеспечивается в условиях сочетания циклических нагрузжений и переменного замораживания-оттаивания, что имеет важное практическое значение для увеличения сроков службы дорожных одежд в регионах со сложными погодно-климатическими условиями с отрицательными температурами, частыми сезонными, суточными изменениями температур, увлажнением и переходами через 0 °С.

#### 4. Заключение

Обоснована и показана целесообразность повышения устойчивости укрепленных глинистых грунтов к циклическим нагрузкам от транспортных средств и погодно-климатических воздействий в конструкциях дорожных одежд методом комплексной модификации для обеспечения возможности увеличения сроков службы дорожных одежд. Наибольшая технико-экономическая эффективность разработанного метода модификации может быть реализована в регионах со сложными погодно-климатическими условиями.

В результате оптимизации, подобраны составы комплексно-модифицированных укрепленных грунтов с применением методов гидрофобизации, пластификации и изменения ионно-обменного комплекса, рекомендованные для устройства конструктивных слоев оснований дорожных одежд в III дорожно-климатической зоне.

Установлены зависимости изменения прочности на сжатие и относительных деформаций комплексно-модифицированных укрепленных грунтов в сухом и влажном состояниях от количества приложений циклической нагрузки. Применение метода комплексной модификации в сухих и влажных условиях эксплуатации слоев дорожных одежд обеспечивает возможность повышения коэффициентов выносливости и снижения величины относительных деформаций по сравнению с показателями немодифицированных укрепленных грунтов.

Установлены зависимости изменения показателей устойчивости к циклическим нагрузкам комплексно-модифицированных укрепленных грунтов от количества приложений циклических нагрузок и переменного замораживания-оттаивания. В условиях сочетания циклических нагрузжений и переменного замораживания-оттаивания комплексная модификация обеспечила значительное повышение коэффициента выносливости в 2,2 раза и снижение величины относительных деформаций на 84 % по сравнению с использованием технологии укрепления грунтов без модификации.

#### Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

#### Acknowledgments

The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral theses and perform research.

**Список литературы/References**

1. Kushchenko L., Kushchenko S., Novikov A., Eremin S. The traffic intensity and the number of traffic accidents based on probability theory and mathematical statistic forecasting // *Journal of Applied Engineering Science*. 2025. Vol. 23. No. 1. DOI: 10.10.5937/jaes0-54057.
2. Vlasov A. Robust forecasting of traffic flow intensity // *International Journal of Advanced Studies*. 2022. Vol. 12. P. 7-20. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-2-7-20.
3. Zhezherun D. Traffic forecasting on the city road network taking into account the capacity limit // *Three Seas Economic Journal*. Vol. 2. P. 27-33. DOI: 10.30525/2661-5150/2021-2-5.
4. Спиридонова В. В., Клековкина М. П. Основные критерии надежности дорожных конструкций // *Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура*. 2024. Т. 1. №. 5. С. 93-100.  
Spiridonova V. V., Klekovkina M. P. Basic criteria of reliability of road structures // *Highways and transport infrastructure*. 2024. Vol. 1. No. 5. P. 93-100.
5. Шамраева В. В. Прогнозирование интенсивности транспортного потока и оценка потребительских свойств дороги методами машинного обучения // *Фундаментальные исследования*. 2025. №. 2. С. 93-101. – DOI 10.17513/fr.43784.  
Shamraeva, V. V. Forecasting the intensity of traffic flow and assessing the consumer properties of the road using machine learning methods // *Fundamental research*. 2025. No. 2. P. 93-101. DOI: 10.17513/fr.43784.
6. Филиппов Д. А. Моделирование влияния влажности на прочностные характеристики грунта земляного полотна автомобильных дорог // *Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура*. 2024. Вып. 2 (6). С. 84-92. EDN: XPHKMD  
Filippov D. A. Modeling the influence of humidity on the strength characteristics of the soil of the roadbed // *Highways and transport infrastructure*. 2024. Iss. 2 (6). P. 84-92.
7. Collaço F., Teixeira A. C., Machado P., Borges R., Brito T., Mouette D. Road freight transport literature and the achievements of the sustainable development goals – a Systematic Review // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 6. P. 3425. DOI 10.3390/su14063425.
8. Логинова О. А., Кайнов П. Н., Выборнов Д. Р. Исследование изменения конструкции дорожной одежды при увеличении модуля упругости земляного полотна // *Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура*. 2024. № 4 (8). С. 56-63.  
Loginova O. A., Kaynov P. N., Vybornov D. R. Investigation of changes in the construction of the pavement with an increase in the modulus of elasticity of the roadbed // *Roads and transport infrastructure*. 2024. No. 4 (8). P. 56-63.
9. Панкратова А. В., Мельников Н. И., Алекян Р. Р., Ибрагимов Н. И. Экспериментальные исследования по определению перспективной интенсивности движения на двухполосных автомобильных дорогах // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2025. Т. 1. №. 60. С. 44-47.  
Pankratova A.V., Melnikov N. I., Alekyan R. R., Ibragimov N. I. Experimental studies to determine the prospective traffic intensity on two-lane highways // *Technical regulation in transport construction*. 2025. Vol. 1. No. 60. P. 44-47.
10. Fomin A., Khomyakov A. Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. № 105. P.10512. DOI:10.4123/CUBS.105.12.
11. Каменчуков А. В., Кормилицына Л. В., Лопашук В. В., Цупикова Л. С. Влияние сверхнормативной нагрузки на износ и разрушение дорожной одежды // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. Т. 4. Вып. 1. №. 106. С. 57-63. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.009.  
Kamenchukov A.V., Kormilitsyna L. V., Lopashuk V. V., Tsupikova L. S. The influence of excess load on the wear and destruction of road clothing // *International Scientific Research Journal*. 2021. Vol. 4. Iss. 1. No. 106. P. 57-63. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.009.

12. Kurakina E., Evtiukov S. Impact of static and dynamic loads of vehicles on pavement // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403025.
13. Cao, W., Tuo, Y. Study on dynamic load analysis of multi-axle heavy load vehicle on the ramp. Wuhan ligong daxue xuebao (jiaotong kexue yu gongcheng ban) // Journal of wuhan university of technology (transportation science and engineering). Vol. 42. P. 407-411. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2018.03.012.
14. Araz H., Halil C., Sunghwan K., Erol T. Field performance of woven geotextiles in unpaved roads under seasonal climate loadings // Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 55. P. 101714. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101714.
15. Мухаметрахимов, Р. Х., Галаутдинов А. Р., Зиганшина Л. В. Модифицированные мелкозернистые цементные бетоны для аддитивного строительного производства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 5(785). С. 77-93. DOI:10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.  
Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Ziganshina L. V. Modified cement fine-grained concrete for 3DCP // New of Higher Educational Institutions. Construction. 2024. № 5. P. 77-93. DOI:10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.
16. Majengo F., Thomas A. A predictive model for estimating lifecycle cost of gravel roads based on weather conditions // East african journal of engineering. 2025. Vol. 8. P. 523-532. DOI: 10.37284/eaje.8.2.4076.
17. Hossain M. A., Shakil S., Barua H., Shoeb K. Pavement service life prediction with plaxis 3d in Bangladesh // American journal of civil engineering. 2024. Vol. 12. P. 86-94. DOI: 10.11648/j.ajce.20241203.12.
18. Konorev A. S., Mironchuk S. A., Eremenko E. A., Dumenko V., Novikov I. S. Accounting issues of traffic intensity when determining the residual service life during road operation // Roads and bridges. 2025. Vol. 53. P. 09-26. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-09-26.
19. Rahman M., Shipon M., Sakib Md O. R. Analysis of overloading effect and service life prediction of the beldanga-dinajpur road // International conference on civil engineering research and innovations. 2025.
20. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement // Innovative infrastructure solutions. 2022. Vol. 8. P. 129. DOI: 10.1007/s41062-023-01098-6.
21. Zolotukhin S. N., Andreev A. V., Volokitin, V. P. Non-firing materials using clay soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. P. 022030. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022030.
22. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Construction of road pavements using complex modified soil-cement // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 4. No. 109. P. 10927. DOI 10.4123/CUBS.109.27.
23. Wenwei L., Wenpeng L., Baotian W., Xinjie Z., Jinyu Z., Yibo S., Shaoyang H., Tongzhang W. Synergistic effects of cement-silica fume composite on expansive soil stabilization: Mechanisms, microstructure, and durability // Results in Engineering. 2025. Vol. 28. P. 107811, DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107811.
24. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Complex modification of soil cement for road pavements // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 4. No. 109. P. 10928. DOI 10.4123/CUBS.109.28.
25. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Structure of clay minerals of road soil-cement during complex modification // Magazine of Civil Engineering. 2024. Vol. 17. No. 4(128). P. 12809. DOI 10.34910/MCE.128.9.
26. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Construction of road pavements using complex modified soil-cement // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. No. 4(109). P. 10927. DOI 10.4123/CUBS.109.27.
27. Трошкин А. В., Бармин А. С., Антоненко Н. А. Влияние природно-климатических условий рязанской области на прочностные и деформативные свойства грунта

- дорожного полотна // Инновационные научные исследования. 2023. Вып. 1-1. №. 25. С. 43-50. DOI: 10.5281/zenodo.7559056
- Troshkin A. V., Barmin A. S., Antonenko N. A. The influence of the natural and climatic conditions of the Ryazan region on the strength and deformative properties of the soil of the roadway // Innovative scientific research. 2023. Iss. 1-1. No. 25. P. 43-50. DOI: 10.5281/zenodo.7559056
28. Буланов П. Е., Вдовин Е. А., Бадрутдинов И. Б. Стабилизация глинистых грунтов известью при строительстве земляного полотна автомобильных дорог // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2025. Т. 2. №. 10. С. 49-55.  
Bulanov P. E., Vdovin E. A., Badrutdinov I. B. Stabilization of clay soils with lime during the construction of highways // Highways and transport infrastructure. 2025. Vol. 2. No. 10. P. 49-55.
29. Kapustin F. L., Pogorelov S., Kolmogorova A. Proportioning of steel fiber concrete tailored composition using the method of mathematical experiment planning // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 474. DOI: 10.1051/e3sconf/202447401056.
30. Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Буланов П.Е. Пластификация укрепленных грунтов при строительстве дорожных одежд. Казань: Издательство КГАСУ, 2024. 235 с.  
Vdovin E.A., Stroganov V.F., Bulanov P.E. Plasticization of reinforced soils during the construction of road clothing. Kazan: KGASU Publishing House, 2024. 235 p.
31. Братчун В. И., Саткочева А. М., Ромасюк Е. А. Комплексно-модифицированный дорожный щебеночно-мастичный асфальтобетон повышенной долговечности // Строитель Донбасса. 2022. Т. 2. №. 19. С. 4-9.  
Bratchun V. I., Satkoeva A.M., Romasyuk E. A. Complexly modified crushed stone-mastic asphalt concrete of increased durability // Builder of Donbass. 2022. Vol. 2. No. 19. P. 4-9.
32. Xiandong M., Weibin W., Fan F., Jingwen L., Shuai Z., Liang L., Fanglin H. Mechanical properties and damage characteristics of modified polyurethane concrete under uniaxial and cyclic compression // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 458. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139633.

#### Информация об авторах

**Вдовин Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

**Строганов Виктор Фёдорович**, доктор химических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

**Буланов Павел Ефимович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

**Выборнов Даниил Романович**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: dan.vibor@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-5388-7698

#### Information about the authors

**Evgeniy A. Vdovin**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

**Victor F. Stroganov**, doctor of chemical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

**Pavel E. Bulanov**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

**Daniil R. Vybornov**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: dan.vibor@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-5388-7698

*Дата поступления: 20.10.2025*

*Дата принятия: 26.12.2025*