

EDN: AIZLDG

УДК 625.7, 691

**Е. А. ВДОВИН, П. Е. БУЛАНОВ, Д. Р. ВЫБОРНОВ**ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Российская Федерация, г. Казань

## **ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТОГРУНТОВ В СЛОЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД МОДИФИКАЦИЕЙ ПЛАСТИФИКАТОРОМ**

**Аннотация.** Для повышения межремонтных сроков автомобильных дорог и повышения эффективности дорожного строительства рекомендован способ пластификации цементогрунтов, как один из эффективных методов модификации в технологии укрепления грунтов для дорожных одежд. Исследовано влияние суперпластификатора на основе азотосодержащих конденсационных полимеров на физико-механические и расчетные характеристики суглинка легкого пылеватого, укрепленного портландцементом при различном его содержании. Установлено положительное влияние суперпластификатора и степень повышения пределов прочности на сжатие, прочности на растяжение при изгибе, коэффициентов морозостойкости и модулей упругости пластифицированных цементогрунтов. В зависимости от содержания портландцемента и области применения укрепленных грунтов в конструкциях дорожных одежд установлены оптимальные содержания суперпластификатора.

**Ключевые слова:** цементогрунты, модификация, пластификация, суперпластификатор, дорожная одежда, прочность, морозостойкость, модуль упругости.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В России и во всем мире наблюдается значительный рост строительства автомобильных дорог. Это связано с растущим спросом на мобильность и увеличением числа автотранспорта на дорогах [1]. Дороги не только обеспечивают связь между городами, регионами и странами, но и увеличивают мобильность населения, способствуют экономическому росту, развитию торговли, туризма и других сфер жизни. Кроме того, качественные автомобильные дороги способствуют повышению безопасности дорожного движения и сокращению времени перевозок [2, 3].

Тем не менее в современных реалиях при строительстве автомобильных дорог имеется ряд трудностей, одной из которых является дефицит прочных каменных материалов. Отсутствие прочного каменного материала, который в большом количестве необходим для устройства долговечного основания дорожной одежды, а также транспортировка его из других регионов приводит к значительному росту стоимости строительства [4]. В связи с этим актуальной задачей является поиск и разработка дорожно-строительных материалов, конструкций и технологий с применением материалов регионального месторождения, способных повысить экономическую эффективность дорожного строительства [5, 6].

Во всем мире, в том числе и на территории России одними из наиболее распространённых являются глинистые грунты, но их применение в конструктивных слоях дорожных одежд осложнено в связи с особенностями их физико-механических свойств [7–9]. Поэтому повышение свойств глинистых грунтов, укрепленных портландцементом, является одной из актуальных научных проблем, решение которой возможно усовершенствованием технологии укрепления грунтов методом физико-химической модификации цементогрунтов, в том числе пластификацией, обеспечивающей управление структурой и свойствами получаемого дорожно-строительного материала, а также способствующей увеличению межремонтных сроков дорожных одежд [10–12].



## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

По результатам анализа многочисленных отечественных и зарубежных исследований установлено, что наиболее эффективным методом для укрепления глинистых грунтов является применение портландцемента. Продукты гидратации цемента уменьшают количество макропор, заполняя пространство между грунтовыми агрегатами, что препятствует прониканию в поры материала воды и положительно влияет на его характеристики [13]. Применение грунтов, укрепленных портландцементом, в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог способствует улучшению водно-теплового режима земляного полотна и препятствует образованию колеиности [14, 15].

Для повышения физико-механических и расчетных свойств цементогрунтовых смесей, межремонтных сроков цементогрунтовых конструктивных слоев и снижения содержания вяжущих в материалах, могут эффективно применяться различные способы модификации в технологии укрепления грунтов. Наиболее целесообразно применение таких модификаторов, которые оказывают положительное влияние одновременно и на цемент, и на грунт. Перспективным направлением в модификации цементогрунтов является применение пластификации [16].

Пластификация основана на применении пластифицирующих модификаторов, относящиеся к гидрофильным ПАВ. Они представляют собой диспергаторы-стабилизаторы, образующие в результате адсорбции на поверхности раздела твердой и жидкой фаз структурированную пленку. В результате происходит высвобождение иммобилизованной во флокколах цемента воды, снижается коэффициент внутреннего трения цементно-водной суспензии, происходит сглаживание микрорельефа зерен гидратирующего цемента и увеличение электростатического отталкивания частиц за счет значительного изменения их электрокинетического потенциала. Помимо электростатического отталкивания большое значение имеет стерический эффект, так как в структуре молекул суперпластификатора имеются длинные боковые ответвления, которые обеспечивают диспергирование частиц цемента. Кроме того, при использовании пластифицирующих добавок, которые имеют более длинные боковые ответвления, отталкивание частиц происходит на большее расстояние, что обеспечивает более длительный пластифицирующий эффект при более низком содержании добавок, так как они лучше препятствуют сцеплению гидратированных частиц цемента [17].

По данным исследований [18, 19], имеется несколько предположений, описывающих процессы взаимодействия глинистых минералов с молекулами суперпластификатора. К ним относятся электростатическое взаимодействие между положительно заряженными базальными плоскостями глинистых минералов и функциональными группами полимера, имеющими отрицательный заряд, а также интеркаляция боковых цепей пластификатора с алюмосиликатными слоями глинистых минералов. Поэтому, повышение физико-механических свойств цементогрунтов способом пластификации связано не только с влиянием полимера на цементную составляющую материала, но и с более сложным взаимодействием пластификатора на частицы грунта.

Модификация цементогрунтов пластификацией изменяет свойства конечного продукта, что оказывает существенное влияние на изменение физико-механических и расчетных характеристик материала. Имеющиеся данные о расчетных параметрах аналогичных материалов, например, немодифицированных цементогрунтов не дают адекватного представления о реальных свойствах применяемого материала, что вызывает необходимость проведения испытаний по установлению соответствующих расчетных характеристик модифицированных цементогрунтов с целью обеспечения наиболее эффективного подбора конструктивных слоев дорожных одежд. Данная необходимость важна тем, что расчётные характеристики материалов позволяют спроектировать конструкцию дорожной одежды так, чтобы она была не только достаточно надежной и соответствовала предъявляемым к ней требованиям, но и выгодной с экономической точки зрения.

## ЦЕЛИ

Целью работы является исследование возможности повышения физико-механических и расчетных характеристик цементогрунтов в слоях дорожных одежд путем модификации их пластификатором на основе азотосодержащих конденсационных полимеров. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Установить влияние суперпластификатора на физико-механические свойства цементогрунтов;
2. Исследовать влияние суперпластификатора на модуль упругости цементогрунтов;
3. Определить оптимальное содержание суперпластификатора для исследуемых цементогрунтов с различным содержанием портландцемента в зависимости от области применения в конструкциях дорожных одежд.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

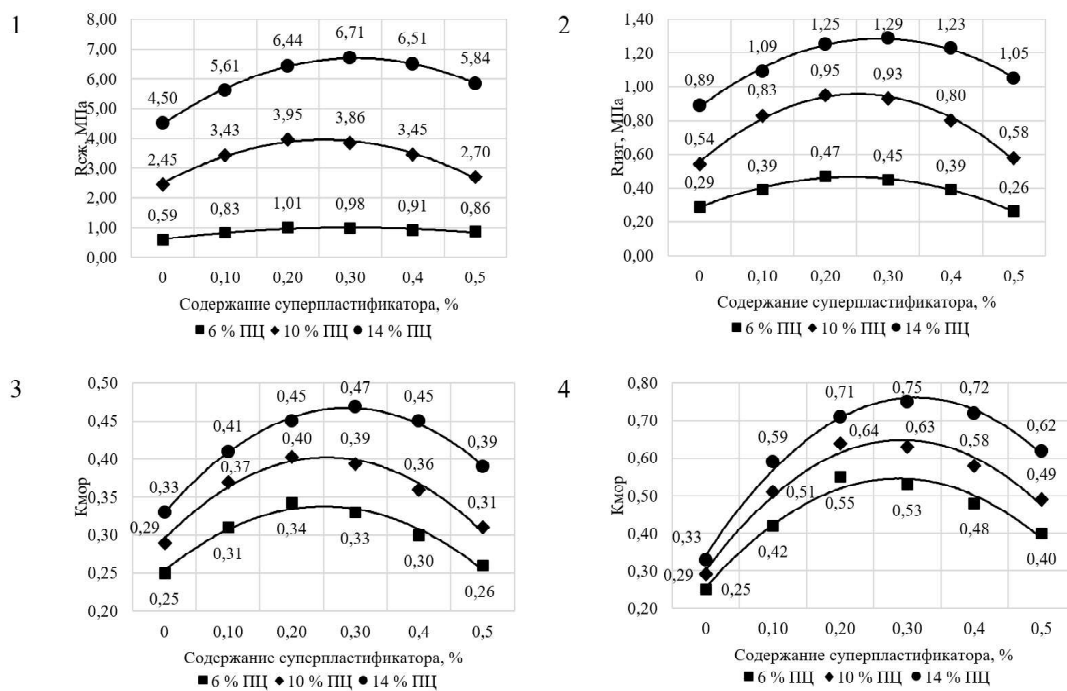
Для проведения исследований использовался суглинок легкий пылеватый с числом пластичности 0,11 и содержанием песчаных частиц в количестве 9 %. В качестве вяжущего применен портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, который вводился в количестве 6, 10, 14 %. Модификация цементогрунта осуществлялась суперпластификатором на основе азотосодержащих конденсационных полимеров. Суперпластификатор вводился в количестве 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 % от массы глинистого грунта.

В соответствии с ГОСТ 23558-94 исследованы физико-механические свойства цементогрунтов: предел прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ), предел прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) и коэффициент морозостойкости ( $K_{мор}$ ). Определение прочности проводилось после нормального твердения образцов в течении 28 суток и водонасыщения образцов в течении 2 суток. Для приготовления цементогрунтовых образцов вода вводилась в количестве, обеспечивающим оптимальную влажность материала. Коэффициент морозостойкости цементогрунтовых образцов определялся как отношение прочности водонасыщенного образца к прочности укрепленных грунтов после попеременного замораживания-оттаивания. Из расчетных характеристик конструктивных слоев дорожных одежд рассмотрен модуль упругости цементогрунтов. Призмечная прочность и модуль упругости цементогрунтов определялась по ГОСТ 24452.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведенного испытания установлены закономерности влияния портландцемента и суперпластификатора на физико-механические свойства цементогрунтов: предел прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ), предел прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) и коэффициент морозостойкости ( $K_{мор}$ ). Результаты испытаний (рис. 1) свидетельствуют об эффективности применения изучаемого суперпластификатора для достижения высоких показателей.

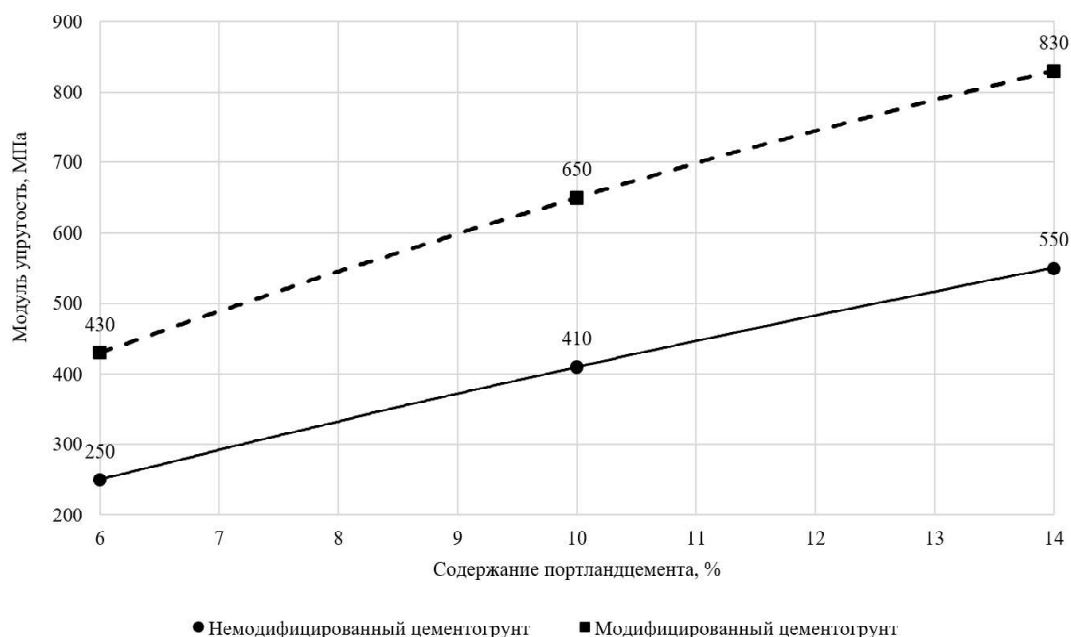
При введении в цементогрунт суперпластификатора в количестве 0,1...0,5 % и содержании портландцемента 6, 10 и 14 % увеличились следующие показатели: предел прочности на сжатие на 71, 61 и 49 %; предел прочности на растяжение при изгибе – на 62, 76 и 45 %; коэффициент морозостойкости для марки F15 – на 37, 39 и 42 %; коэффициент морозостойкости для марки F10 – на 37, 39 и 42 % соответственно. Для повышения морозостойкости цементогрунтов рекомендуется применение пластифицирующих модификаторов совместно с гидрофибирующими [20].



**Рисунок 1** – Зависимость физико-механических характеристик цементогрунтов от содержания суперпластификатора при различном содержании портландцемента: 1 – предел прочности на сжатие; 2 – предел прочности на растяжение при изгибе; 3 – коэффициент морозостойкости для F15; 4 – коэффициент морозостойкости для F10.

Оптимальное содержание суперпластификатора в цементогрунте составило: при 6 и 10 % портландцемента – 0,2 % суперпластификатора; при 14 % – 0,3 %. Марка по прочности М40 и морозостойкости F10 достигается при содержании портландцемента 14 % и суперпластификатора 0,3 %.

Увеличение прочности и плотности получаемого в результате модификации суперпластификатором материала свидетельствует также о повышении его сопротивления упругой деформации [21]. Так, по результатам испытаний образцов для определения модулей упругости (рис. 2) было экспериментально установлено, что модификация цементогрунтов суперпластификатором обеспечивает при содержании портландцемента 6 % повышение модуля упругости на 72 %; при 10 % – на 59 %; при 14 % – на 51 %.



**Рисунок 2** – Сравнительная зависимость модуля упругости цементогрунтов от содержания портландцемента.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что модификация цементогрунтов суперпластификаторами на основе азотосодержащих конденсационных полимеров способствует повышению физико-механических показателей: прочности на сжатие – на 49...71 %, прочности на растяжение при изгибе – на 45...62 %, морозостойкости на 37...42 %.
2. Модификация цементогрунтов суперпластификатором обеспечивает повышение модуля упругости цементогрунтов на 51...72 % по сравнению с немодифицированными цементогрунтами.
3. Определено оптимальное содержание модификатора для исследуемых цементогрунтов с различным содержанием портландцемента в зависимости от области применения в конструкциях дорожных одежд.
4. Для повышения морозостойкости цементогрунтов рекомендуется применение пластифицирующих модификаторов совместно с гидрофибирующими.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева, Н. А. Проблемы развития транспортной системы северо-западного федерального округа / Н. А. Лебедева. – Текст : электронный // Вопросы территориального развития. – 2021. – № 4. – С. 1–16. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-razvitiya-transportnoy-sistemy-severo-zapadnogo-federalnogo-okruga> (дата обращения: 10.04.2024).
2. Baklanova, K. Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety / K. Baklanova. – Текст : непосредственный // Intellect. Innovations. Investments. – 2023. – № 2. – P. 99–110. – DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99.
3. Современные методы оценки эксплуатационных свойств дорожных асфальтобетонов / Э. Р. Хафизов, Е. А. Вдовин, А. Ю. Фомин [и др.]. – Текст : электронный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1(39). – С. 279–285. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28905562> (дата обращения: 10.04.2024). – EDN: YIOBBV.

4. Фомин, А. Ю. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд / А. Ю. Фомин, Р. Н. Аскарова, В. Г. Хозин. – Текст : электронный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1(59). – С. 54–63. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48233309> (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.52409/20731523\_2022\_1\_54. – EDN: VBHJTW.
5. Коновалов, Н. В. Дорожные модифицированные минеральные материалы, укрепленные портландцементом / Н. В. Коновалов, Е. А. Вдовин. – Текст : электронный // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 4(4). – С. 14–22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=pdhlio> (дата обращения: 10.04.2024). – EDN: QOIGD.
6. Отсев дробления известняка, укрепленного цементом, для устройства оснований дорожных одежд / А. С. Барбо, Д. В. Вржещ, А. С. Решетников [и др.]. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – Выпуск 2018-3(131) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – С. 73–76. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2018/vestnik\\_2018-3\(131\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-3(131).pdf) (дата обращения: 10.04.2024). – EDN: VLJKLK. – ISSN 2519-2817.
7. Лукашевич, О. Д. Пути повышения экологической безопасности при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог / О. Д. Лукашевич, В. Н. Лукашевич. – Текст : электронный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Том 22, № 5. – С. 200–210. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44116335> (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-5-200-210. – EDN: MQRRTR.
8. Влияние содержания портландцемента на свойства укрепленных глинистых грунтов различного минералогического состава / П. Е. Буланов, А. Р. Гимазов, И. Р. Замалиев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Технологического университета. – 2017. – Том 20, № 9. – С. 24–27.
9. Науменко, Д. С. Исследование физико-механических свойств глинистых сланцев с целью использования их в конструкции земляного полотна автомобильных дорог / Д. С. Науменко, А. С. Чмырь, Д. И. Бородай. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-2(124) Современные строительные материалы. – С. 116–120. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29750845> (дата обращения: 10.04.2024). – EDN: ZBAZGR.
10. Evaluation of cement stabilised residual soil on macro-and micro-scale for road construction / Mohammad Jawed Roshan, Ahmad Safuan A Rashid, Muhammad Azril Hezmi [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Engineering and Applied Science. – 2022. – Volume 69. – P. 1–22. – DOI: 10.1186/s44147-022-00165-6.
11. Vdovin, E. A. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures / E. A. Vdovin, V. F. Stroganov. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference Interstroyemh – 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года : volume 786. – Kazan : Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012065. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=czwrrn> (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012065. – EDN: CZWWRN.
12. Development of road soil cement compositions modified with complex additive based on polycarboxylic ether / P. E. Bulanov, E. A. Vdovin, L. F. Mavliev [et al.]. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 04–06 декабря 2017 года : volume 327. – Tomsk : Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 032014. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xxesmx> (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032014. – EDN: XXESMX.
13. Analysis of the Effect of Ultra-Fine Cement on the Microscopic Pore Structure of Cement Soil in a Peat Soil Environment / Jing Cao, Chenhui Huang, Huaifeng Sun [et al.]. – Текст : непосредственный // Applied Sciences. – 2023. – Volume 13. – ID 12700. – P. 1–17. – DOI: 10.3390/app132312700.
14. Теоретические аспекты укрепления грунта в дорожном строительстве / М. Д. Кабалин, А. В. Замуруев, А. В. Курлыкина [и др.]. – Текст : электронный // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – Том 19, № 3(33). – С. 64–76. – UR: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54720068&ysclid=lx1r12uki998819684> (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.26200/GSTOU.2023.13.29.007. – EDN: AJSOPK.
15. Paneru, Harish. Cement Stabilization of soft soil subgrade and Cost Analysis / Harish Paneru, Mohan Prasad Acharya, Indra Prasad Acharya. – Текст : непосредственный // Kathford Journal of Engineering and Management. – Volume 2, issue 1. – P. 1–16. – ISSN: 2661-6106.
16. Влияние поликарбоксилатного пластификатора на физико-механические характеристики цементогрунта / Е. А. Вдовин, П. Е. Буланов, Л. Ф. Мавлиев [и др.]. – Текст : электронный // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 1(1). – С. 4–8. – UR: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hhsikq&ysclid=lx1rnpv7at856855381> (дата обращения: 10.04.2024). – EDN: HHSIKQ.
17. Krishna, N. Rama. Compatability of super plasticizers with GGBS blended cement concrete using OPC-53S / N. Rama Krishna, A. Srinivasa Rao, C. Sasidhar. – Текст : непосредственный // International Journal of Management, Technology And Engineering. – 2021. – Volume IX. – P. 2682–2690.
18. Synthesis and Performance Characterization of a Low Adsorption Clay-resistant Polycarboxylate Superplasticizer / Y. Zhang, P. Wang, G. Sun [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed. – 2021. – Volume 36. – P. 446–455.

19. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review / L. Lei, M. Palacios, J. Plank [et al.]. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2022. – Volume 154. – P. 106717. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106717.
20. Вдовин, Е. А. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями / Е. А. Вдовин, П. Е. Буланов, В. Ф. Строганов. – Текст : электронный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 4(66). – С. 301–309. – URL: [https://vk.com/doc284718893\\_676297689?hash=t36F7Bixw5VvkibWRCx4VGuSEmqv1JHJiSZDPKAAfyX](https://vk.com/doc284718893_676297689?hash=t36F7Bixw5VvkibWRCx4VGuSEmqv1JHJiSZDPKAAfyX) (дата обращения: 10.04.2024). – DOI 10.52409/20731523\_2023\_4\_301. – EDN: JZUJND.
21. Смирнов, В. А. Сравнительные динамические характеристики конструкционных материалов / В. А. Смирнов. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2022. – № 3. – С. 117–124. – DOI 10.22337/2077-9038-2022-3-117-131. – EDN: UVCWOR.

Получена 14.04.2024

Принята 24.05.2024

EVGENY VDOVIN, PAVEL BULANOV, DANIEL VYBORNOV  
IMPROVING THE PROPERTIES OF CEMENT SOILS IN THE LAYERS OF ROAD  
PAVEMENT BY MODIFICATION WITH A PLASTICIZER  
FSBEI HE «Kazan State University of Architecture and Engineering», Russian Federation, Kazan

**Abstract.** To increase the repair time of highways and improve the efficiency of road construction, a method of plasticization of cement soils is recommended as one of the effective modification methods in the technology of strengthening soils for road pavement. The effect of a superplasticizer based on nitrogen-containing condensation polymers on the physico-mechanical and design characteristics of a light powdery loam reinforced with portlandcement at different contents has been studied. The positive effect of the superplasticizer and the level of increase in compressive strength, flexural tensile strength, frost resistance coefficients and elastic modulus of plasticized cement primers have been established. Depending on the content of portlandcement and the field of application of reinforced soils in the structures of road pavements, optimal superplasticizer contents have been established.

**Keywords:** cement soils, modification, plasticization, superplasticizer, road pavement, strength, frost resistance, elastic modulus.

**Вдовин Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, проректор по научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»; института транспортных сооружений. Научные интересы: разработка дорожностроительных материалов, технологий и конструкций на основе модифицированных материалов и отходов производства.

**Буланов Павел Ефимович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»; института транспортных сооружений. Научные интересы: повышение устойчивости к старению битумов и полимерно-битумных вяжущих; модификация укрепленных грунтов для дорожного строительства.

**Выборнов Даниил Романович** – студент 4 курса бакалавриата кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»; института транспортных сооружений. Научные интересы: модификация укрепленных грунтов для дорожного строительства.

**Vdovin Evgeny** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head of the Department of Highways, Bridges and Tunnels, Vice-Rector for Research Activities, FSBEI HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»; Institute of Transport Facilities. Scientific interests: development of road-building materials, technologies and structures based on modified materials and industrial waste.

**Bulanov Pavel** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Highways, Bridges and Tunnels, FSBEI HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»; Institute of Transport Facilities. Scientific interests: increasing the resistance to aging of bitumen and polymer-bitumen binders; modification of reinforced soils for road construction.

**Vybornov Daniel** – 4th year under-graduate student, Department of Highways, Bridges and Tunnels, FSBEI HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»; Institute of Transport Facilities. Scientific interests: modification of reinforced soils for road construction.