

УДК: 625.7/8; 691.3  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.28  
EDN: WXMKOG



## Влияние комплексной модификации на расчетные характеристики слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов

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

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

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Одним из актуальных направлений повышения технико-экономической эффективности технологии укрепления грунтов в дорожном строительстве является применение метода комплексной модификации. Однако для проектирования дорожных одежд недостаточно данных о системных научных и практических результатах по влиянию комплексной модификации на уровни расчетных характеристик слоев дорожных одежд, устроенных по технологии укрепления грунтов, показатели физико-механических и эксплуатационных характеристики которых превышают данные показатели у слоев без модификации. Целью работы является исследование влияния комплексной модификации на расчетные характеристики цементогрунтовых слоев дорожных одежд и проектирование вариантов конструкций дорожных одежд со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов. В процессе исследований решались следующие задачи: комплексно модифицировать глинистые грунты, укрепленные портландцементом, и оптимизировать их составы для слоев дорожных одежд; установить влияние комплексной модификации на расчетные характеристики слоев дорожных одежд из цементогрунтов; запроектировать варианты конструкций дорожных одежд со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов.

*Результаты.* Установлено, что комплексная модификация цементогрунтов на основе кремнийорганического гидрофобизатора, поликарбоксилатного пластификатора и электролита обеспечила повышение предела прочности при сжатии в 2,6 раза, коэффициента морозостойкости после 15 циклов переменного замораживания-оттаивания на 2,1 раза, а также расчетных характеристик слоев дорожных одежд: прочности на растяжение при изгибе в 2,8 раза, модуля упругости на 62 %, объемной плотности на 2 % и коэффициента теплопроводности на 3 %. Повышенные характеристики позволяют увеличить марки материалов, а также снизить содержание цемента в укрепленных грунтах. Полученные результаты по уровням расчетных характеристик, обеспечили возможность проектирования конструкций дорожных одежд со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов. Применение комплексной модификации позволяет снизить толщины слоев при сохранении повышенных технических, эксплуатационных характеристик и долговечности дорожных одежд.

*Выводы.* Значимость исследования для дорожно-строительной отрасли заключается в получении значений расчетных характеристик слоев дорожных одежд из комплексно-модифицированных цементогрунтов, обеспечивающие возможность проектирования конструкций дорожных одежд с повышенными показателями эксплуатационных характеристик и долговечности, повышая технико-экономическую эффективность строительства дорог.

**Ключевые слова:** укрепленные грунты, цементогрунты, комплексная модификация, расчетные характеристики, дорожная одежда, проектирование

**Для цитирования:** Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф., Выборнов Д. Р. Влияние комплексной модификации на расчетные характеристики слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 315-326, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.28, EDN: WXMKOG

# The effect of complex modification on the design characteristics of layers road pavements from strengthened soils

E.A. Vdovin<sup>1</sup>, P.E. Bulanov<sup>1</sup>, V.F. Stroganov<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* One of the relevant areas for improving the technical and economic efficiency of strengthened soil technology in road construction is the application of the integrated modification method. However, for the design of road pavements, there is insufficient data on systematic scientific and practical results on the effect of complex modification on the levels of design characteristics of road clothes layers constructed using strengthened soil technology, the physical, mechanical and operational characteristics of which exceed these indicators for layers without modification. The aim of the work is to study the effect of complex modification on the design characteristics of soil-cement layers of road pavements and design variants of road clothing structures with layers of complex modified soil-cement. In the course of the research, the following tasks were solved: to comprehensively modify soils strengthened with Portland cement and optimize their compositions for layers of road pavements; to establish the effect of complex modification on the calculated characteristics of layers of road pavements made of cement grout; to design variants of road pavements structures with layers of complexly modified soil-cement.

*Results.* It was found that the complex modification of modified soil-cement based on organosilicon hydrophobizer, polycarboxylate plasticizer and electrolyte increased the compressive strength by 2.6 times, the coefficient of frost resistance after 15 cycles of alternating freezing and thawing by 2.1 times, as well as the calculated characteristics of the layers of road clothing: flexural tensile strength by 2.8 times, modulus of elasticity by 62%, volume density by 2% and thermal conductivity coefficient by 3%. The increased characteristics make it possible to increase the grades of materials, as well as reduce the cement content in strengthened soils. The results obtained by the levels of design characteristics provided the possibility of designing road surface structures with layers of complex modified soil-cement. The use of a complex modification makes it possible to reduce the thickness of the layers while maintaining increased technical, operational characteristics and durability of road pavements.

*Conclusions.* The significance of the study for the road construction industry is to obtain the values of the calculated characteristics of the layers of road pavements from complex modified soil-cement, providing the possibility of designing structures of road pavements with increased performance and durability, increasing the technical and economic efficiency of road construction.

**Keywords:** strengthened soils, soil-cement, complex modification, design characteristics, road pavements, designing

**For citation:** Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F., Vybornov D.R. The effect of complex modification on the design characteristics of layers road pavements from strengthened soils // News of KSUAE, 2024, № 4(70), с. 315-326, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.28, EDN: WXMKOG

## 1. Введение

Значительный рост строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог обусловлен увеличением автомобилизации, интенсивности дорожного движения, нагрузок от транспорта и необходимостью модернизации существующей транспортной инфраструктуры [1, 2]. Модернизация существующей транспортной инфраструктуры является одним из эффективных факторов, влияющего на повышение мобильности, безопасность дорожного движения, качества жизни населения и

экономического развития региона [3, 4]. Совершенствование технологий строительства и ремонта автомобильных дорог способствуют созданию более прочных, долговечных и экономичных конструкций дорожных одежд. Улучшение транспортно-эксплуатационного состояния дорожной сети снижает количество дорожно-транспортных происшествий и обеспечивает более комфортные условия дорожного движения. Следует отметить, что развитие транспортной инфраструктуры способствует сокращению времени транспортировки, оптимизации логистики движения, увеличению пропускной способности автомобильных дорог и улично-дорожных сетей, снижению затрат на перевозки, обеспечивающих повышение технико-экономической эффективности дорожно-транспортной системы и экономическому росту регионов и страны в целом [5-7]. Одним из перспективных направлений совершенствования строительства дорожных одежд является развитие технологии укрепления грунтов, позволяющей максимально использовать грунты региональных месторождений и снизить использование привозных дорогостоящих каменных материалов.

Строительство дорожных одежд требует выполнения большого количества транспортных операций по доставке различных строительных материалов, среди которых прочный щебень занимает наибольший объем. Однако существуют регионы, где наблюдается дефицит каменных материалов и его транспортировка значительно повышает стоимость, как самого материала, так строительство объекта. Возникает необходимость в разработке и совершенствовании технологий строительства с использованием минеральных материалов региональных месторождений, не требующих транспортировки материалов на дальние расстояния [8]. Решение данной актуальной проблемы возможно путем поиска и разработки альтернативных технологий получения и применения материалов, которые могли бы составить конкуренцию привозному щебню. Среди минеральных материалов наиболее распространенными можно считать глинистые грунты, которые при укреплении их различными вяжущими приобретают монолитную структуру, изменяют физико-механические свойства и могут применяться в дорожных одеждах. Опыт научных исследований и практического применения показывает, что технология укрепления грунтов в дорожном строительстве имеет потенциал в повышении технико-экономической эффективности дорожного строительства [9, 10].

Наиболее распространёнными грунтами являются глинистые породы, широкое использование которых в технологиях укрепления грунтов сдерживается из-за особенностей их строения и размеров минералов, и как следствие, специфическими водно-физическими свойствами и реологией [11, 12]. Глинистые грунты, в основном, являются неорганическими горными породами и имеют разнообразный минералогический и химический состав [13, 14]. Основные глинистые минералы состоят из водных алюмосиликатов и различных иных минералов. Они представляют собой разнородную группу филлосиликатов со слоистой или волокнистой структурой, образуют сетки кремнекислородных тетраэдров, соединённых с алюмокислородными октаэдрами [15, 16]. В связи данными особенностями глинистые грунты при водонасыщении теряют свою несущую способность [17]. Известными направлениями использования глинистых грунтов в дорожном строительстве являются технологии стабилизации и укрепления грунтов. Для дорожных одежд применима технология укрепления грунтов, а для глинистых грунтов наиболее эффективным вяжущим при укреплении является портландцемент. Грунты, укрепленные портландцементом, называют цементогрунтами, слои дорожных одежд из них могут устраиваться способами смешения на дороге или в грунтосмесительной установке [18].

Отмеченные особенности строения глинистых грунтов и их негативные свойства при взаимодействии с водой, ограничивают возможности применения в технологиях укрепления грунтов. Поэтому повышение эффективности и качества глинистых грунтов, укрепленных цементами, является одной из актуальных научных проблем. Перспективным методом решения данной проблемы является применение комплексной модификация в технологиях укрепления грунтов [19, 20], обеспечивающая нивелирование негативных свойств глинистых грунтов, возможность увеличения физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств цементогрунтовых слоев дорожных одежд и их долговечности. Комплексная модификация цементогрунтов оказывает положительное

влияние не только на структуру материалов слоев дорожных одежд, но и на его расчетные характеристики, требуемые при проектировании дорожных одежд, что, в свою очередь, позволяет рассчитывать слои из укрепленных грунтов на более высокие нагрузки, а также позволяет проектировщикам более точно прогнозировать поведение материала в процессе эксплуатации и минимизировать риски, связанные с изменением свойствами материала.

При проектировании конструкций дорожных одежд с применением комплексно-модифицированных цементогрунтов важно учитывать их расчетные характеристики, отличные от немодифицированных. Основными характеристиками конструктивного слоя из укрепленных грунтов при проектировании дорожных одежд являются его модуль упругости, предел прочности на растяжение при изгибе, коэффициент теплопроводности и объемная плотность. Модуль упругости цементогрунтов определяет способность материала деформироваться под воздействием нагрузки. Высокий модуль упругости слоя позволяет дорожным покрытиям сохранять свою форму и структуру при динамических нагрузках, возникающих от движения автомобилей [21]. Предел прочности на растяжение при изгибе определяет максимальную нагрузку, которую материал может выдержать без разрушения. Для дорожных одежд это значение критично, поскольку дорожное покрытие подвергается не только вертикальным, но и горизонтальным нагрузкам [22]. Коэффициент теплопроводности материала влияет на его поведение в условиях температурных колебаний. Дорожные покрытия подвергаются значительным температурным изменениям, что может вызывать расширение и сжатие материалов. Высокий коэффициент теплопроводности помогает избежать локальных перегревов и связанных с ними повреждений, а также защищает нижележащие слои от промерзания, которое может оказывать серьезное негативное влияние на некоторые из материалов основания [23, 24]. Объемная плотность материала играет важную роль в определении его прочностных характеристик и устойчивости к нагрузкам. Более плотные материалы обычно обладают высокой прочностью и долговечностью, что делает их предпочтительными для использования в дорожных покрытиях. Однако необходимо также учитывать вес слоев дорожных одежд, так как его значительное повышение может создавать дополнительные нагрузки на основание дороги [25]. Знание этих характеристик помогает обеспечить безопасность движения, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт дорог, а также продлить срок службы дорожной конструкции. Комплексный подход к выбору материалов с учетом этих параметров позволяет создавать эффективные и устойчивые решения для транспортной инфраструктуры. Однако из анализа литературы установлено, что для проектирования дорожных одежд недостаточно данных о значениях расчетных характеристик слоев дорожных одежд из комплексно-модифицированных цементогрунтов, а также системно не изучено влияние комплексной модификации на уровни расчетных характеристик слоев дорожных одежд, устроенных по технологии укрепления грунтов.

В связи с изложенным, целью работы является исследование влияния комплексной модификации на расчетные характеристики цементогрунтовых слоев дорожных одежд и проектирование вариантов конструкций дорожных одежд со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- комплексно модифицировать глинистые грунты, укрепленные портландцементом, и оптимизировать их составы для слоев дорожных одежд;
- установить влияние комплексной модификации на расчетные характеристики слоев дорожных одежд из цементогрунтов;
- запроектировать варианты конструкций дорожных одежд со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов.

## 2. Материалы и методы

Для укрепления и комплексной модификации использован глинистый грунт Лебяжского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан. Испытание грунта показало следующие показатели: влажность на границе текучести – 22,65 %, на границе раскатывания – 16,63 %, число пластичности грунта – 0,06, содержание песчаных

частиц (2,00-0,05 мм) в грунте по массе – 36 %. По ГОСТ 25100 данный глинистый грунт относится к супеси пылеватой пластичной.

Для укрепления супеси пылеватой пластичной использовали портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент» (г. Вольск, Россия). Содержание портландцемента в укрепленных грунтах принято: 5 %, 8 % и 11 % от массы грунта. В качестве модификаторов использованы: кремнийорганический гидрофобизатор (КГ) с содержанием 0,02-0,06 % от массы грунта, поликарбоксилатный пластификатор (ПКС) с содержанием 0,15-0,45 % от массы грунта и электролит (Э) с содержанием 0,05-0,15 % от массы грунта. Оптимизация составов комплексно-модифицированных цементогрунтов для дорожных одежд проведена методом ротатбельного планирования второго порядка. Исследованы следующие физико-механические свойства укрепленных грунтов: предел прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ), предел прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) и коэффициент морозостойкости ( $K_{мор}$ ), по ГОСТ 23558. Формование образцов укрепленных грунтов проводилось при оптимальной влажности цементогрунтовых смесей.

В исследованиях изучались расчетные характеристики для проектирования нежестких дорожных одежд, которые по ГОСТ Р 71404 включали: расчетный модуль упругости (МПа), объемная плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), предел прочности на растяжение при изгибе (МПа), коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт/(м*К)}$ ). Определение расчетных характеристик цементогрунтов проводилось при оптимальном содержании комплексных модификаторов. Объемная плотность ( $\gamma$ ) определялась на образцах цилиндрической формы диаметром 50 мм по ГОСТ 12730.1. Расчетный модуль упругости ( $E_y$ ) цементогрунтовых образцов испытывался по ГОСТ 24452 на водонасыщенных образцах круглого сечения диаметром 70 мм и высотой 280 мм на испытательной машине ИР 5082-500. Коэффициент теплопроводности ( $K_T$ ) определялся на приборе ИТП-МГ4 «100», на образцах в виде прямоугольного параллелепипеда по ГОСТ 7076, наибольшие (лицевые) грани которого имеют форму квадрата со стороной 100 мм, и толщиной 20 мм. Все испытания проводились на образцах в возрасте 28 суток.

Проектирование конструкций дорожных одежд облегченного типа со слоями из укрепленных грунтов проводилось для автомобильных дорог IV технической категории в соответствии с ГОСТ Р 58818 и ГОСТ Р 71404. Расчет производился по следующим критериям: допустимого упругого прогиба, сдвигоустойчивости грунта рабочего слоя земляного полотна и конструктивных слоев из малосвязных материалов, сопротивлению слоев асфальтобетона усталостному разрушению, морозоустойчивости и водоосушения.

### 3. Результаты и обсуждение

Комплексная модификация укрепленных грунтов осуществлена в процессе приготовления цементогрунтовых смесей способом внесения с водой затворения растворов комплексных модификаторов на основе КГ, ПКС и Э, обеспечивающая повышение исследуемых физико-механических свойств (рис. 1 - 3).

Исследование влияния комплексной модификации укрепленных грунтов на физико-механические свойства выявило, что предел прочности на сжатие цементогрунтов оптимальных составов увеличился при содержании Э 0,05 % в 2,4 раза в сравнении с немодифицированными составами, при 0,10 % и 0,15 % – в 2,6 раза; предел прочности на растяжение при изгибе вырос при 0,05 % Э в 2,7 раз, при 0,10 % и 0,15 % – в 2,9 раза; коэффициент морозостойкости после 15 циклов переменного замораживания-оттаивания увеличился при 0,05 % Э в 2,0 раза, при 0,10 % и 0,15 % – в 2,1 раза. Оптимизация составов укрепленных грунтов при комплексной модификации, обеспечила возможность получения материалов слоев дорожных одежд с марками по прочности и морозостойкости: М20 и F15 при содержании ПЦ – 5 %, КГ – 0,0236 %, ПКС – 0,4439 %, Э – 0,0552 %; М40 и F15 при ПЦ - 8 %, КГ - 0,0236 %, ПКС – 0,4439 %, Э – 0,0552 %; М60 и F15 при ПЦ – 8 %, КГ – 0,0236 %, ПКС – 0,4439 %, Э – 0,0552 % от массы грунта.

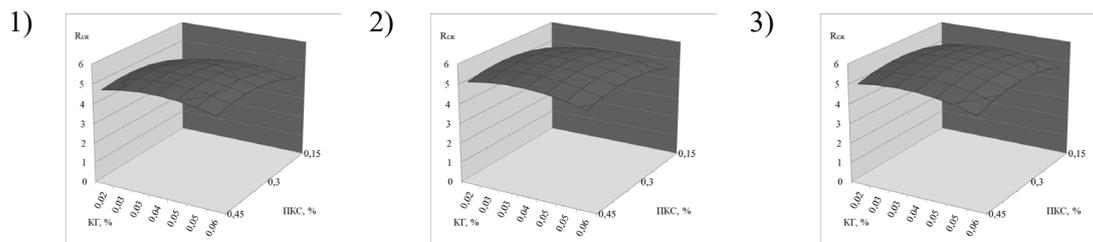


Рис. 1. Влияние комплексной модификации на предел прочности при сжатии цементогрунтов с 8 % ПЦ и содержания Э:

1) 0,05 %

2) 0,10 %

3) 0,15 %

(иллюстрация авторов)

Fig. 1. The effect of the complex modification on the compressive strength of soil-cement with 8% Portland cement and the content of electrolyte (illustration by the authors)

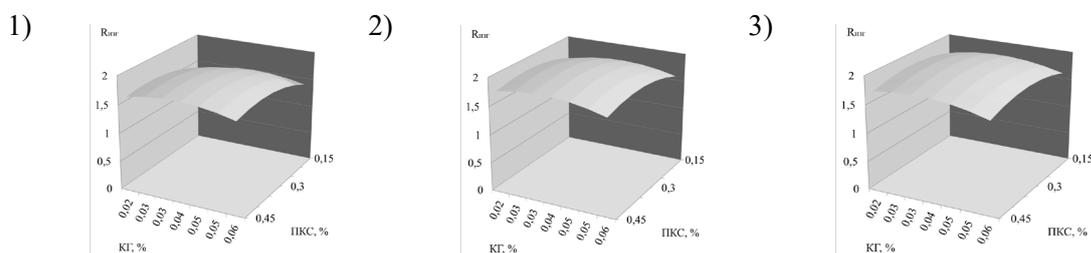


Рис. 2. Влияние комплексной модификации на предел прочности на растяжение при изгибе цементогрунтов с 8 % ПЦ и содержания Э:

1) 0,05 %

2) 0,10 %

3) 0,15 %

(иллюстрация авторов)

Fig. 2. The effect of the complex modification on the ultimate tensile strength soil-cement with 8% Portland cement and the content of electrolyte (illustration by the authors)

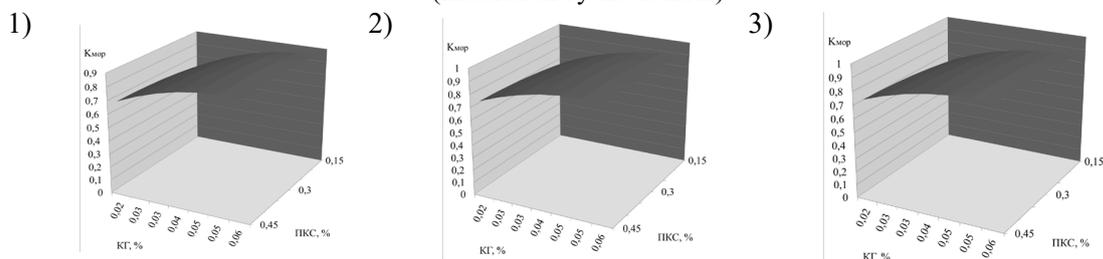


Рис. 3. Влияние комплексной модификации на коэффициент морозостойкости цементогрунтов с 8 % ПЦ и содержания Э:

а) 0,05 %

б) 0,10 %

в) 0,15 %

(иллюстрация авторов)

Fig. 3. The effect of the complex modification on the freeze-thaw resistance of soil-cement with 8% Portland cement and the content of electrolyte (illustration by the authors)

Установлено положительное влияние комплексной модификации на расчетные характеристики слоев дорожных одежд из цементогрунтов при различном содержании портландцемента: 5 %, 8 % и 11 % от массы грунта (рис. 4). Выявлено, что применение метода комплексной модификации в технологии укрепленных грунтов эффективно сказывается на увеличении расчетных характеристик при различном содержании портландцемента. Анализ результатов показал, что комплексная модификация цементогрунтов обеспечила следующее повышение расчетных характеристик: предела прочности на растяжение при изгибе до 2,8 раза; модуля упругости материала на 62 %; удельной плотности материала до 2 %; коэффициента теплопроводности до 3 %, по сравнению с укрепленными грунтами без модификации. Полученные повышенные характеристики конструктивных слоев дорожных одежд из комплексно-

модифицированных укрепленных грунтов позволят дорожным одеждам дольше сохранять свою несущую способность при возрастающих вертикальных и горизонтальных динамических нагрузках, а также агрессивном воздействии климатических факторов, что способствует снижению затрат на эксплуатацию, ремонт автомобильных дорог и продлению сроков службы дорожной конструкции. Полученные результаты согласуются с данными исследований [22-24]. Установлено, что комплексная модификация обеспечила снижение содержание портландцемента в укрепленных грунтах до 3% при сохранении марок материалов и уровня расчетных характеристик слоев дорожных одежд.

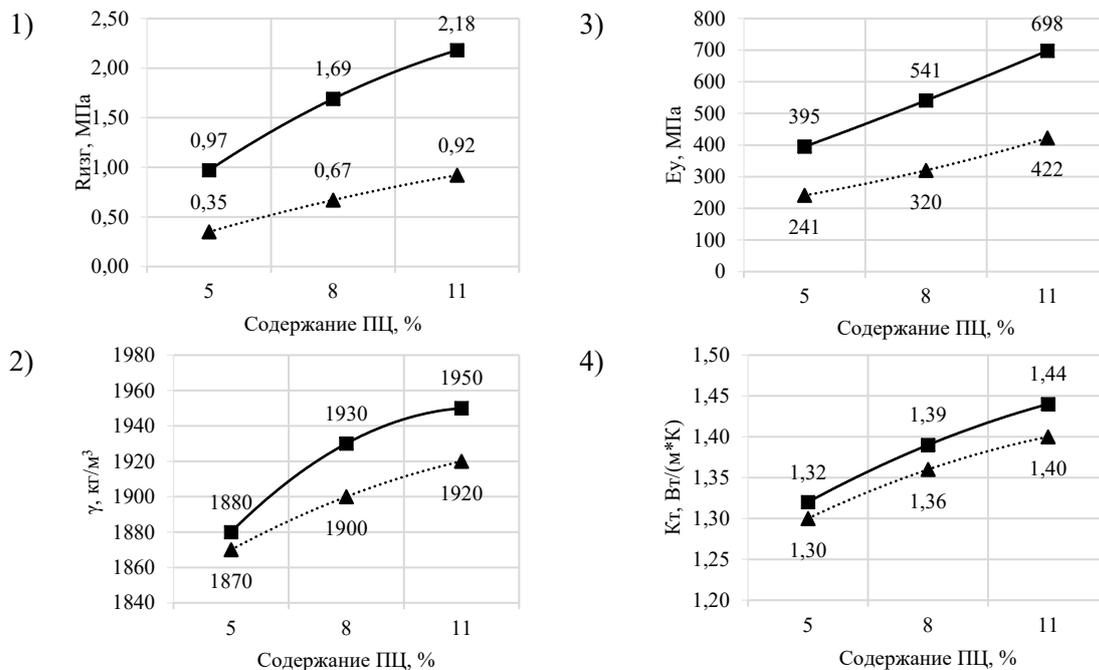


Рис. 4. Изменение расчетных характеристик цементогрунтов с различным содержанием портландцемента:

- 1) – предел прочности на растяжение при изгибе; 2) – объемная плотность;  
3) – расчетный модуль упругости; 4) – коэффициент теплопроводности.

▲ – при комплексной модификации; ■ – без модификации;  
(иллюстрация авторов)

Fig. 4. Change in the design characteristics of soil-cement with different Portland cement content:

- 1) – the ultimate tensile strength; 2) – mass of unit volume;  
3) – calculated elastic module; 4) – freeze-thaw resistance.

▲ – with complex modification; ■ – non modification;  
(illustration by the authors)

Полученные результаты по значениям расчетных характеристик слоев дорожных одежд из комплексно-модифицированных укрепленных грунтов позволили запроектировать варианты конструкций дорожных одежд. Проведены расчеты и конструирование трех вариантов дорожных одежд облегченного типа автомобильных дорог IV технической категории с низкой интенсивностью движения: со слоями из цементогрунтов с расчетными характеристиками, представленными в нормативных документах (рис. 5); со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов с полученными расчетными характеристиками (рис. 6). Проектирование дорожных одежд проведено при следующих исходных данных: дорожно-климатическая зона – III; подзона – 2; техническая категория автомобильной дороги – IV; регион проектирования – Республика Татарстан; тип конструкции дорожной одежды – облегченный; срок службы покрытия – 24 года; межремонтный срок покрытия – 12 лет; коэффициент надежности – 0,85; глубина промерзания грунта – 160 см; грунт рабочего слоя – супесь легкая; требуемый модуль упругости – 250 МПа; нормативная статическая нагрузка на ось – 100 кН; диаметр штампа – 37,1 см; давление в шинах – 0,6 МПа. Результаты расчета представлены в таблицах 1 и 2.

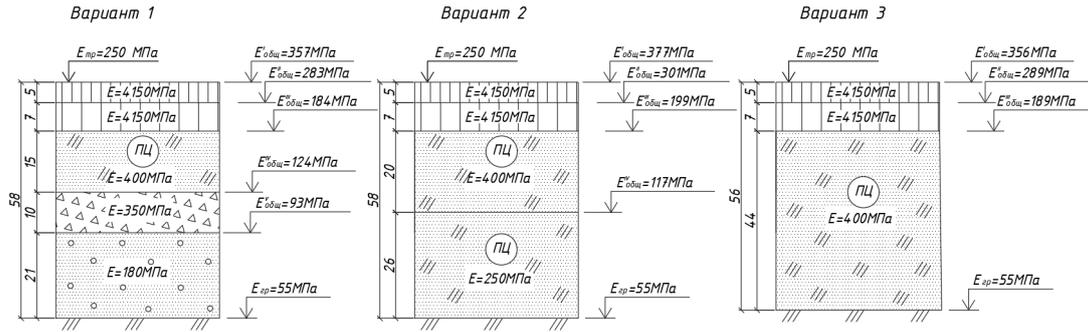


Рис. 5. Конструкции дорожных одежд с нормативными расчетными характеристиками (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Constructions of road topping with standard design characteristics (illustration by the authors)

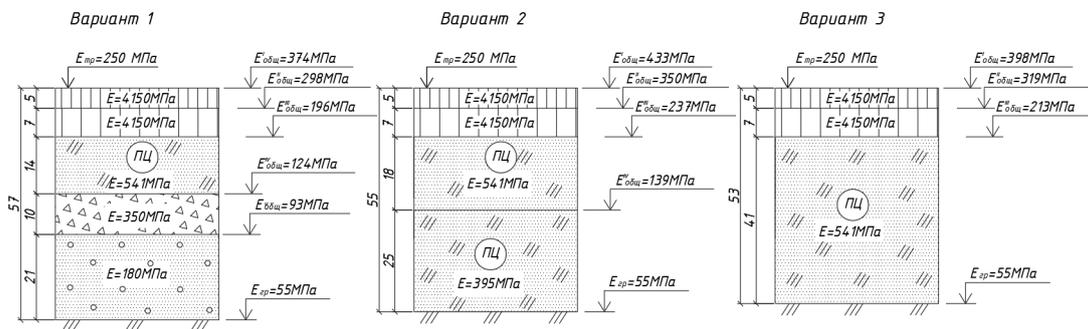


Рис. 6. Конструкции дорожных одежд с полученным расчетными характеристиками слоев из комплексно-модифицированных укрепленных грунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Road pavement with calculated design characteristics of layers made of complex-modified strengthened soils (illustration by the authors)

Таблица 1

Варианты конструкций дорожных одежд со слоями из цементогрунта

№ варианта	Наименование слоев конструкций дорожных одежд
1 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,15 м; 4) Технологический слой из щебня М600 по ГОСТ 32703 – 0,10 м; 5) Песчано-гравийная смесь по ГОСТ 23735 – 0,21 м
2 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,20 м; 4) Цементогрунт, соответствующий марке М20 по ГОСТ 23558 – 0,26 м
3 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,44 м

Таблица 2

**Варианты конструкций дорожных одежд со слоями  
из комплексно-модифицированного цементогрунта**

№ варианта	Наименование слоев конструкций дорожных одежд
1 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Комплексно-модифицированный цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,14 м; 4) Технологический слой из щебня М600 по ГОСТ 32703 – 0,10 м; 5) Песчано-гравийная смесь по ГОСТ 23735 – 0,21 м
2 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Комплексно-модифицированный цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,18 м; 4) Комплексно-модифицированный цементогрунт, соответствующий марке М20 по ГОСТ 23558 – 0,25 м
3 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Комплексно-модифицированный цементогрунт, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,41 м

В результате проектирования дорожных одежд со слоями из цементогрунтов (табл. 1-2) установлено, что комплексная модификация обеспечивает возможность снижения толщины конструкций дорожных одежд до 7 % в сравнении с размерами конструкций, рассчитанных по данным расчетных характеристик слоев из нормативных документов, что может способствовать повышению технико-экономической эффективности проектирования и строительства автомобильных дорог. Полученные данные в работе коррелируют с исследованием [25].

#### 4. Заключение

Установлено, что проведенная комплексная модификация укрепленных грунтов способом внесения с водой растворов комплексных модификаторов на основе кремнийорганического гидрофобизатора, поликарбоксилатного пластификатора и электролита обеспечила повышение предела прочности при сжатии в 2,6 раза, коэффициента морозостойкости после 15 циклов переменного замораживания-оттаивания на 2,1 раза. Оптимизация составов укрепленных грунтов при комплексной модификации, выявила возможность получения материалов слоев дорожных одежд с марками по прочности и морозостойкости: М20 и F15 при содержании портландцемента 5 %, М40 и F15 и М60 и F15 при содержании портландцемента 8 % от массы грунта.

Выявлены зависимости при применении метода комплексной модификации в технологии укрепленных грунтов, которые показывают повышение расчетных характеристик слоев дорожных одежд: предела прочности на растяжение при изгибе до 2,8 раза; модуля упругости материала на 62 %; удельной плотности материала до 2 %; коэффициента теплопроводности до 3 %, по сравнению с укрепленными грунтами без модификации. Эффективное влияние комплексной модификации на увеличении расчётных характеристик при различном содержании портландцемента позволят дорожным одеждам дольше сохранять свою несущую способность при возрастающих вертикальных и горизонтальных динамических нагрузках, а также агрессивном воздействии климатических факторов, что способствует снижению затрат на эксплуатацию, ремонт автомобильных дорог и продлению сроков службы дорожной конструкции.

Запроектировано три вариант дорожных одежд облегченного типа автомобильных дорог IV технической категории с низкой интенсивностью движения со слоями из цементогрунтов с расчетными характеристиками, представленными в нормативных документах и со слоями из комплексно-модифицированных цементогрунтов с полученными расчетными характеристиками. Установлено, что комплексная модификация обеспечивает возможность снижения толщин слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов при сохранении высоких эксплуатационных характеристик и долговечности, применение которой может способствовать повышению технико-экономической эффективности проектирования и строительства автомобильных дорог.

### Список литературы/References

1. Лебедева Н.А. Проблемы развития транспортной системы северо-западного федерального округа // Вопросы территориального развития. 2021. № 4. С. 1–16.  
Lebedeva N.A. Problems of the development of the transport system of the North-Western Federal District // Issues of territorial development. 2021. No. 4. pp. 1-16.
2. Гатиятуллин М.Х., Кутдусов Р.Ф. Влияние транспортно-эксплуатационного состояния дорожной сети на состояние аварийности // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 4 (4). С. 79-86.  
Gatiyatullin M.H., Kutdusov R.F. Impact of Transport and Operation State of the Road on Accident Rate // Roads and transport infrastructure. 2023. No. 4 (4). pp. 79-86.
3. Baklanova K. Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety / K. Baklanova. – Текст : непосредственный // Intellect. Innovations. Investments. – 2023. – № 2. – Р. 99–110. – DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99.
4. Николаева Р.В., Костин А.П. Разработка схемы организации дорожного движения поселка Куюки Республики Татарстан // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 4 (4). С. 105-112.  
Nikolaeva R.V., Kostin A.P. Development of a traffic management scheme for the village of Kuyuki in the Republic of Tatarstan // Roads and transport infrastructure. 2023. No. 4 (4). P. 105-112.
5. Zolotukhin S.N., Andreev A.V., Volokitin V.P. Non-firing materials using clay soils. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 962. P. 022030. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022030.
6. Plyuta K. Determination of the percentage of lime in the strengthening of clay soils using pH. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 667. P. 012079. DOI: 10.1088/1757-899X/667/1/012079.
7. Loginova O. A. Roundabouts on the same level / O. A. Loginova // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – No. 7(105). – P. 10507. – DOI 10.4123/CUBS.105.7. – EDN GPDPHS.
8. Карпова Е.Г., Кещян В.Г., Логинова О.А. Государственно-частное партнерство как эффективный инструмент развития региональной экономики России // Цифровая трансформация экономики и промышленности: проблемы и перспективы. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 318-378. – DOI 10.18720/IEP/2017.4/15.  
Karpova E.G., Keshchyan V.G., Loginova O.A. Public-private partnership as an effective tool for the development of the regional economy of the Russian Federation // Digital transformation of economy and industry: problems and prospects. – St. Petersburg : Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2017. – pp. 318-378. – DOI 10.18720/IEP/2017.4/15.
9. Вдовин Е.А., Коновалов Н.В. Дорожные модифицированные минеральные материалы, укрепленные портландцементом // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 4(4). С. 14-22.
10. Konovalov N.V., Vdovin E.A. Road modified mineral materials reinforced with Portland cement // Roads and transport infrastructure. 2023. No. 4(4). P. 14-22.

11. Барбо А.С., Вржеш Д.В., Решетников А.С., Бородай Д.И. Отсев дробления известняка, укрепленного цементом, для устройства оснований дорожных одежд // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. В. 2018-3(131) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 73–76.  
Barbo A.S., Vrzhes D.V., Reshetnikov A.S., Borodai D.I. Screening crushing of limestone reinforced with cement for paving foundations // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2018. Issue 2018-3(131) Buildings and structures using new materials and technologies. pp. 73-76.
12. Лукашевич О.Д., Лукашевич В.Н. Пути повышения экологической безопасности при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 200–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-200-210.  
Lukashevich O.D., Lukashevich V.N. Ways to improve environmental safety in the construction and operation of highways // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2020. Vol. 22. No. 5. pp. 200-210. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-200-210.
13. Vdovin, E., Bulanov, P., Stroganov, V., Mavliev, L. (2023). Physical and Mechanical Characteristics of Modified Soil Cement with Polycarboxylate Superplasticizers. In: Vatin, N. (eds) Proceedings of STCCE 2022. STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 291. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_10).
14. Mousavi S.S.; Bhojaraju C.; Ouellet-Plamondon C. Clay as a Sustainable Binder for Concrete—A Review. *Constr. Mater.* 2021, 1, 134-168. <https://doi.org/10.3390/constrmater1030010>
15. Koohmishi Mehdi, Palassi Massoud. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization. *Transportation Geotechnics*, Volume 33, 2022, 100726, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100726>.
16. Singh, N.B. Clays and Clay Minerals in the Construction Industry. *Minerals* 2022, 12, 301. <https://doi.org/10.3390/min12030301>.
17. Wang S Gainey L., Mackinnon I.D.R., Allen C., Gu Y., Xi Y. Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: A review. *Journal of Building Engineering*, 2023, Volume 66, 105802, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105802>.
18. Roshan K., Choobbasti A., Soleimani K., Fakhrabadi A. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. No. 193. P. 103418. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
19. Behnood A. Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques // *Transportian Geotechnics*. 2018. No. 17. P. 14-32. doi: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002.
20. 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.
21. 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. – No. 4(109). P. 10928. DOI 10.4123/CUBS.109.28.
22. Степаненко А.А., Рудых А.В., Слободчикова Н.А. Метод определения модуля упругости укрепленных грунтов в лабораторных условиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 12. С. 93-99. DOI 10.33622/0869-7019.2020.12.93-99.  
Stepanenko A.A., Rudykh A.V., Slobodchikova N.A. Method for determining the elastic modulus of reinforced soils in laboratory conditions // *Industrial and civil engineering*. 2020. No. 12. pp. 93-99. DOI 10.33622/0869-7019.2020.12.93-99.
23. Корочкин А.В. Проектирование и строительство дорожных одежд с применением цементогрунтов // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный

- информационный сборник. 2021. № 9. С. 69-72. DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-13.
- Korochkin A.V. Design and construction of road clothes using cement grunt // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. 2021. No. 9. pp. 69-72. DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-13.
24. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Жиркова Е.О. Теплопроводность гравийного слоя дорожной одежды // Строительные материалы. 2022. № 12. С. 33-37. DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-33-37.
- Galkin A.F., Panov V.Yu., Zhirkova E.O. Thermal conductivity of the gravel layer of the pavement // Building materials. 2022. No. 12. pp. 33-37. DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-33-37.
25. Миляев А.С. Методика расчета промерзания оснований зимних лесовозных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 191. С. 86-94. EDN OIOTZJ.
- Milyaev A.S. Methodology for calculating the freezing of the bases of winter logging roads // Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy. 2010. No. 191. pp. 86-94. EDN OIOTZJ.
26. Гошовец С.В. Исследование влияния уменьшения толщины слоев дорожной одежды в пределах допусков на надежность и долговечность автомобильных дорог // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 3(59). С. 43-57. DOI 10.36622/VSTU.2020.59.3.004.
- Gosovets S.V. Investigation of the effect of reducing the thickness of layers of road clothing within the limits of tolerances on the reliability and durability of highways // Scientific Journal of Construction and Architecture. 2020. No. 3(59). pp. 43-57. DOI 10.36622/VSTU.2020.59.3.004.

#### 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

**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

**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

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

E-mail: dan.vibor@yandex.ru

#### 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

**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

**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

**Vybornov Daniil Romanovich**, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: dan.vibor@yandex.ru