

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-84-93  
УДК 624.138  
EDN: YEETVW

Научная статья / Research article

## Результаты лабораторных исследований укрепления грунта земляного полотна с помощью модификатора

Р.М. Худайкулов , Д.Э. Аралов  

Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

 dilshod.aralov.96@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 6 октября 2023 г.  
Доработана: 12 января 2024 г.  
Принята к публикации: 16 января 2024 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Актуальные современные тенденции в дорожном строительстве — это и увеличение интенсивности движения, и грузоподъемности автомобильного транспорта, а также расширение сети дорог, в том числе и местных, выдвигают задачу не только повышения долговечности дорожных конструкций, но и применения при строительстве автомобильных дорог местных материалов и грунтов. Для укрепления грунтов основания дорог разработано несколько методов. Также производится множество поверхностно-активных веществ, модификаторов и добавок для укрепления земляного полотна. Многие из них не показали свою эффективность на практике. Поэтому существует необходимость проведения множества лабораторных и полевых исследований по этой теме. Для изучения влияния модификатора на грунт дорожного полотна проведены лабораторные исследования. Определяли тип грунта и его максимальную плотность при оптимальной влажности. На основании этого в состав грунта вводился цемент и модификатор, определялись показатели плотности и прочности на сжатие. Получены результаты сканирующего электронного микроскопа для изучения влияния модификатора на грунт земляного полотна. Лабораторные исследования и СЭМ-анализа показали, что добавление модификатора на грунт приводит к увеличению его максимальной плотности, значительному увеличению прочности на сжатие и что модификатор служит для улучшения свойств связывания, образуя кристаллическую связь с цементом.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, грунт, прочность, максимальная плотность, портландцемент, модификатор, Акропол ГСМ, СЭМ-анализ

### Для цитирования

Худайкулов Р.М., Аралов Д.Э. Результаты лабораторных исследований укрепления грунта земляного полотна с помощью модификатора // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 1. С. 84–93. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-84-93>

Худайкулов Рашидбек Мансуржонович, PhD., профессор кафедры изыскания и проектирование автомобильных дорог, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан; ORCID: 0009-0008-0133-2361; E-mail: Rashidbek\_19\_87@mail.ru

Аралов Дилшод Эргаш угли, аспирант кафедры изыскания и проектирование автомобильных дорог, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан; ORCID: 0009-0003-1707-1788; E-mail: dilshod.aralov.96@mail.ru

© Худайкулов Р.М., Аралов Д.Э., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

# Results of Laboratory Studies of Strengthening Subgrade Soil with Modifier

Rashidbek M. Hudaykulov<sup>ID</sup>, Dilshod E. Aralov<sup>ID</sup>✉

Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

✉ dilshod.aralov.96@mail.ru

## Article history

Received: October 6, 2023

Revised: January 12, 2024

Accepted: January 16, 2024

## Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

## Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** Current modern trends in road construction are the increase in traffic intensity and the carrying capacity of motor transport, as well as the expansion of the road network, including local roads. These trends put forward the task of not only increasing the durability of road structures, but also the use of local materials and soils in the construction of highways. Several methods have been developed to strengthen the soils of the road base. A variety of surfactants, modifiers and additives are also produced to strengthen the roadbed. Many of them have not shown their effectiveness in practice. Therefore, there is a need for plenty laboratory and field studies on this topic. Laboratory studies were carried out to investigate the effect of the modifier on the roadbed soil. The type of soil and its maximum density were determined at optimal humidity. Based on this, cement and a modifier were introduced into the soil composition, density and compressive strength were determined. The results of a scanning electron microscope (SEM) were obtained to study the effect of the modifier on the roadbed soil. Laboratory studies and SEM-analysis have shown that the addition of a modifier to the soil leads to an increase in its maximum density, a significant increase in compressive strength and that the modifier serves to improve the binding properties by forming a crystalline bond with cement.

**Keywords:** highway, soil, strength, maximum density, Portland cement, modifier, Akropol GSM, SEM analysis

## For citation

Hudaykulov R.M., Aralov D.E. Results of laboratory studies of strengthening subgrade soil with modifier. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(1):84–93. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-84-93>

## 1. Введение

В настоящее время в результате увеличения количества большегрузных автомобилей увеличиваются и нагрузки на автомобильные дороги. В результате до истечения срока службы автомобильных дорог возникают различные деформации. Кроме того, дефицит сырья, используемого для основания дороги, и транспортные затраты на транспортировку материалов приводят к увеличению общей стоимости дорожного строительства [1–4]. Поэтому в местах, где наблюдается дефицит местных каменных материалов, актуальным является вопрос использования грунта, армированного вяжущими материалами. В качестве технического решения с целью повышения прочности местных грунтов рассматривается проведение стабилизирующих работ путем внесения в грунт земляного полотна дороги различных добавок и модификаторов [5–9]. Как показали результаты многолетних исследований дорожных институтов, а также практический опыт проектирования и строительства денежные и материальные затраты могут быть значительно снижены, если для устройства дорожных одежд вместо каменных материалов применять местные грунты [10–12].

В настоящее время широко используются органические вяжущие для укрепления грунтов, но в связи с удорожанием нефти и нефтепродуктов, а также трудностями разработки нефти в Узбекистане, использование органических вяжущих как основных веществ для укрепления грунтов становится невыгодным. В современных условиях настоятельно необходимы новые эффективные технологии и более дешевые материалы, обеспечивающие высокое качество дорожных работ, новые методы улучшения грунтов.

*Rashidbek M. Hudaykulov*, PhD, professor, Department of Research and Design of Automobile Roads, Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan; ORCID: 0009-0008-0133-2361; E-mail: Rashidbek\_19\_87@mail.ru

*Dilshod E. Aralov*, PhD student, Department of Research and Design of Automobile Roads, Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan; ORCID: 0009-0003-1707-1788; E-mail: dilshod.aralov.96@mail.ru

## 2. Методы и материалы

В ходе исследовательских работ грунт был взят с территории города Ташкента. Для определения типа грунта в лабораторных условиях по межгосударственному стандарту ГОСТ 25100-2011<sup>1</sup> сначала определяли его влажность в пределах текучести и набухания (табл. 1), а на основании этого определяли число пластичности.

Таблица 1 / Table 1

Показатели грунта в зависимости от влажности / Soil indicators depending on humidity

Влажность на границе текучести / Humidity at the yield point			Влажность на границе раскатывания / Humidity at the rolling limit		
Масса увлажненного грунта, г / Mass of moistened soil, g	Масса сухого, г / Weight of dry soil, g	Влажность, $W_T$ % / Humidity, $W_T$ %	Масса увлажненного грунта, г / Mass of moistened soil, g	Масса сухого, г / Weight of dry soil, g	Влажность, $W_p$ % / Humidity, $W_p$ %
126,3	103,2	22,3	28,0	24,0	16,6

Число пластичности:  $I_p = W_T - W_p = 5,7$

Затем определяли зернистость грунта по межгосударственному стандарту ГОСТ 12536-2014<sup>2</sup>.

Таблица 2 / Table 2

Содержание фракций грунта / Content of soil fractions

Наименование грунта / Soil name	Содержание фракций грунта, %, размеры, мм / Content of soil fractions, %, dimensions, mm								
	Более 10 / More than 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	Менее 0,05 / Less than 0.05
Супесь пылеватая / Silt sandy loam	–	–	0,23	0,34	1,35	2,52	3,31	4,42	87,83

Установлено, что тип грунта, использованный в лабораторных условиях, — супесь пылеватая.

После этого определяли максимальную плотность грунта при оптимальной влажности по межгосударственному стандарту ГОСТ 22733-2016<sup>3</sup>.

При определении максимальной плотности грунта исходная влажность составляла 6 %, а затем для испытаний была увеличена до 3 %. Полученные результаты представлены в табл. 3.

На основе приведенной таблицы был составлен график максимальной плотности грунта при оптимальной влажности (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при влажности  $W = 14$  % имеет максимальную плотность  $\rho = 1,83$  г/см<sup>3</sup>.

В настоящее время разработано много поверхностно-активных веществ (модификаторов) для использования на автомобильных дорогах развитых стран, многие из которых также не дали эффекта на практике. По этой причине были проведены экспериментальные испытания в лабораторных условиях применения модификатора Акропол ГСМ [13, 14], разработанного зарубежными странами и широко используемого на практике, на земляном полотне.

<sup>1</sup> ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2018. 45 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

Плотности испытуемого грунта / Densities of the tested soil

№	Масса увлажненного грунта, г / Mass of moistened soil, g	Плотность увлажненного грунта, г/см <sup>3</sup> / Density of moistened soil, g/cm <sup>3</sup>	Бюкс-1 масса увлажненного грунта, г / Cup-1 mass of moistened soil, g	Бюкс-2 масса сухого грунта, г / Cup-2 mass of dry soil, g	Влажность, W, % / Humidity, W, %	Плотность грунта в сухом состоянии, г/см <sup>3</sup> / Dry soil density, g/cm <sup>3</sup>
1	1738	1,74	46	43	6,97	1,62
2	1878	1,88	56	51	9,80	1,71
3	2022	2,02	50	45	11,11	1,82
4	2102	2,10	55	48	14,58	1,83
5	2080	2,08	65	56	16,07	1,79
6	2022	2,02	55	46	19,56	1,69

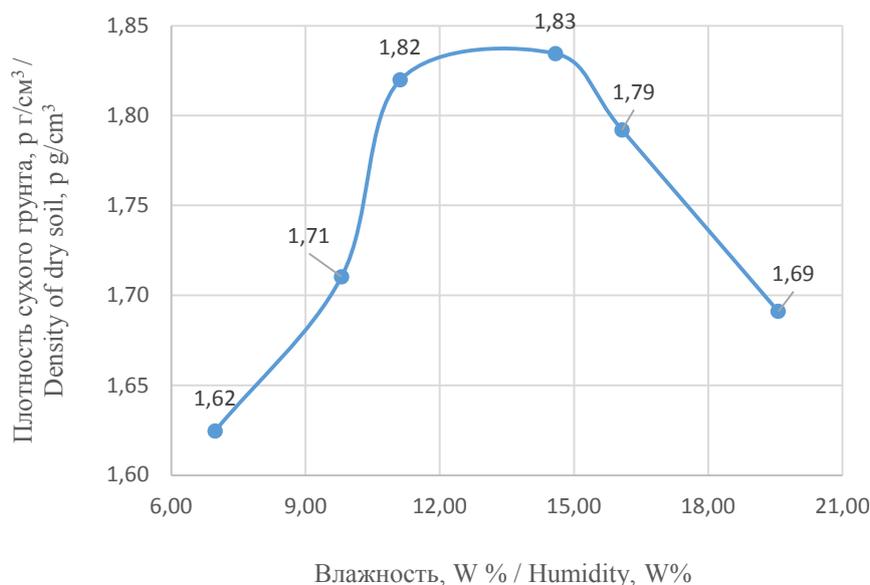


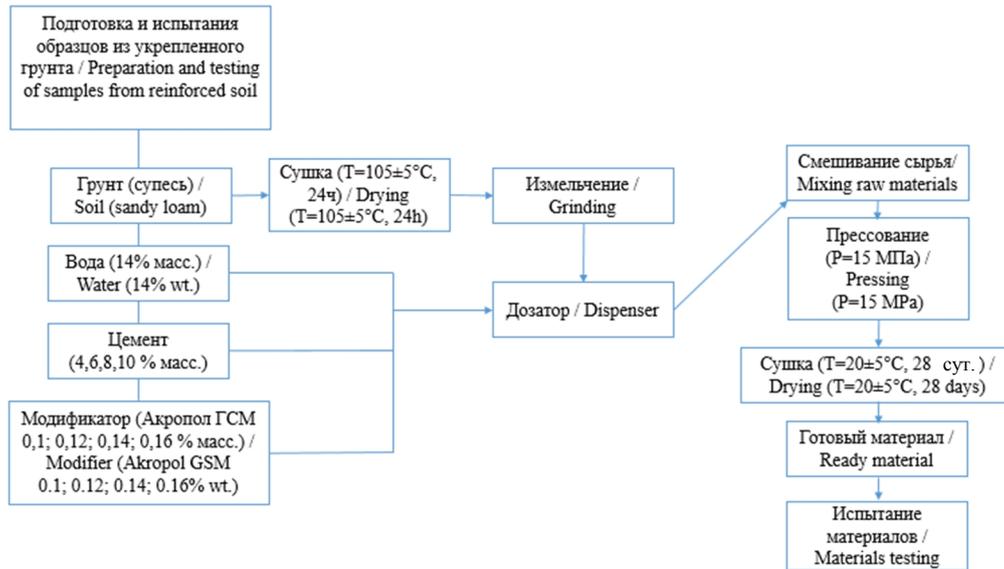
Рис. 1. График максимальной плотности грунта при оптимальной влажности

Источник: выполнено авторами

Figure 1. Graph of maximum soil density at optimal humidity

Source: made by the authors

Образцы подготовили для проведения исследовательских работ с использованием модификатора. Изготовление образцов выполняли по межгосударственному стандарту ГОСТ 23558-94<sup>4</sup>, аналогично схеме, показанной на рис. 2. Были получены образцы портландцемента марки М400 грунта в количестве 4, 6, 8 и 10 %, модификатора Акропол ГСМ в количестве 0,10, 0,12, 0,14, 0,16 % по отношению к полной массе, а также с помощью пресса, смешанного с водой в количестве 14 % для достижения оптимальной влажности. Портландцемент является одним из самых распространенных универсальных и дешевых минеральных вяжущих, применяемых для укрепления грунтов.



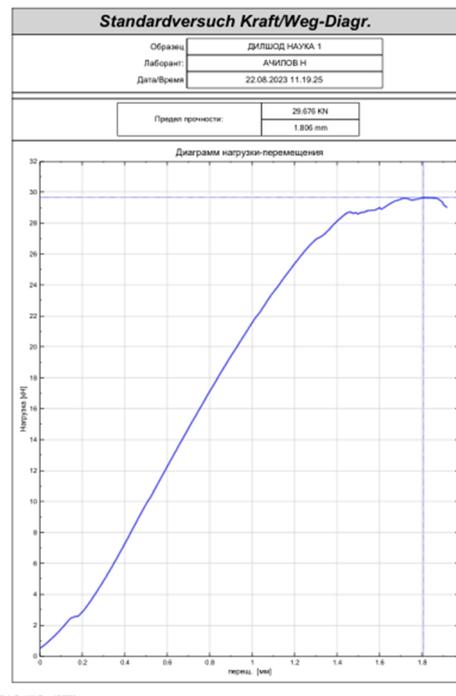
**Рис. 2.** Технологическая схема подготовки и испытания образцов армированного грунта  
 Источник: выполнено авторами

**Figure 2.** Technological scheme for the preparation and testing of reinforced soil samples  
 Source: made by the authors

### 3. Результаты и обсуждение

Образцы сушили в течение 28 суток и определяли максимальные плотности (табл. 4).

Готовые образцы проверяли на прочность на сжатие с помощью современного пресса Universal Test Machine. Результаты отображаются на компьютерном графике (рис. 3).



**Рис. 3.** Результаты, полученные в графической форме от пресса Universal Test Machine  
 Источник: выполнено авторами

**Figure 3.** Results obtained in graphical form from the Universal Test Machine  
 Source: made by the authors

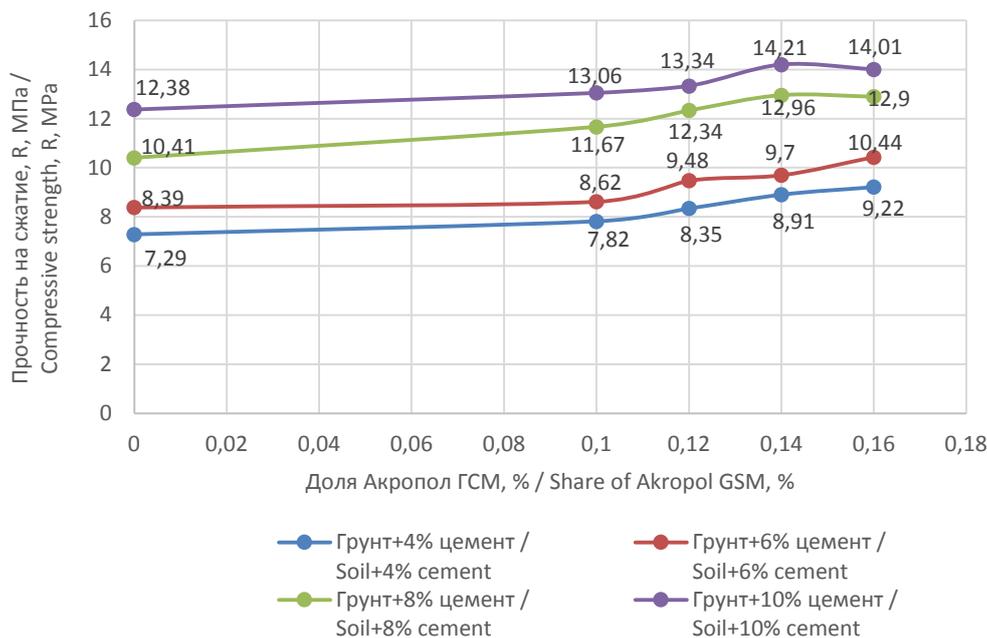
## Показатели плотности испытываемого грунта

Материал	Акропол GSM — 0 %		Акропол GSM — 0,10 %		Акропол GSM — 0,12 %		Акропол GSM — 0,14 %		Акропол GSM — 0,16 %	
	Плотность во влажном состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность во влажном состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность во влажном состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность во влажном состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность во влажном состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Грунт	2,08	1,86	—	—	—	—	—	—	—	—
Грунт + 4 % цемент	2,10	1,88	2,10	1,89	2,11	1,90	2,12	1,90	2,10	1,88
Грунт + 6 % цемент	2,10	1,88	2,10	1,88	2,10	1,89	2,12	1,90	2,11	1,89
Грунт + 8 % цемент	2,11	1,89	2,11	1,90	2,12	1,91	2,11	1,89	2,12	1,90
Грунт + 10 % цемент	2,11	1,89	2,10	1,89	2,11	1,90	2,12	1,90	2,12	1,91

## Density indicators of the tested soil

Material	Akropol GSM — 0 %		Akropol GSM — 0,10 %		Akropol GSM — 0,12 %		Akropol GSM — 0,14 %		Akropol GSM — 0,16 %	
	Density in wet state, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Dry density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Density in wet state, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Dry density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Density in wet state, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Dry density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Density in wet state, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Dry density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Density in wet state, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Dry density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>
Soil	2.08	1.86	—	—	—	—	—	—	—	—
Soil + 4 % cement	2.10	1.88	2.10	1.89	2.11	1.90	2.12	1.90	2.10	1.88
Soil + 6 % cement	2.10	1.88	2.10	1.88	2.10	1.89	2.12	1.90	2.11	1.89
Soil + 8 % cement	2.11	1.89	2.11	1.90	2.12	1.91	2.11	1.89	2.12	1.90
Soil + 10 % cement	2.11	1.89	2.10	1.89	2.11	1.90	2.12	1.90	2.12	1.91

По результатам исследования показатель прочности грунта на сжатие в сухом состоянии составил 3,6 МПа. Показатели при добавлении в него цемента и модификатора изображены на графике (рис. 4).



**Рис. 4.** График изменения прочности при сжатии с добавлением модификатора к укрепленному грунту  
Источник: выполнено авторами

**Figure 4.** Graph of changes in compressive strength with the addition of a modifier to reinforced soil  
Source: made by the authors

Проведенные лабораторные исследования показали, что добавление цемента и модификатора в грунт значительно увеличивает прочность грунта на сжатие. Согласно данным, например, прочность на сжатие при добавлении в грунт 8 % цемента составила 10,41 МПа, тогда как Акропол ГСМ показал более высокий результат при добавлении 0,14 %, то есть 12,96 МПа. Это указывает на увеличение консистенции на 24 %. Аналогичным образом, в то время как прочность на сжатие составляла 12,38 МПа при добавлении в грунт 10 % цемента, Акропол ГСМ показал более высокий результат при добавлении 0,14 %, что составляет 14,21 МПа. Это указывает на увеличение консистенции на 15 %. Мы видим, что те же показатели также увеличиваются при добавлении 4 и 6 % цемента.

Грунт и укрепленный грунт изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), который сканирует структурное состояние образцов.

С помощью СЭМ изучаются структурные изменения грунтов, а также содержащиеся в них химические элементы. Многие ученые проводят исследования и разработки в области СЭМ-анализа [15–20].

С помощью СЭМ образцы фотографировали на расстоянии 10  $\mu\text{m}$  (увеличение  $\times 2000$ ) и сравнивали. Результаты изменения показаны на фотографиях и в табл. 5.

Результаты СЭМ-анализа показали, что, хотя заполнители грунта стояли в рассеянном состоянии на изображении, на котором был отсканирован сам грунт, при добавлении цемента они выглядели в сколотом состоянии. Под действием цемента и модификатора мы можем увидеть кристаллические связи и скалообразное состояние вокруг заполнителя грунта. Из табл. 5 можно сделать вывод, что кристаллические связи служат для увеличения максимальной плотности и упругости грунта, увеличивая его прочность.

#### 4. Заключение

1. Лабораторные исследования и СЭМ-анализа показали, что добавление модификатора на грунт приводит к увеличению его максимальной плотности, значительному увеличению прочности на сжатие и что модификатор служит для улучшения свойств связывания, образуя кристаллическую связь с цементом.

Фотографии анализа СЭМ / Photos of SEM analysis

Материал / Material	Изображение сделано СЭМ / Image taken by SEM	Химические элементы в образцах, полученных методом СЭМ / Chemical elements in samples obtained by SEM
Грунт / Soil		

## Список литературы

1. Худайкулов Р.М., Салимова Б.Д., Аралов Д.Э. Стабилизатор грунта // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2022. С. 26–28.
2. Махмудова Д.А. Исследование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог // Universum: Технические науки. 2021. № 5–2 (86). С. 83–86. EDN: ZOZDSM
3. Махмудова Д.А. Результаты исследования влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2016. № 1 (51). С. 103–106. EDN VURNYJ
4. Hudaykuov R.M., Salimova B.D., Aralov D.E. Avtomobil yo'llarining yo'l poyi gruntlarini mustahkamlashda innovatsion materiallarni qo'llashning samaradorligi // Texnika va texnologiyalar rivojining istiqbollari: muammolar va yechimlar mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferentsiya (1-To'plam). 2023. Vol. 1. No. 1.
5. Худайкулов Р.М., Мирзаев Т.Л. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 1. <https://doi.org/10.15862/14SAT5119>
6. Егоров Г.В., Андреева А.В., Буренина О.Н. Укрепление местных грунтов стабилизатором при строительстве автомобильных дорог в условиях Севера // Вестник Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 4. С. 41–45. EDN: RURDCP
7. Брехман А.И., Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Модификация укрепленных грунтов при строительстве сельских автомобильных дорог // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2 (14). С. 313–318. EDN: NUHSYN
8. John R. Bowman P.E. Efficacy of road bond end condor as soil stabilizers // Final Report ~ Fhwa-Ok-13-06. University of Oklahoma, 2013. No. 2242. 110 p. URL: <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/31441> (дата обращения: 11.09.2023).
9. Чудинов С.А. Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой // Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 5. С. 163–163. EDN: SZVKCD
10. Nigitha D., Prabhanjan N. Efficiency of cement and lime in stabilizing the black cotton soil // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 68. Part 5. P. 1588–1593. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.286>
11. Prusinski J.R., Bhattacharja S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils // Transportation Research Record. 1999. Vol. 1652. Issue 1. P. 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
12. Solihu H. Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review // Journal of Civil & Environmental Engineering. 2020. Vol. 10. No. 3. <https://doi.org/10.37421/jcde.2020.10.344>
13. Дмитриева Т.В., Куцына Н.П. Применение стабилизаторов в дорожном строительстве для укрепления грунтов Белгородской области // Наука и инновации в строительстве: сборник докладов Международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова), Белгород, 17 апреля 2018 года. Белгород. 2018. С. 356–361. EDN: VQZGKQ
14. Дмитриева Т.В., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Куцына Н.П. Эффективность стабилизаторов различного состава при укреплении грунтов минеральным вяжущим // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 1. С. 30–38. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>
15. Yuan B., Chen W., Zhao J., Yang F., Luo Q., Chen T. The Effect of Organic and Inorganic Modifiers on the Physical Properties of Granite Residual Soil // Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9542258>
16. Gupta D., Kumar A. Strength characterization of cement stabilized and fiber reinforced clay-pond ash mixes // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2016. Vol. 2. No. 4. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0069-z>
17. Kapogianni E., Sakellariou M., Laue J., Springman S. Investigation of the mechanical behaviour of the interface between soil and reinforcement, via experimental and numerical modelling // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 419–426. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.053>
18. Namjoo A.M., Jafari K., Toufigh V. Effect of particlesize of sand and surface properties of reinforcement on sand geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior // Transportation Geotechnics. 2020. Vol. 24. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100403>
19. Madhusudhan B.N., Baudet B.A., Ferreira P.M.V., Sammonds P. Performance of fiber reinforcement in completely decomposed granite // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2017. Vol. 143. No. 8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001716](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001716)
20. Čalkovský M.E.M. Material Contrast by Scanning Electron Microscopy and Low-Energy Scanning Transmission Electron Microscopy // Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.), Dissertation. 2022.

## References

1. Hudaykulov R.M., Salimova B.D., Aralov D.E. Soil stabilizer. *Road construction and its engineering support: proceedings of the III International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU, 2022:26–28. (In Russ.)
2. Makhmudova D.A. Study water-thermal regime of earth linen of automobile roads. *Universum: Technical Sciences*. 2021;5–2(86):83–86. (In Russ.) EDN: ZOZDSM
3. Makhmudova D.A. Results of a study of soil moisture in road subgrades. *Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after. N. Isanova*. 2016;1(51):103–106. (In Russ.) EDN VURNYJ
4. Hudaykulov R.M., Salimova B.D., Aralov D.E. Effectiveness of the use of innovative materials in the strengthening of highway subgrades. *International Scientific-Practical Conference on Technical and Technological Development Prospects: Problems and Solutions (Collection 1)*. 2023. Vol. 1, no. 1.
5. Hudaykulov R.M., Mirzayev T.L. The use of stabilizers to improve the strength of the soil foundation of roads. *Russian journal of transport engineering*. 2019;6(1). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/14SATS119>
6. Egorov G.V., Andreeva A.V., Burenina O.N. Improved soil with use of the stabilizer for roads building in conditions of the North. *Vestnik of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University*. 2013;10(4):41–45. (In Russ.) EDN: RURDCP
7. Brekhman A.I., Vdovin E.A., Mavliev L.F. Updating of staked priming coats at building of rural highways. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2010;2(14):313–318. (In Russ.) EDN: NUHSYH
8. John R. Bowman P.E. *Efficacy of road bond end condor as soil stabilizers*. Final Report ~ Fhwa-Ok-13-06. University of Oklahoma, 2013;2242. Available from: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/31441> (accessed: 11.09.2023).
9. Chudinov S.A. Increase productivity soil reinforcement of portland cement with a stabilizing additive. *Modern problems of science and education*. 2014;5:163–163. (In Russ.) EDN: SZVKCD
10. Nigitha D., Prabhanjan N. Efficiency of cement and lime in stabilizing the black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*. 2022;68(5):1588–1593. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.286>
11. Prusinski J.R., Bhattacharja S. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*. 1999;1652(1):215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
12. Solihu H. Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review. *Journal of Civil & Environmental Engineering*. 2020;10:3. <https://doi.org/10.37421/jcde.2020.10.344>
13. Dmitrieva T.V., Kutsyna N.P. Application of stabilizers in road construction to strengthen soils in the Belgorod region. *Science and innovation in construction: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference (on the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov)*, Belgorod, April 17, 2018. Belgorod. 2018:356–361. (In Russ.) EDN: VQZGKQ
14. Dmitrieva T.V., Markova I.Yu., Stokova V.V., Kutsyna N.P. Efficiency of stabilizers of various composition for strengthening the soil with a mineral binder. *Construction materials and products*. 2020;3(1):30–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>
15. Yuan B., Chen W., Zhao J., Yang F., Luo Q., Chen T. The Effect of Organic and Inorganic Modifiers on the Physical Properties of Granite Residual Soil. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022:9542258. <https://doi.org/10.1155/2022/9542258>
16. Gupta D., Kumar A. Strength characterization of cement stabilized and fiber reinforced clay-pond ash mixes. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2016;2:32. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0069-z>
17. Kapogianni E., Sakellariou M., Laue J., Springman S. Investigation of the mechanical behaviour of the interface between soil and reinforcement, via experimental and numerical modeling. *Procedia Engineering*. 2016;143:419–426. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.053>
18. Namjoo A.M., Jafari K., Toufigh V. Effect of particlesize of sand and surface properties of reinforcement on sand geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior. *Transportation Geotechnics*. 2020;24:100403. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100403>
19. Madhusudhan B.N., Baudet B.A., Ferreira P.M.V., Sammonds P. Performance of fiber reinforcement in completely decomposed granite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017;143(8):04017038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001716](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001716)
20. Čalkovský M.E.M. Material Contrast by Scanning Electron Microscopy and Low-Energy Scanning Transmission Electron Microscopy. *Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)*, Dissertation. 2022.