



Research Article

Received: November 9, 2023

Accepted: December 10, 2023

Published: December 27, 2023

ISSN 2304-6295

Construction of road pavements using complex modified soil-cement

Vdovin, Evgeniy Anatolevich¹ Bulanov, Pavel Efimovich^{1*} Stroganov, Victor Fedorovich¹ Morozov, Vladimir Petrovich²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; vdovin007@mail.ru (V.E.A.); pavel.bulanov1991@yandex.ru (B.P.E.); svf08@mail.ru (S.V.F.)

²Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russian Federation; vladimir.morozov@kpfu.ru (M.V.P.)

Correspondence: * pavel.bulanov1991@yandex.ru; contact phone +79520444348

Keywords:

Soil-cement; Road pavement; Clay soil; Pilot experimental-industrial introduction; Complex modification

Abstract:

The object of research is the pilot industrial implementation of complex modified soil-cement in the construction of bases for flexible road pavements. The work aims to analyze the results of the pilot industrial implementation of soil cement modified with organosilicon compounds, polycarboxylate superplasticizers, and electrolytes in constructing bases for flexible road pavements. **Method.** The construction of road base layers from soil cement was done using the on-site mixing method. The construction of the remaining structural elements of the road structure (subgrade, asphalt concrete pavement) of the highway was carried out using standard technologies. The dynamic loading method determined the elastic modulus of the road pavement layers, the entire structure, and the roadbed soil by the static loading method. The effectiveness of the development and the legitimacy of the implemented scientific approach to the complex modification of soil cement was assessed by comparing the results of laboratory studies and industrial tests on highways. To determine the mineralogical composition and identify the products of new formations of soil-cement, X-ray phase, and differential thermal analysis methods were used. **Results.** A comparative analysis of laboratory research results and pilot industrial implementation of complex modified soil-cement and reinforced soils without modification during highway construction was carried out according to the following indicators: physical and mechanical properties, phase composition, and elastic modulus of the layer. Transitional-type road pavement designs with soil-cement foundations have been developed. The technology for carrying out work on the construction of a highway has been determined, including installing structural layers of the base of road pavements from cement soils using the on-site mixing method. The optimization of the compositions of complex-modified soil cement was carried out using the second-order rotatable planning method. Based on the developed road pavement designs, work technology, and optimization of the soil-cement composition, a highway was built with the construction of two sections to compare the effectiveness of the modification. Research has been carried out to determine and compare the elastic moduli of layers of road pavements and subgrades. The validity of the implemented scientific approach to using complex modification of soil-cement in constructing structural layers of road pavements has been confirmed.

1 Introduction

Учитывая тенденцию развития энергосберегающих строительных технологий, следует отметить, что технология укрепления глинистых грунтов является одним из приоритетных направлений дорожного строительства [1], а возрастающие объемы строительства

Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V.;

Construction of road pavements using complex modified soil-cement;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10927. doi: 10.4123/CUBS.109.27



автомобильных дорог в России с учетом логистических затрат применяемых строительных материалов делают особенно важным снижение стоимости строительства. Глинистые грунты являются наиболее распространенными видами грунтов (до 60 %) на территории Российской Федерации, при увлажнении которых значительно понижается уровень физико-механических свойств [2]. Месторождения горных пород высокой прочности в Российской Федерации встречаются крайне редко, что обуславливает значительное увеличение транспортных расходов на доставку высокопрочного щебня к объектам дорожного строительства. Использование грунтов региональных месторождений, укрепленных вяжущими, является эффективным способом снижения затрат на строительство, реконструкцию и капитальный ремонт автомобильных дорог.

В практике дорожного строительства с 30-40-х годов XX века разработаны и внедрены различные способы стабилизации и укрепления грунтов на основе органических и неорганических вяжущих веществ [3]. Разработка эффективных конструкций дорожных одежд при применении материалов на основе укрепленных грунтов с использованием различных вяжущих и модифицирующих добавок является одним из перспективных направлений исследований в дорожном строительстве [4], [5]. Анализ опыта применения цементогрунтов в дорожных конструкциях подтверждает целесообразность использования их в основаниях дорожных одежд капитального и облегченного типов, а также в покрытиях со слоем износа – переходного и низшего типов.

Среди известных технологий дорожного строительства отмечают эффективность способов укрепления грунтов минеральными вяжущими. В этой связи укрепление грунтов минеральными вяжущими получило широкое распространение в мировой практике строительства. Это обусловлено возможностью использования широкой номенклатуры вяжущих (портландцемент, шлакопортландцемент, известь, вяжущих на основе доменных и фосфорных шлаков и отходов других металлургических и химических производств), простотой введения и возможностью достижения высокой степени однородности распределения вяжущего в укрепляемом грунте [6]. В зависимости от свойств укрепляемого грунта, применяемых вяжущих веществ и модификаторов, а также с учетом конструкций дорожных одежд, климатических условий и наличия оборудования используются следующие методы: приготовление в смесительной установке и смешение на месте (на автомобильной дороге). Наиболее экономичен процесс приготовления смеси непосредственно на месте ее укладки в основание или покрытие дорожной одежды. Метод приготовления в смесительной установке требует дополнительных работ по транспортированию грунта из карьера к смесительной установке и приготовленной смеси к месту укладки на дороге [7]-[10].

Метод укрепления грунтов цементом, применяемый в дорожном строительстве, является весьма эффективным, но не в полном объеме, обеспечивающем достижение нормативных требований, особенно в глинистых грунтах, без дополнительной модификации [7, 8]. Системные исследования в этом направлении велись до 70-80 годов XX века научными школами под руководством В.М. Безрука, Ю.М. Васильева, Л.В. Гончаровой, В.М. Кнатько, В.А. Кельмана, В.В. Охотина, П.А. Ребиндера, М.М. Филатова, С.W. Correns, С.S. Dunn, J. Hashimoto, J.K. Mitchell, G.H. Hilt, D.T. Davidson, J.G. Laguros, T.W. Lambe, R.C. Mainfort и др. Анализ публикаций и научно-практического опыта данного периода свидетельствует, что для обеспечения уровня требуемых показателей к конструктивным слоям дорожных одежд с учетом увеличения интенсивности движения и транспортной нагрузки [11], [12] для укрепления глинистых грунтов цементом необходимо обязательное применение технологической стадии по модификации цементогрунтов [13], [14].

В последующий период исследований применялись различные виды модификации цементогрунтов, которые в основном носили узконаправленный характер с применением, как правило, однокомпонентных добавок [15], [16]. Среди ряда работ следует обратить внимание на модификацию цементогрунтовых смесей различными по природе добавками: пластифицирующими, гидрофобизирующими веществами и электролитами. Пластифицирующие добавки способствуют повышению эксплуатационных и технологических (удобоукладываемость) характеристик [14], [17]. Одними из наиболее перспективных модификаторов среди пластифицирующих добавок являются эфиры поликарбоксилатов, которые в отличие от известных суперпластификаторов, по данным J. Plank, E. Sakai, С.W. Miao, С. Yu, J.X. Hong [18], способствуют положительному изменению морфологии гидратных новообразований и уменьшению размеров кристаллов этtringита. Отмечается также возможность образования стабильных органоминеральных фаз за счет встраивания полимерного модификатора в

Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V.;

Construction of road pavements using complex modified soil-cement;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10927. doi: 10.4123/CUBS.109.27



пластинчатую структуру гидроалюмината кальция [19], [20]. Кроме пластифицирующих добавок, для повышения удобоукладываемости и удобообрабатываемости устраиваемого цементогрунтового слоя следует обратить внимание на модификацию процессов снижающих коагуляцию частиц глинистого грунта. Исследованиями подтверждается целесообразность применения в качестве электролита – гидроксид натрия [21]. Для придания гидрофобных свойств цементогрунтовому слою, наиболее эффективными модификаторами являются водорастворимые кремнийорганические соединения – силаны, силоксаны и др. [22], [23].

В дальнейших исследованиях в области применения цементогрунтов в конструктивных слоях дорожных одежд рассматриваются возможности модификации укрепленных материалов многокомпонентными составами [24]-[26]. По данным исследований [25] комплексные полифункциональные модификаторы рекомендовалось разрабатывать на основе гидрофобизаторов, электролитов, пластификаторов, минеральных добавок и т.д. [14], [21], [25], [26]. В этих исследованиях также отмечается возможность сочетания химических веществ, что может способствовать проявлению синергетических эффектов [24]-[28], обеспечивающих повышение уровня технологических и эксплуатационных характеристик. Примерами эффективной реализации комплексной модификации является применение кремнийорганических соединений и электролитов [28], поликарбоксилатных суперпластификаторов и гидрофобизаторов [29], лиоксаля, смеси полиминерального песка и сапонитсодержащего материала [30] и т.д., используемой в глинистых грунтах.

Принято считать, что убедительным подтверждением лабораторных исследований являются результаты внедрения в опытно-промышленное производство. Опытные работы по внедрению разработок системно выполняются в Казанском государственном архитектурно-строительном университете с 2011 г. [28], [31]. В исследовательских работах проведен анализ грунтов для строительства автомобильных дорог, не имеющих твердого покрытия в Республике Татарстан, и теоретически обоснованы методы укрепления и модификации местных минеральных материалов с целью их применения в конструкциях дорожных одежд. В процессе проведения исследований осуществлен отбор проб грунта с автомобильных дорог всех муниципальных районов Республики Татарстан, не имеющих твердого покрытия, и определены их строительно-технические характеристики. Разработаны карты с указанием исследованных грунтовых дорог и действующих карьеров местного минерального сырья. Запроектированы конструкции дорожных одежд автомобильных дорог V и IV технической категории с применением модифицированных укрепленных грунтов. Оценен экономический эффект применения таких конструкций [32].

Выполненный анализ литературных источников свидетельствует об отсутствии работ, рассматривающих результаты лабораторных исследований в сравнении с достигнутыми показателями при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд из комплексно-модифицированных цементогрунтов (физико-механические свойства, фазовый состав, транспортно-эксплуатационные характеристики и т.д.) на автомобильных дорогах.

В связи с изложенным, целью работы является анализ результатов опытно-промышленного внедрения комплексно-модифицированных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями, поликарбоксилатными суперпластификаторами и электролитами в сравнении с данными лабораторных исследований.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- конструирование дорожных одежд со слоями оснований из цементогрунтов для опытно-промышленного внедрения;
- определение технологии производства работ по строительству автомобильной дороги, в том числе по устройству конструктивных слоев основания дорожных одежд из цементогрунтов;
- подбор составов цементогрунтов, комплексно-модифицированных кремнийорганическим соединением, поликарбоксилатным суперпластификатором и электролитом;
- строительство опытно-промышленных участков автомобильной дороги;
- сравнение влияния модификаторов на уровни показателей физико-механических свойств, модулей упругости и фазового состав цементогрунтов опытно-промышленного изготовления с данными лабораторных исследований.

2 Materials and Methods

Автомобильная дорога с опытно-промышленными участками соответствует нормативным требованиям VB технической категории по с Российским государственным стандартам СП Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V.;
Construction of road pavements using complex modified soil-cement;
2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 109 Article No 10927. doi: 10.4123/CUBS.109.27



243.1326000.2015 [33], ГОСТ Р 58818–2020 [34], ГОСТ Р 59120–2021 [35]. Конструирование дорожных одежд со слоями оснований из цементогрунтов выполнялось в соответствии с Российскими государственными стандартами ГОСТ Р 58818–2020 [34] и ПНСТ 542-2021 [36].

Устройство конструктивных элементов дорожной конструкции (земляного полотна, асфальтобетонного покрытия) автомобильной дороги проводилось по стандартным технологиям в соответствии с Российскими государственными стандартами СП 78.13330–2012 [37] и СП 243.1326000.2015 [33]. Устройство слоев оснований дорожных одежд из цементогрунтов проводилось методом смешения на месте ресайклером Wirtgen WR2000 (Wirtgen International GmbH, Windhagen, Germany) в соответствии Российским государственным стандартом СП 78.13330–2012 [37]. Контроль качества устройства осуществлялся оценкой транспортно-эксплуатационного состояния и отбора проб материалов в соответствии Российским государственным стандартом ГОСТ Р 59120–2021 [35] и ГОСТ 33388–2015 [38].

Для проведения исследований использовали пробы глинистого грунта Лебяжского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан Российской Федерации. В соответствии с Российским государственным стандартом ГОСТ 25100–2020 [39] испытуемый глинистый грунт относится к супеси пылеватой. В качестве вяжущего использовался портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент» в количестве 8 % от массы грунта. Применяли следующие модификаторы: метилсиликат калия (PMS) в количестве 0.25–0.75 %; эфир поликарбоксилата (PCE) – 0.15–0.45 %; гидроксид натрия (SH) 0.05–0.15 %. Содержание воды в модифицированных цементогрунтовых смесях рассчитывали из условия достижения оптимальной влажности, при которой обеспечивается максимальная плотность смеси.

Изготовление лабораторных образцов и их испытания на физико-механические свойства проводили в соответствии с Российским государственным стандартом ГОСТ 23558–94 [40]. Определение предела прочности на сжатие ($R_{сж}$) и предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$) цементогрунтов производили после водонасыщения образцов в течение 2 суток. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 суток. Коэффициент морозостойкости ($K_{мор}$) определяли как отношение прочности цементогрунтов после 15 циклов замораживания-оттаивания к прочности водонасыщенных образцов после 28-суточного твердения в нормальных условиях. При оптимизации составов комплексно-модифицированных цементогрунтов применялся метод ротатбельного планирования второго порядка.

Определение модуля упругости слоев дорожных одежд и всей конструкций осуществлялось методом динамического нагружения установкой «Прогибомер FWD-RDT» и грунта земляного полотна статическим методом в соответствии Российским государственным стандартом ГОСТ Р 59866–2022 [41]. Модуль упругости цементогрунтов в лабораторных условиях определялся по Российскому государственному стандарту ГОСТ 24452–80 [42].

Экспериментальные данные физико-механических испытаний статистически обрабатывали с определением среднеарифметических значений результатов испытаний, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации и количества образцов, необходимых для получения результатов с заданной степенью точности. В экспериментальных исследованиях физико-механических свойств цементогрунтов коэффициент вариации составил не более 5 %. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента минимальное количество образцов в каждой серии испытаний принято не менее трех при изучении свойств цементогрунта, что удовлетворяет требованиям Российского государственного стандарта ГОСТ 10180–2012 [43]. При описании математического объекта исследований применялось ротатбельное планирование второго порядка.

Рентгенофазовый анализ применен для определения минералогического состава, изменения и идентификации продуктов новообразований в процессе твердения укрепленных грунтов с модификаторами. Эксперименты проводили на автоматическом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance, оборудованном приставкой Varío и линейным координатным детектором Vantec. Использовали $CuK\alpha$ излучение, монохроматизированное ($\lambda(Cu-K) = 1.54184 \text{ \AA}$) германиевым изогнутым монохроматором Йохансона, режим работы рентгеновской трубки 40 kV, 40 mA. Эксперименты выполняли при комнатной температуре в геометрии Брэгг-Брентано с плоским образцом. Построение и анализ дифрактограмм выполняли с использованием программы Bruker Diffrac Eva.

Для определения изменений фазового состава цементогрунтов применялись методы РФА и ДТА. Рентгенофазовый анализ проводился на автоматическом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance, оборудованном приставкой Varío и линейным координатным детектором

Vantec. Построение и анализ дифрактограмм выполнялись с использованием программы Bruker Difracs Eva. Дифференциально-термический анализ (ДТА) проводился совмещенным методом термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием микротермоанализатора NETZSCH STA 449F1 Jupiter.

3 Results and Discussion

Для автомобильной дороги VБ технической категории выполнено конструирование дорожных одежд: на ПК0+00 – ПК0+50 и ПК0+50 – ПК1+00. Дорожная одежда на ПК0+00 – ПК0+50 состоит из 2 слоев (рисунок 1): покрытие – асфальтобетон марки II типа Б на битуме БНД 70/100 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 9128-2013 [44], толщиной 0.04 м; основание – супесь пылеватая, укрепленная портландцементом и модифицированная кремнийорганическим соединением, поликарбоксилатным суперпластификатором и гидроксидом натрия, соответствующей марке по прочности М40 и морозостойкости F15 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 23558-94 [40], толщиной 0.16 м.

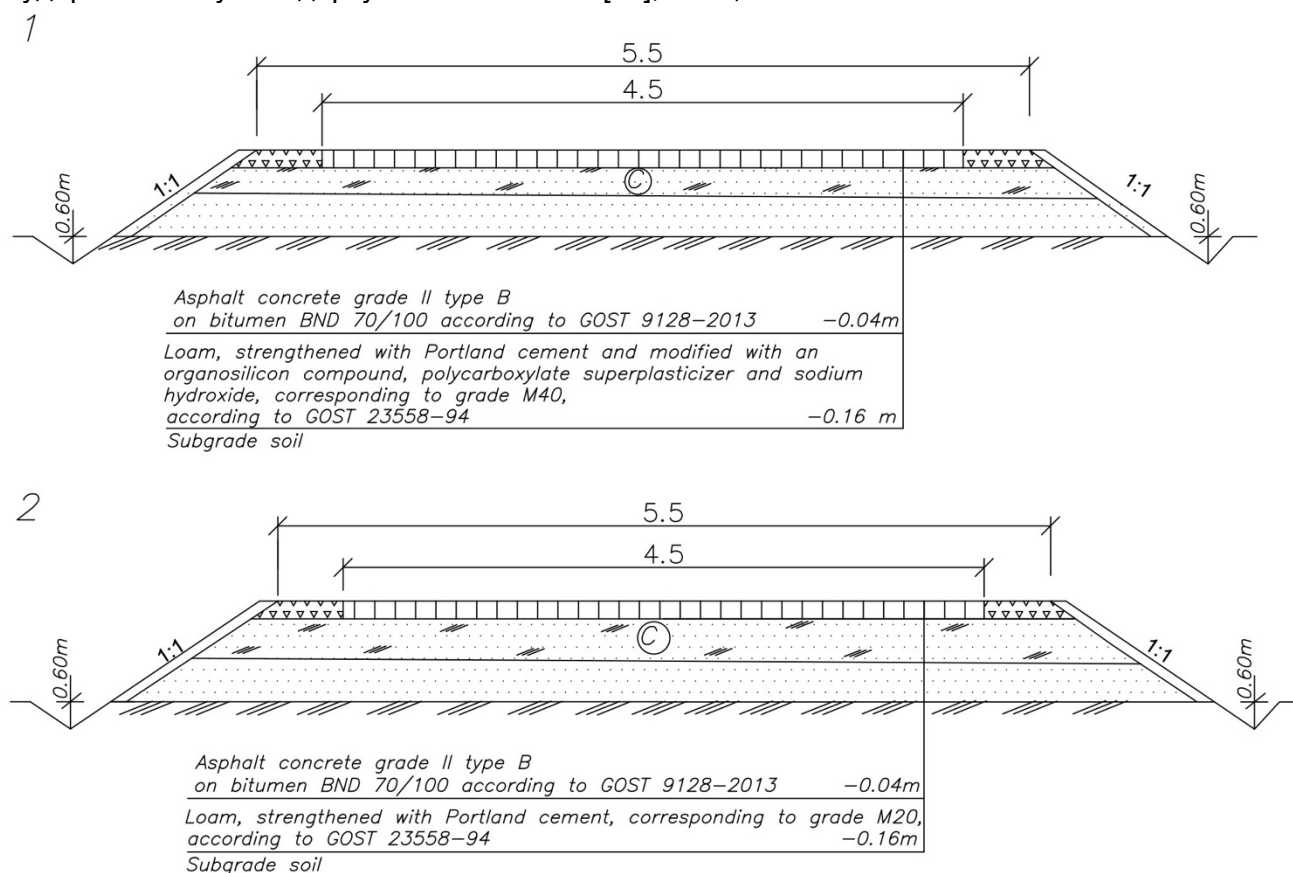


Рис. 1 - Конструкции дорожных одежд:

1 – с основанием из комплексно-модифицированного цементогрунта;

2 – с основанием из немодифицированного цементогрунта

Fig. 2 - Road pavement structures:

1 – with a base made of complex modified soil-cement;

2 – with a base made of unmodified soil-cement

Дорожная одежда на ПК0+50 – ПК1+00 состоит из 2 слоев: покрытие – асфальтобетон марки II типа Б на битуме БНД 70/100 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 9128-2013 [44], толщиной 0.04 м; основание – супесь пылеватая, укрепленная портландцементом, соответствующей марке по прочности М20 и морозостойкости F10 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 23558-94 [40], толщиной 0.20 м.

Для подбор составов комплексно-модифицированных цементогрунтов проведена оптимизация составов методом ротатабельного планирования второго порядка. На рисунке 2

Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V.;

Construction of road pavements using complex modified soil-cement;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10927. doi: 10.4123/CUBS.109.27



приведены зависимости предела прочности на сжатие (R_{str}), предела прочности на растяжение при изгибе (R_{tens}) и коэффициента морозостойкости (K) от содержания модификаторов МСК и ПКС при ГН 0.10 %.

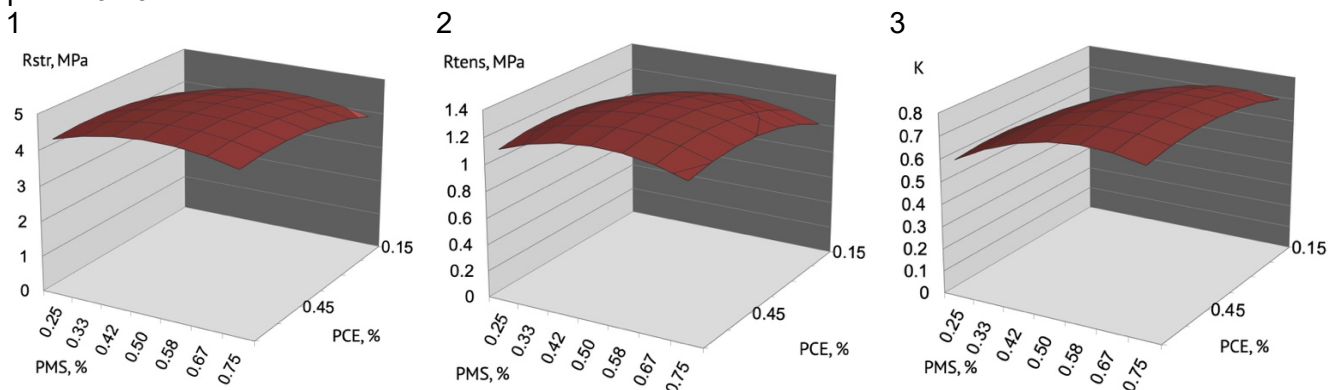


Рис. 2 - Зависимости влияния PMS, PCE и SH на физико-механические характеристики модифицированных цементогрунтов при ГН 0.1 % и ПЦ 8 %

1 – R_{str} , МПа; 2 – R_{tens} , МПа; 3 – K

Fig. 2 - Dependencies of the influence of PMS, PCE, and SH on the physical and mechanical characteristics of modified soil-cement at GN 0.1 % and PC 8 %

1 – R_{str} , МПа; 2 – R_{tens} , МПа; 3 – K

Анализ представленных зависимостей (рисунок 3) свидетельствует об эффективности совместного применения PMS, PCE и SH в составе цементогрунтов. Комплексная модификация обеспечила увеличение: предела прочности при сжатии на 95 %; предела прочности на растяжение при изгибе – на 132 %; коэффициента морозостойкости – на 129 % соответственно. Марка по прочности М40 и марка по морозостойкости F15 достигнута при применении: PMS – 0.4 %, PCE – 0.35 % и SH – 0.1 % при 8 % ПЦ. Поученные оптимальные составы комплексно-модифицированных цементогрунтов (марок по прочности М40 и морозостойкости F15) рекомендованы для опытно-промышленного внедрения.

Определены последовательность технологических операций по строительству и мониторингу состояния автомобильной дороги. (таблица 1, рисунок 3).

Таблица 1 - Данные технологических процессов строительства и мониторинга состояния автомобильной дороги

Table 1 - Data from technological processes of construction and monitoring of the condition of the road

№ операций	Последовательность технологических операций	Механизмы	Особенности технологических параметров
1	Подготовительные работы перед строительством	-	Разбивка оси трассы, установка временных дорожных знаков
2	Срезка растительного грунта и планировка земляного полотна	Автогрейдер ГС 14-02	На глубину 0.2 м
3	Определение модуля упругости верха грунта земляного полотна	КамАЗ с полной загрузкой	статическим методом нагружения
4	Подвоз и распределение грунта	Автосамосвал КамАЗ 65115, автогрейдер ГС 14-02	Из грунтового карьера
5	Прикатка основания	Комбинированный каток ДУ-84	8 проходов по одному следу до максимальной плотности грунтов
6	Розлив воды	Поливомоечная машина КО-806-01	За один проход
7	Распределение цемента	Цементораспределитель RW 800S	За один проход
8	Смешение компонентов	Ресайклер Wirtgen WR2000	На месте за один проход
9*	Розлив раствора	Поливомоечная машина	За один проход

Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V.;

Construction of road pavements using complex modified soil-cement;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10927. doi: 10.4123/CUBS.109.27



	комплексного модификатора	КО-806-01	
10*	Смешение компонентов	Ресайклер Wirtgen WR2000	На месте за один проход
11	Уплотнение слоя основания	Комбинированный каток ДУ-84	8 проходов по одному следу до максимальной плотности цементогрунтов
12	Розлив битумной эмульсии	Автогудронатор MASSENZA	За один проход
13	Определение модуля упругости на поверхности цементогрунтового слоя	Прогибомер FWD-RDT	динамическим методом нагружения
Технологический перерыв (7 суток)			
14	Укладка слоя покрытия	Асфальтоукладчик VOLVO, Гладковальцовые катки HAMM HD 75, Каток HAMM HD120	На всю ширину 5,5м - 4 прохода по одному следу в статическом режиме; - 10 проходов по одному следу в виброрежиме; - 2 прохода по одному следу в статическом режиме с нарезкой и уплотнением кромок
15	Мониторинг состояния автомобильной дороги	Передвижная дорожная лаборатория	Диагностика и отбор проб

* - операции для участка автомобильной дороги с комплексной модификацией цементогрунта.





Fig. 3 - Technological processes for construction and monitoring of highway condition

Рис. 3 - Технологические процессы строительства и мониторинга состояния автомобильной дороги

* - соответствует номерам операций таблицы 1

В процессе мониторинга состояния автомобильной дороги отбирали образцы-керы цементогрунтов с конструкций дорожных одежд в 28 суточном возрасте для определения физико-механических характеристик (таблица 2).

Table 2 - Results of comparison of physical and mechanical characteristics of soil-cement selected from the base of road pavements and manufactured in the laboratory

Таблица 2 - Результаты сравнения физико-механических характеристик цементогрунтов, отобранных из основания дорожных одежд и изготовленных в лаборатории

Показатели физико-механических испытаний	Участки автомобильной дороги					
	Участок 1 (комплексно-модифицированный цементогрунт)			Участок 2 (немодифицированный цементогрунт)		
	Образцы-вырубки	Лабораторные образцы	Требования ГОСТ 23558–94, не менее; (марка)	Образцы-вырубки	Лабораторные образцы	Требования ГОСТ 23558–94, не менее; (марка)
Предел прочности при сжатии, МПа	4.3	4.78	4.00; (M40)	2.16	2.49	2.00; (M20)
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	1.01	1.30	0.80; (M40)	0.41	0.55	0.40; (M20)
Коэффициент морозостойкости	0.77	0.81	0.75; (F15)	0.75	0.8	0.75; (F10)

При исследовании образцов-вырубок цементогрунтов из основания дорожных одежд, установлено, что в результате комплексной модификации укрепленного грунта повышены показатели уровней предела прочности при сжатии на 82 %, предела прочности на растяжение при изгибе – на 106 %, коэффициента морозостойкости – на 92 %. Марка по прочности и морозостойкости лабораторных образцов и вырубок с опытно-промышленных участков автомобильной дороги соответствуют установленным требованиям для комплексно-модифицированных и немодифицированных цементогрунтов, что подтверждает достоверность полученных результатов исследований.

Для определения минералогического состава и идентификации продуктов новообразований цементогрунтов применен метод рентгенофазового анализа. Методом РФА лабораторных цементогрунтов и отобранных из покрытия (рисунок 4, 5) установлено, что применение комплексного модификатора в цементогрунтах обеспечивает повышение количества портландита, низкоосновных гидросиликатов кальция и снижение содержания остаточных клинкерных минералов, а также увеличение количества аморфной фазы в виде тоберморитового геля (таблица 3). Это свидетельствует об эффективности процессов комплексной модификации и необходимости технологической стадии по модификации цементогрунтов.

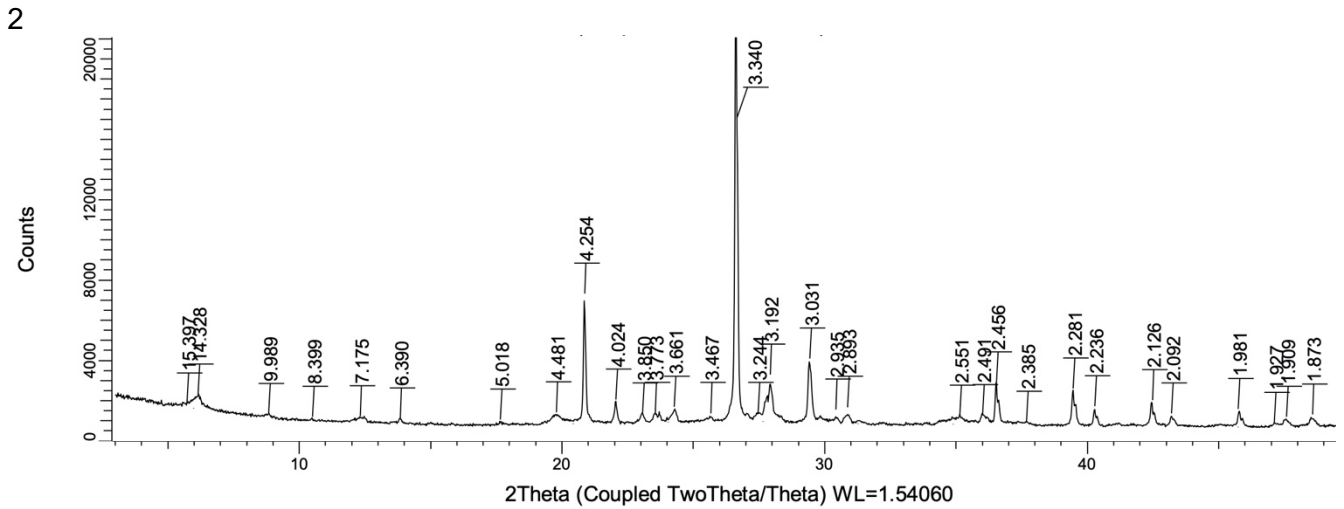
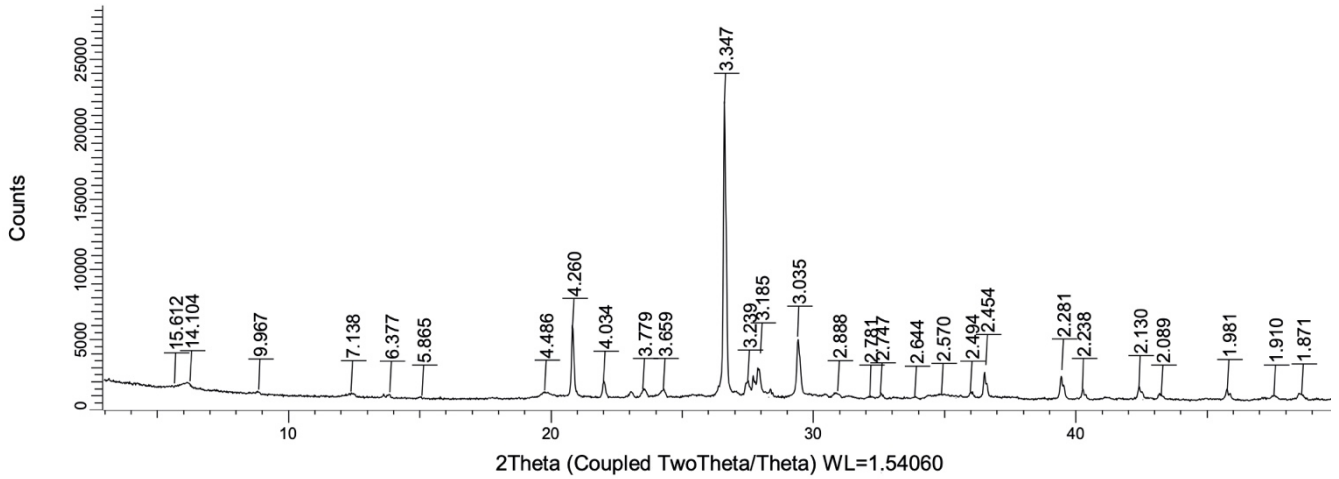
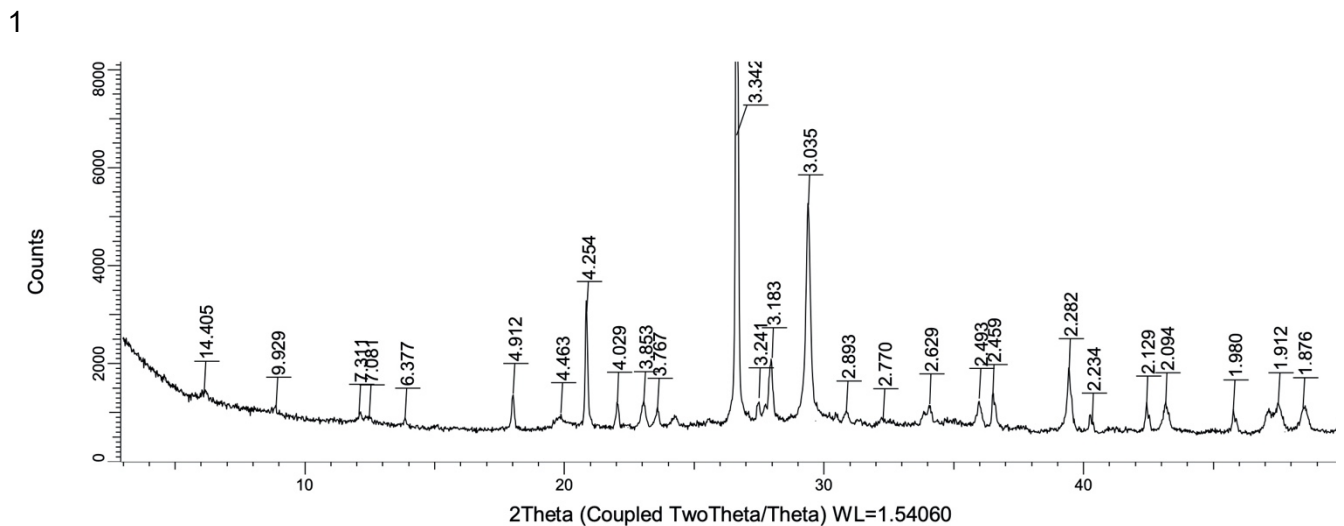


Figure 4 – X-ray diffraction patterns of soil-cement from the base of road pavements

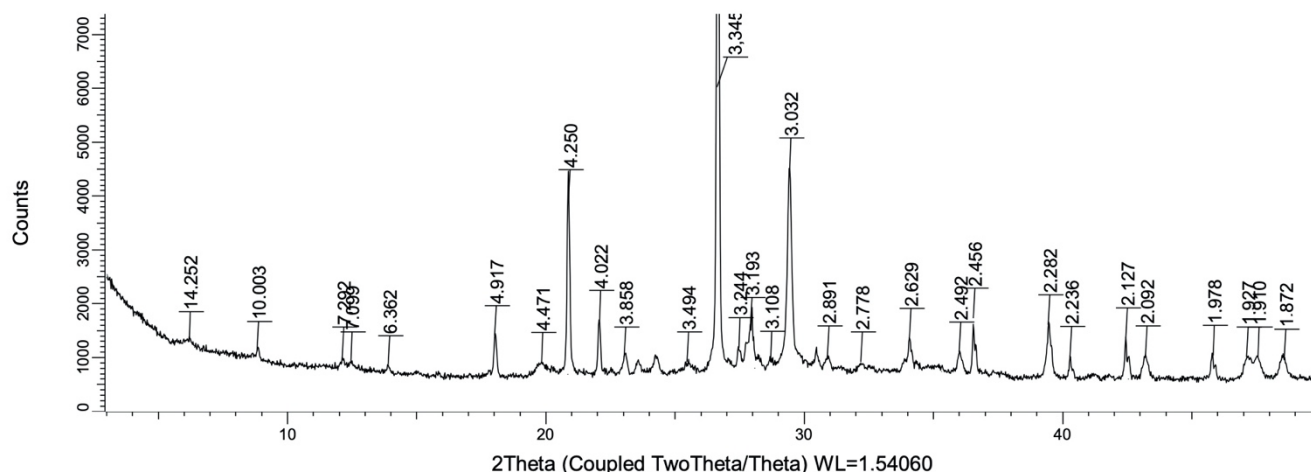
1 – complex modified soil-cement; 2 – unmodified soil-cement

Рисунок 4 – Дифрактограммы цементогрунтов из основания дорожных одежд

1 – комплексно-модифицированный цементогрунт; 2 – немодифицированный цементогрунт



2



**Fig. 5 – X-ray diffraction patterns of laboratory soil-cement
1 – complex modified soil-cement; 2 – unmodified soil-cement**

Рис. 5 – Дифрактограммы лабораторных цементогрунтов

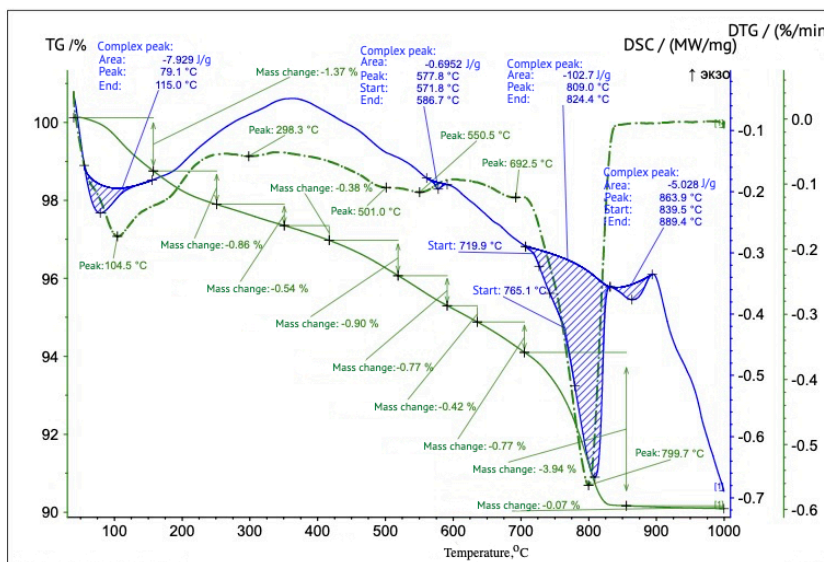
1 – комплексно-модифицированный цементогрунт; 2 – немодифицированный цементогрунт

Table 3 - Comparison of the phase composition of soil-cement selected from the base of road pavements and manufactured in the laboratory

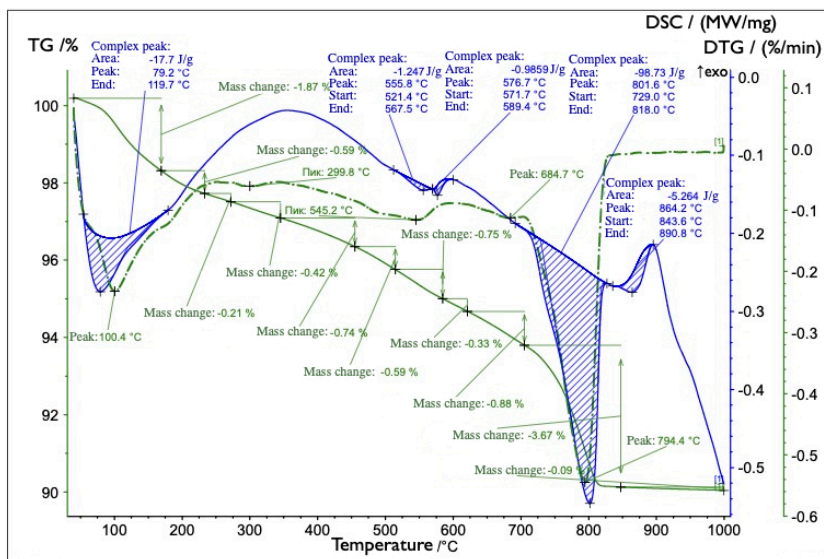
Таблица 3 - Сравнение фазового состава цементогрунтов, отобранных из основания дорожных одежд и изготовленных в лаборатории

Наименование минералов в цементогрунтах	Лабораторные образцы		Образцы, отобранные из основания автомобильной дороги	
	Комплексно-модифицированные цементогрунты	Немодифицированный цементогрунты	Комплексно модифицированные цементогрунты	Немодифицированные цементогрунты
Портландит	2.64 %	1.46 %	1.92	1.21
Кальцит	17.10 %	21.08 %	8.46	7.12
Гидросиликаты кальция	1.15 %	0.58 %	0.52	0.39
C ₃ S и C ₂ S	1.64 %	2.62 %	1.11	1.75
Аморфная фаза	29.9 %	27 %	27.3	25.2

Для подтверждения результатов РФА образцов-кернах цементогрунтов проведены исследования методом ДТА (рисунок 6). Повышенное содержание новообразований в комплексно-модифицированных цементогрунтах по сравнению с немодифицированными подтверждается следующими эндоэффектами: 79.1, 501.0, 692.5 °С. Результаты ДТА дополняют данные по изменению процессов структурообразования цементогрунтов и объясняют количественные показатели их минерального состава (таблица 3), обеспечивающие повышение физико-механических характеристик модифицированных укрепленных грунтов.



2



**Fig. 6 - Derivatograms of soil-cement from the base of road pavements
1 – complex modified soil-cement; 2 – unmodified soil-cement**

**Рис. 6 - Дериватограммы цементогрунтов из основания дорожных одежд
1 – комплексно-модифицированный цементогрунт; 2 – немодифицированный цементогрунт**

Проведены исследования по определению модуля упругости слоев дорожных одежд и земляного полотна. На основании полученных результатов исследований рассчитаны модули упругости цементогрунтовых слоев (таблица 4). Модуль упругости слоя из немодифицированного цементогрунта составил 260 МПа, а комплексно-модифицированного – 510 МПа. Установлено, что фактические результаты модуля упругости слоя превышают нормативные значения: у комплексно-модифицированного цементогрунта на 27.5 %; у немодифицированного – на 4 %.

**Table 4 - Results of comparative tests of elastic moduli of soil-cement
Таблица 4 - Результаты сравнительных испытаний модулей упругости цементогрунтов**

	Модуль упругости, МПа
--	-----------------------



Материал основания дорожной одежды	Слоя дорожной одежды	Лабораторного исследований	Требования ПНСТ 542–2021, не менее
Модифицированный цементогрунт, марка по прочности М40	510	550	400
Немодифицированный цементогрунт, маркой по прочности М20	260	300	250

4 Conclusions

1. Выполнен сравнительный анализ результатов лабораторных исследований и промышленных испытаний на автомобильных дорогах с применением комплексно-модифицированных цементогрунтов по следующим показателям: физико-механические свойства (предел-прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при изгибе и коэффициент морозостойкости), фазовый состав и модуль упругости.

2. Разработаны конструкции дорожных одежд переходного типа ВБ технической категории с двумя сравнительными участками со слоями оснований из супеси пылеватой, укрепленной портландцементом, немодифицированной и модифицированной кремнийорганическим соединением, поликарбоксилатным суперпластификатором и гидроксидом натрия.

3. Установлено, что в результате комплексной модификации цементогрунтов повышены показатели уровней физико-механических свойств и морозостойкости. Комплексная модификация обеспечила увеличение: предела прочности при сжатии на 1.95 раза; предела прочности на растяжение при изгибе и коэффициента морозостойкости в 2.3 раза. На основании оптимизации разработаны составы для опытно-промышленного внедрения.

4. Определена технология производства работ по строительству автомобильной дороги, в том числе по устройству конструктивных слоев основания дорожных одежд из цементогрунтов методом смешения на. На основании разработанных конструкций дорожных одежд, технологии производства работ и оптимизации состава цементогрунтов выполнены работы по внедрению комплексной модификации цементогрунтов при строительстве автомобильной дороги с устройством двух опытно-промышленных участков.

5. Установлено, что марка по прочности и морозостойкости лабораторных образцов и вырубок-кернов с опытно-промышленных участков автомобильной дороги соответствуют установленным требованиям для комплексно-модифицированных и немодифицированных цементогрунтов, что подтверждает достоверность полученных результатов исследований. Методом РФА и ДТА лабораторных и промышленных образцов цементогрунтов установлено, что применение модификации способствует интенсификации процессов структурообразования цементогрунтов, что подтверждается количественными изменениями минерального состава новообразований, обеспечивающих повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик. Примененная технология обеспечила повышение модулей упругости лабораторных образцов из укрепленных грунтов, а также цементогрунтовых слоев дорожных одежд на опытно-промышленных участках автомобильной дороги в 1.8–2.0 раза.

6. Выполненные исследования подтверждают эффективность и правомерность реализованного научного подхода по применению комплексной модификации цементогрунтов при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд.

References

1. Gupta, S., Kumar, S. (2022) A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, **8**, 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>.
2. Zolotukhin, S.N., Andreev, A.V., Volokitin, V.P. (2020) Non-firing materials using clay soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **962**, 022030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/2/022030>.



3. Plyuta, K. (2019) Determination of the percentage of lime in the strengthening of clay soils using pH. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **667**, 012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012079>.
4. Bulanov, P.E., Asanbaev, R.B., Khairullin, I.I., Valeeva, G.R., Repenko, D.A., Vdovin, E.A., Mavliev, L.F. (2016) General information on the use and application of road building materials on the basis of soil and Portland cement. *News KSUAE*, **3(37)**, 244-249. https://izvestija.kgasu.ru/files/3_2016/244_249_Vdovin_Mavliev.pdf?ysclid=lqoqpkiz1p437502402.
5. Kuyukov, S., Testeshev, A., Zhigailov, A., Shmatok, V. (2020) Evaluation of the effectiveness of the soil-cement with hydrophobized surface for road construction. *Journal of Physics: Conference Series*, **1614**, 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012007>
6. Shepelev, I.I., Eskova, E.N., Potapova, S.O., Khizhnyak, S.V., Bochkov, N.N. (2019) Ecological aspects of technogenic material application in road construction technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **315**, 052019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052019>.
7. Nguyen, H.-S., Adachi, Y., Kizuki, T., Maeba, H., Inazumi, S. (2020) Integration of information and communication technology (ICT) into cement deep mixing method. *International Journal of GEOMATE*, **19(74)**, 194–200. <https://doi.org/10.21660/2020.74.9329>.
8. Chudinov, S. (2020) Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **817(1)**, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012007>.
9. Berdov, G.I., Mashkin, N.A. (2015) Perspective directions in improvement of technology and construction materials based on mineral binders. *News of Universities. Construction*, **4**, 45-56. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23762428_81096322.pdf.
10. Polyntsev, E., Kvitko, A. (2020). Using foam polyurethane sealers for strengthening of soils of a road bed of transport constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **832(1)**, 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012029>.
11. Chong, S.H. (2019) Development of constitutive model for simulation of cemented soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, **37(5)**, 4635–4641. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00903-3>.
12. Cai, Y., Xu, L.R., Liu, W.Z., Shang, Y., Su, N., Feng, D. (2020) Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **128**, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105878>.
13. Pinto, V.R., Ikuma, K. (2022). Effects of soil surface chemistry on adsorption and activity of urease from a crude protein extract: implications for biocementation applications. *Catalysts*, **12(2)**, 230. <https://doi.org/10.3390/catal12020230>.
14. Vdovin, E., Bulanov, P., Stroganov, V., Mavliev, L. (2023) Physical and mechanical characteristics of modified soil cement with polycarboxylate superplasticizers. *Proceedings of STCCE. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, **291**, 125-133, https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_10.
15. Roshan, K., Choobbasti, A., Soleimani, K., Fakhrabadi, A. (2021) The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand. *Cold Regions Science and Technology*, **193(3)**, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103418>
16. Luo, X., Kong, L., Bai, W. (2023) Effect of Superhydrophobic Nano-SiO₂ on the Hydraulic Conductivity of Expansive Soil and Analysis of Its Mechanism, *Applied Sciences*, **13**, 8198. <https://doi.org/10.3390/app13148198>.
17. Chong, S.H. (2019) Development of constitutive model for simulation of cemented soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, **37(5)**, 4635–4641. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00903-3>.
18. Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C., Hong, J.X. (2015) Chemical admixtures – Chemistry, Applications and Their Impact on Concrete Microstructure and Durability. *Cement and Concrete Research*, **78**, 81-99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.
19. Kanchanason, V., Plank, J. (2019) Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H–PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of



- slag and calcined clay blended cements. *Cement and Concrete Research*. **119(1)**, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.007>.
20. Kanchanason, V., Plank, J. (2018) Effectiveness of a calcium silicate hydrate – Polycarboxylate ether (C-S-H–PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement. *Construction and Building Materials*, **169**, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.053>.
 21. Vdovin, E.A., Mavliev, L.F., Bulanov, P.E. (2015) Interaction of complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide with the basic components of soil for road purpose. *Izvestiya KGASU*, **1(31)**, 165-170, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23610731>.
 22. Al-Kheetan, M.J., Rahman, M.M., Chamberlain, D.A. (2020) Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. *International Journal of Pavement Engineering*, **21(14)**, 1746-1754. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567917>.
 23. Roshan, K., Choobbasti, A., Soleimani, K., Fakhrabadi, A. (2021) The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand. *Cold Regions Science and Technology*, **193(3)**, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103418>.
 24. Pichugin, A.P., Grishina, V.A., Khritankov, V.F. (2008) The use of complex additives to strengthen soils in rural construction, *Magazine of building materials*, **10**, 36-38. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11762288&ysclid=lqoryo5wxl945370347>.
 25. Dmitrieva, T.V., Kutsyna, N.P., Bezrodnykh, A.A., Strokova, V.V., Markova, I.Yu. (2019) Efficiency of reinforcement of technological soil by mineral modifiers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, **7**, 14-23. https://doi.org/10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159.
 26. Kharchenko, I., Murtazaev, S., Saidumov, M., Nakhaev, M. (2015) Compositions of Especially Finely Dispersed Binders (EFDB) for the Injection Fastening the Soils with a Complex Binder of Different Genesis. *Ecology and Industry of Russia*, **19(3)**, 48-52. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-3-48-52>.
 27. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F. (2023) Phase structure of cement pastes with antifreeze agents. *Magazine of Civil Engineering*, **120(4)**, 12007. <https://doi.org/10.34910/MCE.120.7>.
 28. Mavliev, L., Bulanov, P., Vdovin, E., Zaharov, V., Gimazov, A. (2016) Road soil cement with complex additives based on organosilicon compounds and electrolytes. *ZKG: ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL*, **69(9)**, 49–54. <https://www.semanticscholar.org/paper/Road-soil-cement-with-complex-additives-based-on-Lenar-Pavel/1292a3dd0c1342968024be3a35b48eb5b7ef42ba>.
 29. Bulanov, P.E., Vdovin, E.A., Mavliev, L.F., Stroganov, V.F. (2017) Optimization of the composition and study of the influence of a complex hydrophobic-plasticizing additive on the physical and technical properties of clay soils strengthened with Portland cement. *Izvestiya KGASU*, **4(42)**, 376-383. https://izvestija.kgasu.ru/files/4_2017/376_383_Bulanov_Vdovin.pdf?ysclid=lqosx7i4tc892437680.
 30. Sokolova, Yu.V., Aizenstadt, A.M., Korolev, E.V., Chibisov, A.A. (2020) Assessment of the influence of recipe factors on the structure formation of a polymer-organic binder. *Magazine of building materials*, **9**, 27–36. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-27-36>.
 31. Bulanov, P.E., Mavliev, L.F., Vdovin, E.A., Asadullina, A.R., Garayeva, Zh.B., Maksimov, V.G. (2015) Pilot industrial implementation of crushed stone-sand mixture treated with Portland cement in combination with a plasticizing agent and water-repellent additive during highway construction. *Izvestiya KGASU*, **4(34)**, 346-351. https://izvestija.kgasu.ru/files/4_2017/376_383_Bulanov_Vdovin.pdf?ysclid=lqosx7i4tc892437680.
 32. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F., Mavliev, L.F. (2023) Hydrophobization of soil-cement for road pavements: modification, structure, technology and application. Publishing house of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Kazan, 204. https://www.kgasu.ru/upload/iblock/57c/p61cu2l78vfpif1evemcmu502y73mdn0/Gidrofobizat_siya-tsementogruntov-dlya-dorozhnykh-odezhd.pdf.
 33. SP 243.1326000.2015. Design et construction of low-volume roads. <https://docs.cntd.ru/document/1200128150?ysclid=lqmayqlowr645222491>.
 34. GOST R 58818-2020 Automobile roads with low traffic volume. Design, construction and calculation. <https://docs.cntd.ru/document/1200172575?ysclid=lqmb0ococ1559359471>.



35. GOST R 59120-2021 Automobile roads of general use. Road pavement. General requirements. <https://docs.cntd.ru/document/1200178829?ysclid=lqmb2jexbc493455294>.
36. PNST 542-2021 Automobile roads of general use. Flexible pavement. Design rules. <https://docs.cntd.ru/document/1200179561?ysclid=lqmb4wxy1v966941968>.
37. SP 78.13330-2012 Automobile roads. <https://docs.cntd.ru/document/1200095529?ysclid=lqmb8b81q3704722536>.
38. GOST 33388-2015 Automobile roads of the general use. Requirements to conducting diagnostics and certification. <https://docs.cntd.ru/document/1200135143?ysclid=lqmba2ag1g133852827>.
39. GOST 25100-2020 Soils. Classification. <https://docs.cntd.ru/document/1200174302?ysclid=lqmbbzb6m4850695648>.
40. GOST 23558-94 Crushed stone-gravel-sandy mixtures, and soils treated by inorganic binders for road and airfield construction. Specifications. <https://docs.cntd.ru/document/901705984?ysclid=lqmb0r5gm310521134>.
41. GOST R 59866-2022 Automobile roads of general use. Flexible pavement indexes of deformation of structural layers of loose materials and soils. Technical requirements and methods of determination. <https://docs.cntd.ru/document/1200183468?ysclid=lqmbhskn7q979710225>.
42. GOST 24452-80 Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. <https://docs.cntd.ru/document/9056198?ysclid=lqmbjeo6r999701136>.
43. GOST 10180-2012 Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. <https://docs.cntd.ru/document/1200100908?ysclid=lqmbmedawp124731909>.
44. GOST 9128-2013 Asphaltic concrete and polimer asphaltic concrete mixtures, asphaltic concrete and polimer asphaltic concrete for roads and aerodromes. Specifications. <https://docs.cntd.ru/document/1200108509?ysclid=lqmc3ndsbd335797078>.