



УДК: 691; 625.7/.8.05

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.5

EDN: FPWJL

## Применение комплексной модификации в технологии укрепления грунтов

Е.А. Вдовин<sup>1</sup>, Н.В. Коновалов<sup>1</sup>

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

**Аннотация:** Использование укрепленных грунтов при строительстве дорожных одежд различных категорий автомобильных дорог является актуальным вектором развития ресурсосберегающего направления в дорожной индустрии, а также технологией, способствующей повышению несущей способности и межремонтных сроков дорожных одежд. Анализ литературы и производственного опыта показывает, что в большинстве случаев, при укреплении грунтов вяжущими требуется дополнительный технологический этап по комплексной модификации с целью обеспечения повышенных показателей таких свойств, как морозостойкость, пределы прочности при сжатии и изгибе. Данные свойства косвенно отражают степень долговечности материала и конструктивного слоя в целом. Цель работы заключается в анализе результатов технических показателей свойств при строительстве и эксплуатации участков дорожных одежд автомобильной дороги с применением цементогрунтов, комплексно-модифицированных активированными наполнителями. Задачами исследования является оценка влияния комплексной модификации на физико-механические показатели цементогрунтов и эксплуатационные характеристики автомобильной дороги, полученные в результате многолетнего мониторинга ее состояния. В работе представлены основные этапы и технологические операции устройства слоев оснований дорожных одежд из комплексно-модифицированных цементогрунтов, результаты определения прочности образцов отобранных из конструкции, а также эксплуатационных характеристик автомобильной дороги – модуль упругости и колеиность. Полученные данные подтверждают эффективность применения комплексной модификации, которая может рассматриваться как необходимый этап развития технологии укрепления грунтов в дорожном строительстве для повышения несущей способности и сроков службы дорожных одежд. Установлено, что глубина колеи на участках дорожных одежд, устроенных с применением технологии комплексной модификации оснований на основе использования активированных наполнителей, снижается на 40 %, значение модуля упругости повышается на 9,1 %, пределы прочности на сжатие и на растяжение при изгибе цементогрунтовых слоев увеличиваются соответственно до 26,7 % и 73,5% в сравнении с участками на немодифицированных укрепленных грунтах. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в подтверждении эффективности комплексной модификации укрепленных грунтов на основе активированных наполнителей, а также в установлении возможности увеличения межремонтных сроков дорожных одежд, расширении области статистических данных эксплуатационных показателей дорожных одежд с основаниями из цементогрунтов.

**Ключевые слова:** дорожная одежда, комплексная модификация, цементогрунт, активированный наполнитель, мониторинг состояния, модуль упругости, глубина колеи, прочность.

**Для цитирования:** Вдовин Е.А., Коновалов Н.В., Применение комплексной модификации в технологии укрепления грунтов // Известия КГАСУ, 2024, № 3(69), с. 46-57, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.5, EDN: FPWJL

# Application of complex modification in soil stabilization technology

E.A. Vdovin<sup>1</sup>, N.V. Konovalov<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The use of stabilization cement-soil in the construction of road pavements of various categories of highways is an actual vector of development of resource-saving direction in the road industry, as well as a technology that contributes to increasing the load-bearing capacity and inter-repair periods of road pavements. The analysis of literature and industrial experience shows that in most cases, when reinforcing soils with binders, an additional technological stage of complex modification is required in order to provide increased indicators of such properties as frost resistance, compressive and bending strength. These properties indirectly reflect the degree of durability of the material and the structural layer as a whole. The purpose of the work is to analyze the results of technical indicators of properties during the construction and operation of road sections of highway pavements with the use of cement-soil, complex-modified with activated fillers. The objectives of the study are to evaluate the effect of complex modification on the physical and mechanical parameters of cement-soil and operational characteristics of the highway, obtained as a result of long-term monitoring of its condition. The paper presents the main stages and technological operations of the device of road base layers made of complex-modified cement-soil, the results of determining the strength of samples taken from the structure, as well as the operational characteristics of the highway - modulus of elasticity and rutting. The obtained data confirm the effectiveness of complex modification application, which can be considered as a necessary stage in the development of soil reinforcement technology in road construction to increase the bearing capacity and service life of roadways. It has been established that the rut depth on the sections of pavements constructed with the application of the technology of complex modification of bases based on the use of activated fillers is reduced by 40%, the value of elastic modulus is increased by 9.1%, the compression and flexural tensile strength limits of cement-soil layers are increased to 26.7% and 73.5%, respectively, in comparison with the sections on unmodified reinforced soils. The significance of the obtained results for the construction industry is to confirm the effectiveness of complex modification of reinforced soils on the basis of activated fillers, as well as to establish the possibility of increasing the inter-repair periods of roadways, expanding the area of statistical data of operational indicators of roadways with bases made of cement-soil.

**Keywords:** modification, cement-soil, elastic modulus, activated filler, pavement, monitoring

**For Citation:** Vdovin E.A., Konovalov N.V. Application of complex modification in soil stabilization technology// News of KSUAE, 2024, № 3(69), p. 46-57, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.5, EDN: FPWJJI

## 1. Введение

Применение укрепленных грунтов в слоях оснований или покрытий дорожных одежд может способствовать повышению экономической эффективности строительства автомобильных дорог в районах обедненных прочными каменными материалами [1-2]. Кроме того, укрепленные неорганическим вяжущим слою, обладают не только монолитной структурой, но также и достаточно высоким пределом прочности на сжатие [3]. Известно, что для достижения повышенных свойств и долговечности цементогрунтов необходима их модификация с применением, например: ПАВ, полимерных соединений, наполнителей, отходов промышленности [4-6]. Одним из основных показателей долговечности конструктивного слоя дорожной одежды является морозостойкость, повышение которой является важной задачей при модификации цементогрунтов. Как отмечают авторы [7-9], введение резиновой крошки в размере 250-550 мкм от 10-25 % повышает морозостойкость цементогрунтов за счет релаксации напряжений возникающих в поровом пространстве при циклических воздействиях отрицательных температур. Так же морозостойкость

возможно повысить за счет оптимизации гранулометрического состава заполнителя и применения фиброармирования [10]. Применение слабых грунтов, таких как филлит, возможно при совместном применении портландцемента в качестве вяжущего и крупного заполнителя, до 50% в составе. Превышение содержания крупного наполнителя приводит к повышенной пористости материала и снижению физико-механических показателей [11]. Широкое распространение приобретают методы модификации цементогрунтов путем введения различных минеральных наполнителей. Известны методы модификации цементогрунтов введением коксовой угольной пыли. Цементогрунты, модифицированные угольной пылью имеют больше кристаллических фаз грунтовых минералов (например, кварца и доломита) и продуктов гидратации например, CSH по сравнению с цементогрунтами без модификации. В основном это происходит за счет ускорения гидратации цемента, пуццолановой реакции и снижения количества свободной воды. Кроме того, модификация данными наполнителями способствует физико-химическому взаимодействию между грунтовыми минералами и цементом [12]. Модификация укрепленных грунтов кремнеземной пылью в количестве от 5% до 10% повышает прочность цементогрунтов за счет увеличения пуццолановой активности вследствие наличия большого количества аморфного диоксида кремния в составе наполнителя [13]. Перспективным направлением в технологии укрепления грунтов для дорожного строительства является применение модификаторов, которые получены методами активации минеральных наполнителей с целью повышения эффективности их модифицирующего воздействия [14-16], а также переход к комплексной модификации, которая подразумевает использование многокомпонентных модификаторов полифункционального действия, способствующих повышению несущей способности и сроков службы дорожных одежд [18-19]. На основе анализа литературного обзора установлено, что модификация цементогрунтов различными типами наполнителей повышает значения пределов прочности и коэффициента морозостойкости. Как представлено в результатах исследования авторов активированный доломит повышает значения физико-механических показателей модифицированного материала. Однако выявлено, что недостаточно изучено влияние комплексных наполнителей на основе активированных карбонатных пород (известняки, доломиты др.), кварцевых песков и химических соединений (гидрофобизаторов и пластификаторов и др.) на физико-механические свойства цементогрунтов дорожного назначения, а также имеется незначительный объем опытно-промышленного внедрения и результатов мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния дорожных одежд со слоями из цементогрунтов, комплексно-модифицированных активированными наполнителями.

Целью работы является анализ результатов технических показателей свойств при строительстве и эксплуатации участков дорожных одежд автомобильной дороги с применением цементогрунтов, комплексно-модифицированных активированными наполнителями.

Для достижения поставленных целей решались задачи:

- определение свойств исходных материалов для слоев цементогрунтов;
- конструирование дорожных одежд и разработка технологии по их строительству на экспериментальных участках автомобильной дороги с применением цементогрунтов;
- анализ результатов определения технических характеристик и параметров (глубина колеи и модуль упругости) на экспериментальных участках автомобильных дорог при выполнении мониторинга состояния дорожных одежд в процессе эксплуатации.

## 2. Материалы и методы

Автомобильная дорога с опытно-промышленными участками соответствует VB технической категории. Запланировано экспериментальное строительство двух участков протяженностью по 50 метров: 1 – дорожная одежда с основанием из комплексно-модифицированной цементогрунтовой смеси; 2 – дорожная одежда с основанием из цементогрунтовой смеси с добавлением асфальтогранулята. Покрытие – однослойный асфальтобетон тип Б марка II по ГОСТ 9128. Грунт земляного полотна суглинков легкий по ГОСТ 25100.

В качестве грунта для укрепления использована супесь из местного карьера с дальностью возки 16 километров. Вяжущее для укрепления супеси - портландцемент ЦЕМ I 42.5Н (АО «Катавский цемент», г. Челябинск) в количестве 7 % от массы грунта. Комплексная модификация супеси, укрепленной портландцементом, осуществлялась с применением асфальтогранулята, активированной смеси состоящей из доломитового порошка и гидрофобизатора. Содержание асфальтогранулята в супеси составляет 20% от массы грунта. Доломит совместно с гидрофобизатором активировали помолотом в производственной вибрационно-шаровой мельнице производительностью 500 кг/час. Содержание гидрофобизатора в смеси составляло 2,4 кг на 1 тонну доломитового порошка. Использовался доломитовый порошок производства «СПМ Амик-с» (г. Казань) на основе доломита карьера «Бима» (Лаишевский муниципального район Республики Татарстан) с содержанием  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 = 93,8\%$ . В качестве гидрофобизатора использован натрий олеиновый кислый. Содержание активированной смеси составляет 3 % от массы грунта.

Контроль качества устройства осуществлялся оценкой транспортно-эксплуатационного состояния в соответствии ГОСТ Р 59120 и ГОСТ 33388. Модуль упругости определялся методом динамического нагружения установкой «Прогибомер FWD-RDT». Испытания цементогрунтов по определению пределов прочности на сжатие (Rсж) и на растяжение при изгибе (Rизг), морозостойкости проводились в соответствии с ГОСТ 23558. Морозостойкость оценивалась по коэффициенту морозостойкости (Кмор) после 15 циклов замораживания оттаивания цементогрунтов, отобранных из конструкции дорожной одежды.

### 3. Результаты и обсуждение

В процессе испытаний определены гранулометрический состав супеси (табл.1) и физические свойства грунта (табл. 2, рис. 2). По классификации ГОСТ 25100 грунт относится к супеси песчанистой.

Таблица 1

Гранулометрический состав супеси

Фракции, мм	0,005	0,01	0,05	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0
Частные ост., %	40,35	0,07	2,79	6,06	44,37	2,62	1,27	2,40	0,07
Полные ост., %	100	59,65	59,58	56,79	50,73	6,36	3,74	2,47	0,07

Таблица 2

Физические свойства грунта

№п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Значения показателей
1	2	3	4
1	Наименование грунта	-	Супесь песчанистая
2	Естественная влажность	%	3,25
3	Влажность границы текучести	%	20,66
4	Влажность границы раскатывания	%	14,30
5	Интервал пластичности	%	6,36
6	Содержание песчаных частиц (2,0-0,05 мм), по массе	%	59,58
7	Максимальная плотность грунта	г/см <sup>3</sup>	1,95
8	Оптимальная влажность грунта	%	12,45

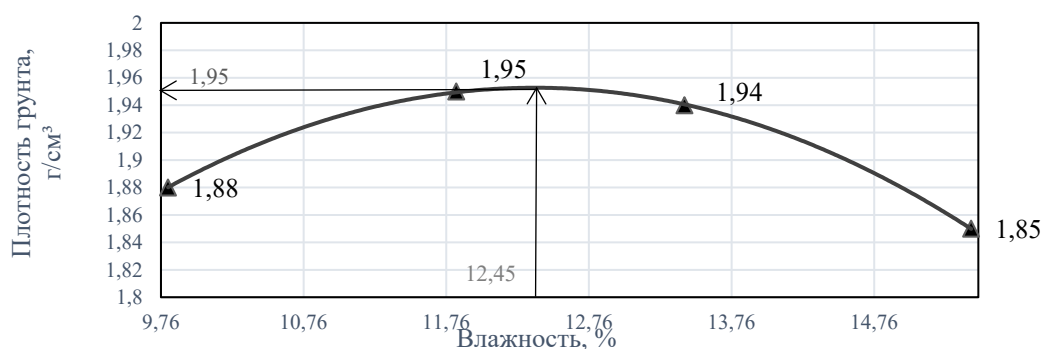


Рис.1. Зависимость плотности грунта от влажности (иллюстрация авторов)

Fig.1. Dependence of soil density on moisture content (illustration by the authors)

Определены показатели асфальтогранулята (табл. 3), который применяли в составе цементогрунтов с целью утилизации и улучшения гранулометрического состава супеси в процессе устройства слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов.

Таблица 3

## Технические показатели асфальтогранулята

Наименование показателя	Требуемые значения	Фактический результат
1	2	3
Агрегатный состав асфальтогранулята:		
Полный остаток % по массе, на ситах с размером отверстий, мм		
80	не норм.	0,0
40	не норм.	1,3
20	не норм.	5,9
10	не норм.	26,7
5	не норм.	50,3
Зерновой состав минеральной части асфальтогранулята:		
Полный остаток % по массе, на ситах с размером отверстий, мм		
40,0	не норм.	0,0
20,0	не норм.	4,8
15,0	не норм.	10,22
10,0	не норм.	22,17
5,0	не норм.	46,63
2,5	не норм.	53,23
1,25	не норм.	64,11
0,63	не норм.	72,23
0,315	не норм.	85,54
0,16	не норм.	90,32
0,075	не норм.	97,77
Потеря массы по дробимости в насыщенном водой состоянии, %	От 13% до 15% (М800)	14,33
Марка щебня, в составе асфальтогранулята, по прочности (дробимости)	не ниже М 600 (для слоев основания дорожной одежды)	М 800
Содержание битумного вяжущего, %	не норм.	4,28

Для автомобильной дороги VB технической категории выполнено конструирование дорожных одежд: на ПК 0+00 – ПК 0+50 и ПК 0+50 – ПК 1+00. Дорожная одежда на ПК 0+00 – ПК 0+50 состоит из 2 слоев (рис. 2): покрытие – асфальтобетон марки II типа Б на битуме БНД 70/100 по ГОСТ 9128, толщиной 0,05 м; основание – комплексно-модифицированная цементогрунтовая смесь, соответствующая марке по прочности М40 и морозостойкости F15, в соответствии с ГОСТ 23558, толщиной 0,20 м.

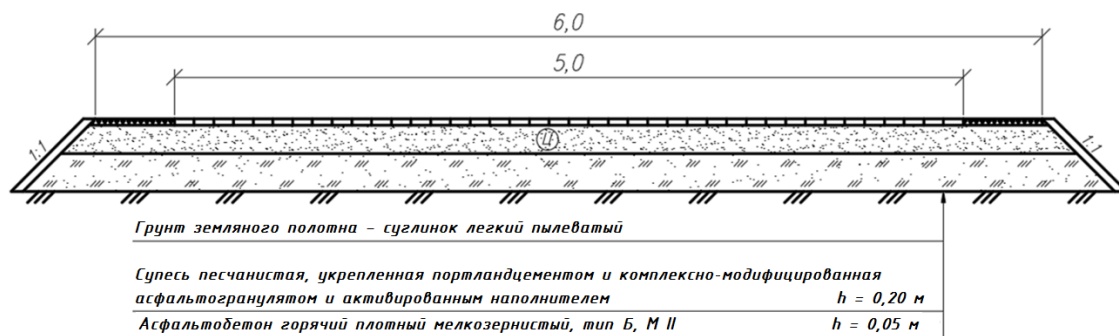


Рис. 2. Конструкция дорожной одежды с основанием из комплексно-модифицированного цементогрунта (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Road pavement design with a base made of complex-modified cement-coated soil (illustration by the authors)

Дорожная одежда на ПК 0+50 – ПК 1+00 состоит из 2 слоев (рис. 2): покрытие – асфальтобетон марки II типа Б на битуме БНД 70/100 по ГОСТ 9128 толщиной 0,05 м; основание – супесь песчаная с добавлением асфальтогранулята, укрепленная портландцементом, соответствующая марке по прочности М40 и морозостойкости F15 по ГОСТ 23558, толщиной 0,20 м.

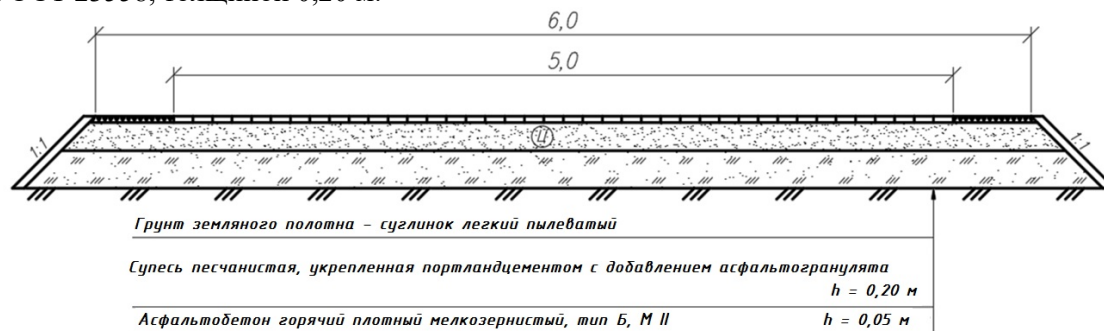


Рис. 3. Конструкция дорожной одежды с основанием из цементогрунта (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Road pavement structures with cement-soil foundation (illustration by the authors)

Разработана технология производства работ по строительству дорожных одежд с основаниями из цементогрунтов методом «смешения на дороге» с ведущим механизмом – ресайклер Wirtgen WR2000 (рис. 4). Последовательность технологических операций следующая: подвоз грунта из карьера автосамосвалами КамАЗ 65115; распределение и планировка автогрейдером ГС 14-02; прикатка слоя комбинированным катком ДУ-84 массой 14 т за 2 прохода по следу; подвоз асфальтогранулята с приобъектной базы автосамосвалами КамАЗ 65115; распределение и планировка асфальтогранулята автогрейдером ГС 14-02; подвоз и розлив воды поливомоечной машиной КО-806-01; распределение портландцемента и активированного наполнителя (на участках с комплексной модификацией) прицепным распределителем Streumaster RW 8000 s; перемешивание материалов ресайклером Wirtgen WR2000 за один проход по следу с перекрытием 1/4 ширины; уплотнение смеси комбинированным катком ДУ-84 массой 14 т за 9 проходов по одному следу, уплотнение проводилось от кромки укладываемой полосы к оси с перекрытием следа на 1/3 ширины вальца со скоростью 2 км/ч; контрольный замер ровности, уклонов и высотных отметок; уход за уложенным слоем розливом битумной эмульсии ЭБДК Б с расходом 0,9 л/м<sup>2</sup> автогудронатором АС-43253; технологический перерыв – 7 суток; укладка асфальтобетонного покрытия асфальтоукладчиком Vogele Super 1800-1.



Рис. 4. Фото технологических операций по строительству цементогрунтовых оснований и последующего мониторинга состояния дороги: 1) Распределение портландцемента и активированного наполнителя (на участке с комплексной модификацией) по уложенному слою грунта; 2) Перемешивание компонентов ресайклером и уплотнение основания катком; 3) Уход за уложенным слоем – розлив битумной эмульсии; 4) Отбор кернов; 5) Определение поперечной ровности; 6) Определение модуля упругости. (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Photos of technological operations for the construction of cement-based foundations and subsequent monitoring of the road condition: 1) Distribution of Portland cement and activated filling (in the area with complex modification) over the laid soil layer; 2) Mixing of components with a recycler and compaction of the base with a roller; 3) Maintenance of the paved layer - filling of bituminous emulsion; 4) Sampling of cores; 5) Determination of transverse flatness; 6) Determination of the elastic modulus of the pavement; 5) Determination of the transverse flatness of the pavement; 6) Determination of the elastic modulus of the pavement. (illustration by the authors)

В процессе мониторинга состояния автомобильной дороги (рис. 4) отбирали образцы-керны цементогрунтов из конструкций дорожных одежд для определения их физико-механических характеристик (рис. 5). Установлено, что изменение предела прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов можно описать уравнением (1) полиномиальной функции второго порядка.

$$R_{сж}(KM) = -0,2007x^2 + 1,1673x + 3,918 \quad (1)$$

где:  $R_{сж}(KM)$  – предел прочности на сжатие, МПа;  $x$  – год наблюдения.

Выявлено, что за период эксплуатации в первые два года продолжается набор прочности цементогрунтов и предел прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов повышается на 17 %. В последующий период эксплуатации наблюдается снижение показателя на 16,6 %. Предел прочности на сжатие цементогрунтов без модификации возрастает на 20,5 % и снижается 25,6 % соответственно. Предел прочности на растяжение при изгибе повышается на 36,3 % у комплексно-модифицированных цементогрунтов и на 15,6 % у цементогрунтов без модификации и снижается на 15,1% и 28,4 %, соответственно. Установлено превышение предела прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов в сравнении с цементогрунтами без модификации на 20,7 – 26,7 %, пределов прочности на растяжение при изгибе на - 24,4 – 73,5 %, коэффициента морозостойкости на - 7,6 – 12,6 % за период эксплуатации.

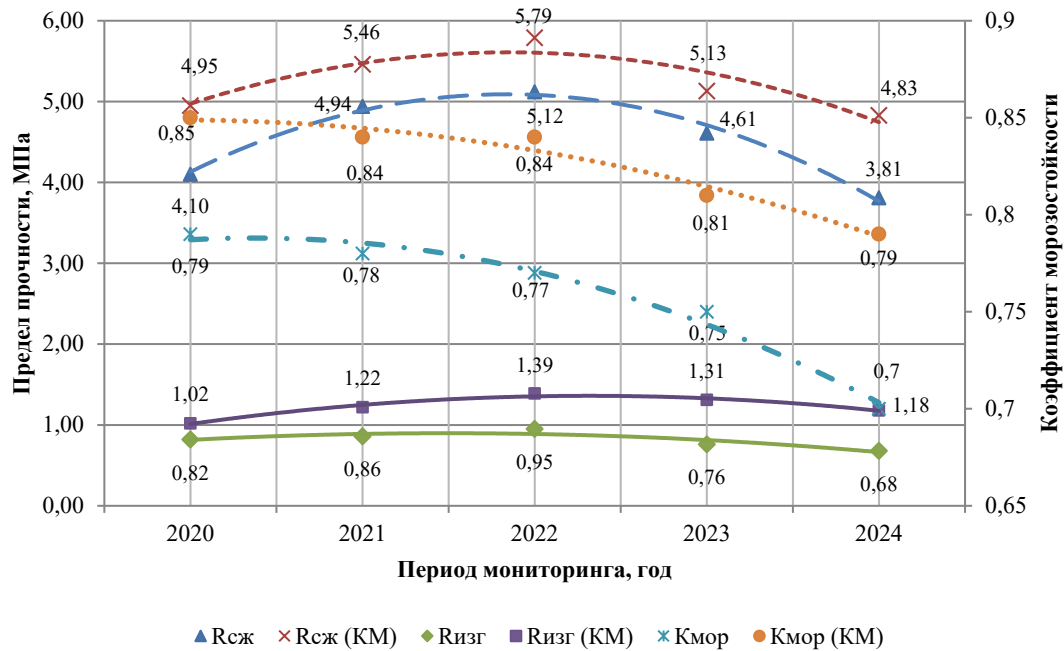


Рис.5. Изменение физико-механических показателей цементогрунтов из слоев оснований в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Rсж – предел прочности на сжатие цементогрунтов, МПа; Rсж (KM) – предел прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов, МПа; Ризг – предел прочности на растяжение при изгибе цементогрунтов, МПа; Ризг (KM) – предел прочности на растяжение при изгибе комплексно-модифицированных цементогрунтов, МПа; Кмор – коэффициент морозостойкости цементогрунтов; Кмор (KM) – коэффициент морозостойкости комплексно-модифицированных цементогрунтов.  
(иллюстрация авторов)

Fig.5. Change of physical and mechanical indicators of cement-soil from slab bases in the process of highway operation. Rсж - compressive strength of cement-soil, MPa; Rсж (KM) - compressive strength of complex-modified cement-soil, MPa; Ризг - tensile strength in bending of cement-soil, MPa; Ризг(KM) - tensile strength in bending of complex-modified cement-soil, MPa; Кмор - coefficient of frost resistance of cement-soil; Кмор (KM) - coefficient of frost resistance of complex-modified cement-soil (illustration by the authors)

Проведены исследования модулей упругости дорожных одежд с основаниями из цементогрунтов (рис 6). Повышение модуля упругости на участке дорожной одежды с основанием из комплексно-модифицированных цементогрунтов составило 5,1 % за первые два года эксплуатации, что возможно связано с повышением физико-механических показателей цементогрунтов. В следующий период отмечено незначительное снижение модуля упругости на 2,1 %. На участке без модификации установлено первичное повышение на 4,2 % и снижение показателя на 5,1% к концу периода мониторинга. Выявлено, что модули упругости на участке с комплексно-модифицированными цементогрунтами превышает модуль упругости дорожной одежды с основанием из цементогрунтов без модификации на 4,8 – 9,1 % в процессе эксплуатации автомобильной дороги.



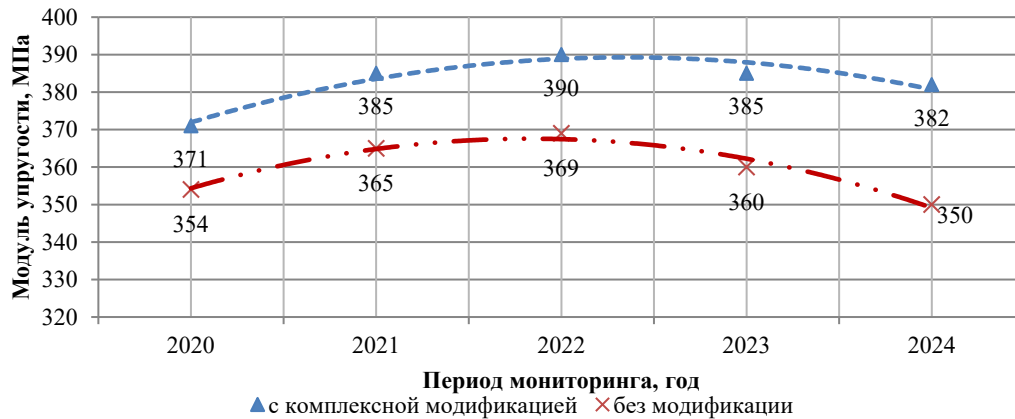


Рис.6. Изменение модуля упругости дорожных одежд с основаниями из цементогрунтов в процессе эксплуатации автомобильной дороги. (иллюстрация авторов)

Fig.6. Changes in the modulus of elasticity of pavements with cement-soil base during highway operation. (illustration by the authors)

Анализ результатов исследования поперечной ровности (колейности) показал, что средняя скорость образования колеи на участке со слоем основания из комплексно-модифицированных цементогрунтов на 40% ниже, по сравнению с дорожной одеждой на основании из цементогрунтов без модификации (рис. 7).

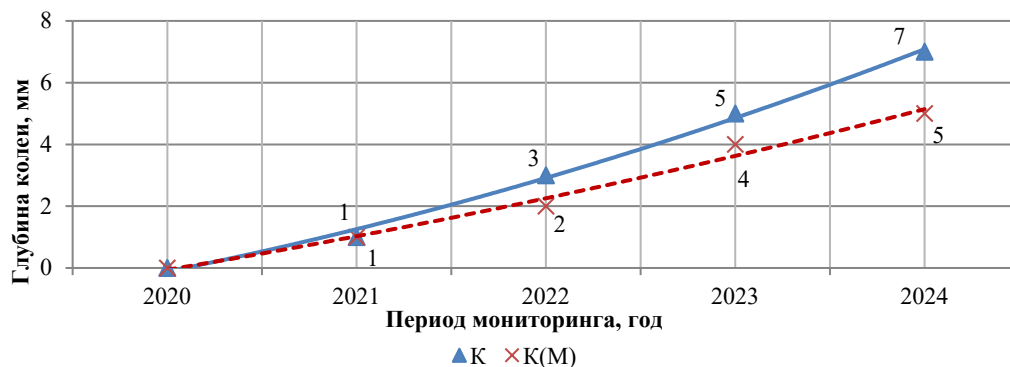


Рис.7. Изменение глубины колеи на участках мониторинга. Для участка с немодифицированным слоем основания: К – глубина колеи, мм. Для участка с комплексно-модифицированным слоем основания, К(М) – глубина колеи, мм. (иллюстрация авторов).

Fig.7. Changes in rut depth in the monitoring plots. For unmodified subgrade: К - rut depth, mm. For the section with complex-modified base course, К(М) - rut depth, mm. (illustration by the authors)

Полученные результаты исследований согласуются с данными работ [20-22] и подтверждают необходимость комплексной модификации цементогрунтов в конструктивных слоях дорожных одежд для повышения их физико-механических показателей и сроков службы автомобильных дорог. Авторы [23] отмечают, что в начальный период эксплуатации, по аналогии с полученными результатами наших исследований, прочность и модуль упругости дорожной одежды с модифицированным цементогрунтовым слоем повышаются на сопоставимый уровень показателей по сравнению с цементогрунтовыми слоями без модификации. Это подтверждает эффективность применения комплексной модификации в технологии укрепления грунтов на основе использования наполнителей различной степени дисперсности, природы и активности.

#### 4. Заключение

1. Определены физико-механические свойства исходных материалов для цементогрунтовых слоев дорожных одежд, по результатам которого установлено, что грунт для устройства основания относится к супеси песчанистой с оптимальной

влажностью 12,45% и максимальной плотностью 1,95 г/см<sup>3</sup>, асфальтогранулят - к гранулометрической добавке с максимальной крупностью частиц 40 мм и остаточной прочностью щебня М 800. Подобраны оптимальные составы цементогрунтовых смесей: содержание портландцемента – 7% от массы грунта, асфальтогранулят – 20% от массы грунта, активированного наполнителя – 3 % от массы грунта (на участке с комплексной модификацией).

2. На основе теоретических и лабораторных исследований проведено конструирование двух дорожных одежд, разработана технология работ по их строительству с основаниями из комплексно-модифицированных цементогрунтов и без модификации методом «смешения на дороге». Осуществлено опытно-промышленное внедрение экспериментальных участков автомобильной дороги с двумя вариантами дорожных одежд.

3. Выполнен сравнительный мониторинг состояния участков автомобильных дорог с основаниями дорожных одежд из комплексно-модифицированных и не модифицированных цементогрунтов. Установлено повышение предела прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов в конструкциях по сравнению с цементогрунтами без модификации на 20,7 – 26,7 %, пределов прочности на растяжение при изгибе на 24,4 – 73,5 %, коэффициента морозостойкости на 7,6 – 9,7 % за период эксплуатации дороги. Выявлено, что изменение предела прочности на сжатие комплексно-модифицированных цементогрунтов можно описать уравнением полиномиальной функции второго порядка.

4. Результаты исследований подтверждают положительное влияние комплексной модификации цементогрунтов активированными наполнителями на физико-механические свойства цементогрунтовых материалов дорожных одежд и эксплуатационные показатели автомобильной дороги, а также установлении новых возможностей увеличения межремонтных сроков дорожных одежд и расширении области статистических данных эксплуатационных показателей дорожных одежд с основаниями из цементогрунтов. Выявлено, что в процессе эксплуатации автомобильной дороги модули упругости на участке с комплексно-модифицированными цементогрунтами превышает модуль упругости дорожной одежды с основанием из цементогрунтов без модификации на 4,8 – 9,1 %. Средняя скорость образования колеи на участке со слоем основания из комплексно-модифицированных цементогрунтов на 40% ниже, по сравнению с дорожной одеждой на основании из цементогрунтов без модификации.

#### Список литературы/ References

1. 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. – EDN NJUONP. [Korochkin, A.V. Design and construction of road surfaces using cement grounders / transport: science, technology, management. Scientific information collection. – 2021. – No. 9. – pp. 69-72. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-13. – EDN NJUONP.]
2. 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. – EDN FJBZIH.
3. Добрынин А. О., Бургонутдинов А. М., Клевко В. И., Тимофеев В. А. Использование цементогрунта в конструкциях оснований дорожных одежд лесных дорог // Инновационные научные исследования. – 2023. – № 3-1(27). – С. 67-73. – DOI 10.5281/zenodo.7810491. – EDN JODPWK [Dobrynin A. O., Burgonutdinov A.M., Kleveko V. I., Timofeev V. A. The use of cement grunt in the structures of the foundations of road coverings of forest roads // Innovative scientific research. – 2023. – № 3-1(27). – Pp. 67-73. – DOI 10.5281/zenodo.7810491. – EDN JODPWK.]
4. Чудинов С. А., Морозов С.М. К вопросу повышения эффективности структурообразования цементогрунтов для устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Архитектурно-строительный и дорожно-

- транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Омск, 23–24 ноября 2023 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 498-501. – EDN EANFHE. [Chudinov S. A., Morozov S.M. On the issue of increasing the efficiency of the structure formation of cement soils for the construction of road coverings of logging roads // Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations : A collection of materials of the VIII International Scientific and Practical Conference, Omsk, November 23-24, 2023. Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 2023. – pp. 498-501. – EDN EANFHE.]
5. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Баранов В.А., Хайбуллин И.И. Влияние поликарбоксилатного пластификатора на физико-механические характеристики цементогрунта // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 1 (1). С. 4-8. [Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F., Baranov V.A., Khaibullin I.I. The influence of polycarboxylate plasticizer on the physical and mechanical characteristics of soil-cement // Roads and transport infrastructure. 2023. № 1 (1). P. 4-8]
  6. Xuquan Huang, Ziyao Shi, Zaiqian Wang, Jiangfeng Dong, Xiaoshu Wang, Xiaorong Zhao, Microstructure and performances of sludge soil stabilized by fluorogypsum-based cementitious binder, Construction and Building Materials, Volume 325, 2022, 126702, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126702>.
  7. Shuvaev A. N., Panova M.V. Improving the efficiency of reinforced soil when Constructing road transport facilities // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 7. – P. 507-512. – EDN YBQBPV.
  8. Fengchi Wang, Xiaowei Ping, Jinghai Zhou, Tianbei Kang, Effects of crumb rubber on the frost resistance of cement-soil, Construction and Building Materials, Volume 223, 2019, Pages 120-132, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.208>.
  9. Jun Chen, Cheng Zhao, Quan Liu, Xijun Shi, Zhenhao Sun, Investigation on frost heaving stress (FHS) of porous cement concrete exposed to freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, Volume 205, 2023, 103694, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103694>.
  10. Zhuo Wang, Zhichen Liu, Feng Zeng, Kun He, Shuaicheng Guo, Review on frost resistance and anti-clogging of pervious concrete, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 11, Issue 3, 2024, Pages 481-496, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.05.008>
  11. Yu Zhao, Yang Li, Chaolin Wang, Kaixi Xue, Guofang Chen, Pengfei Liu, Road performance of ordinary Portland cement improvement of strongly weathered phyllite filler, Construction and Building Materials, Volume 350, 2022, 128801, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128801>.
  12. Hua Yu, Priyanka Joshi, Chooikim Lau, Kam Ng, Novel application of sustainable coal derived char in cement soil stabilization, Construction and Building Materials, Volume 414, 2024, 134960, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134960>.
  13. Sadegh Ghavami, Hamed Naseri, Hamid Jahanbakhsh, Fereidoon Moghadas Nejad, The impacts of nano-SiO<sub>2</sub> and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement free stabilizer, Construction and Building Materials, Volume 285, 2021, 122918, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122918>.
  14. Bulanov P. E., Ermilova E. Y., Rakhimov R. Z., Stoyanov O. V. Structure and Mineral Composition of Soil Cement Based on Kaolinite Clay Modified with a Complex Hydrophobic–Plasticizer Additive Based on Polycarboxylate Ether and Octyltriethoxysilane // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 4. – P. 447-452. – DOI 10.1134/S199542122004005X. – EDN WLJTPR.
  15. Fang, K., Zhao, J., Wang, D., Wang, H. and Dong, Z. (2022) Use of Ladle Furnace Slag as Supplementary Cementitious Material before and after Modification by Rapid Air Cooling: A Comparative Study of Influence on the Properties of Blended Cement Paste.

- Construction and Building Materials, 314, 125434.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125434>.
16. Lilyanne Rocha Garcez, Carlos Eduardo Tino Balestra, Nathalie Barbosa Reis Monteiro, João de Almeida Melo Filho, Miguel Angel Ramirez Gil, Mechanical strength and Life Cycle Assessment (LCA) of soil-cement: comparison between mixtures of soil with ASTM type III cement, LC3, and the incorporation of by products and agroindustrial residues, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134331, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134331>.
  17. Debby Marcelia Andryanti, Tam Minh Phan, Dong-Wook Lee, Dae-Wook Park, Impact of cement content in cement bound materials on the reflection cracking performance of asphalt pavements, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e03229, ISSN 2214 5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03229>.
  18. Vdovin, E. A., Konovalov N.V. Activated mineral fillers for the modification of cement composites // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – No. 7(105). – P. 10511. – DOI 10.4123/CUBS.105.11. – EDN HMECOH.
  19. Yongqiang Hou, Ke Yang, Shenghua Yin, Xin Yu, Leiming Wang, Xiaobing Yang, Enhancing the physical properties of cemented ultrafine tailings backfill (CUTB) with fiber and rice husk ash: Performance, mechanisms, and optimization, Journal of Materials Research and Technology, Volume 29, 2024, Pages 4418-4432, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.068>
  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. – EDN FJBZIH.
  21. Emmanuel Mengue, Hussein Mroueh, Laurent Lancelot, Robert Medjo Eko, Design and parametric study of a pavement foundation layer made of cement-treated fine-grained lateritic soil, Soils and Foundations, Volume 58, Issue 3, 2018, Pages 666-677, ISSN 0038-0806, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.025>.
  22. Jian Yang, Xiaoli Li, Hui Wang, Kaiqiang Geng, A Study of the Structural Evolution and Strength Damage Mechanisms of Pisha-Sandstone Cement Soil Modified with Fly Ash, Journal of Renewable Materials, Volume 9, Issue 12, 2021, Pages 2241-2260, ISSN 2164-6325, <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015565>.
  23. Чудинов, С. А. Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги // Resources and Technology. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 1-14. – DOI 10.15393/j2.art.2024.7443. – EDN GRNQNK. [Chudinov, S. A. Investigation of the possibility of using cyber soil in road conditions of a logging highway / S. A. Chudinov // Resources and Technologies. – 2024. – vol. 21, No. 2. – pp. 1-14. – DOI 10.15393/j2.art.2024.7443. – ELECTRONIC number GRNQNK.]

#### Информация об авторах

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

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru), ORCID: 0000-0002-0649-4342

**Коновалов Никита Витальевич**, ст. преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: [konovalov@kgasu.ru](mailto:konovalov@kgasu.ru), ORCID: 0000-0001-6091-4355

#### Information about the authors

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

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru), ORCID: 0000-0002-0649-4342

**Nikita V. Konovalov**, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: [konovalov@kgasu.ru](mailto:konovalov@kgasu.ru), ORCID: 0000-0001-6091-4355