



УДК: 691, 624.138

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_154

EDN: LEHMXN



## Модификация дорожных цементогрунтов нанокремнеземом

Е.А. Вдовин<sup>1</sup>, П.Е. Буланов<sup>1</sup>, Б.К. Хусаенов<sup>2</sup>, Д.Р. Выборнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

<sup>2</sup>ООО «Спецдорпроект»

г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Актуальность исследования обоснована необходимостью повышения уровня строительно-технических характеристик и долговечности цементогрунтов в слоях дорожных одежд, а также сокращения содержания минерального вяжущего в укрепленных грунтах, применяя в качестве эффективного модификатора нанокремнезем. Цель работы заключается в исследовании влияния модификации цементогрунтов нанокремнеземом на физико-механические характеристики материала дорожных одежд. Задачами исследования являются оценка влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов, и также исследование влияния нанокремнезема на уровни показателя морозостойкости укрепленных грунтов.

*Результаты.* Установлено влияние модификации цементогрунтов нанокремнеземом на уровни показателей предела прочности при сжатии, предела прочности на растяжение при изгибе и морозостойкости. Определено оптимальное содержание и эффективность нанокремнезема для цементогрунтов, обеспечивающих их возможное применения в конструктивных слоях дорожных одежд.

*Выводы.* Установлено, что модификация нанокремнеземом обеспечивает достижение у цементогрунтов марки по прочности М40 при содержании 8 % портландцемента и 0,6 % модификатора или 10 % портландцемента и 0,45 % модификатора от массы грунта. Исходя из нормативных требований, разработанные модифицированные цементогрунты могут применяться для устройства конструктивных слоёв оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Однако, недостаточные значения коэффициентов морозостойкости ограничивает область применения полученных цементогрунтов в дорожных одеждах. Для дальнейшего повышения уровней физико-механических характеристик необходимы дополнительные исследования процессов модификации цементогрунтов наночастицами.

**Ключевые слова:** цементогрунт, нанокремнезем, глинистый грунт, прочность, морозостойкость, аппарат вихревого слоя.

**Для цитирования:** Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Хусаенов Б.К., Выборнов Д.Р. Модификация дорожных цементогрунтов нанокремнеземом // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.154-162, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_154, EDN: LEHMXN

## Modification of road soil-cement with nanosilica

E.A. Vdovin<sup>1</sup>, P.E. Bulanov<sup>1</sup>, B.K. Khusaenov<sup>2</sup>, D.R. Vybornov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> LLC «Specdorproect»

Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The relevance of the study is justified by the need to increase the level of construction and technical characteristics and durability of soil-cement in pavement layers, as well as to reduce the content of mineral binder in reinforced soils, using nanosilica as an effective modifier. The aim of the work is to study the physical and mechanical characteristics of soil-cement modified with nanosilica.

*Results.* The effect of modification of soil-cement with nanosilica on the levels of indicators of compressive strength, tensile strength in bending and freeze-thaw durability has been established. The optimal content and efficiency of nanosilica for soil-cement, which ensure their possible use in the structural layers of pavements, has been determined.

*Conclusions:* It has been established that the modification with nanosilica ensures that the soil-cement achieve the M40 strength grade with a content of 8 % Portland cement and 0.6 % modifier or 10 % Portland cement and 0.45 % modifier by weight of the soil. Based on the regulatory requirements, the developed modified soil-cement can be used for the construction of structural layers of bases and coatings of transitional and lightweight types of pavement, depending on road and climatic conditions. However, insufficient values of frost resistance coefficients limit the applicable scope of the obtained cement soils in pavements. For further increase of the levels of physical and mechanical characteristics, additional studies on the processes of modifying soil-cement with nanoparticles are needed.

**Keywords:** soil-cement, nanosilica, clay, strength, freeze-thaw durability, vortex apparatus.

**For citation:** Vdovin E.A., Bulanov P.E., Khusaenov B.K., Vybornov D.R. Modification of road soil-cement with nanosilica // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.154-162, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_154, EDN: LEHMXN

### 1. Введение

Известно, что цементогрунты представляют собой разновидность строительного материала, полученного в результате смешения и последующего уплотнения грунтов, портландцемента (ПЦ) и воды (и модификаторов по мере необходимости) [1, 2]. Они имеют ряд преимуществ: экономичность, снижение негативной нагрузки на окружающую среду и технологичность (удобоукладываемость) при строительстве [3]. Цементогрунты широко используются в качестве основания дорожных одежд, материалов для укрепления откосов автомобильных дорог, армирования фундаментов и пр. [4, 5].

Увеличение интенсивности движения, транспортной нагрузки и давления в шинах, обусловили необходимость разработки инженерами и учеными более совершенных технологий, повышающих несущую способность дорожных одежд [6-8]. Для строительства оснований и покрытий автомобильных дорог используются различные виды глинистых грунтов и местных материалов, особенно в районах с отсутствием прочных каменных материалов [9-11]. Однако, данные материалы во влажных условиях [12] восприимчивы к воздействиям климатических факторов, что способствует развитию процессов повреждения конструктивных слоев дорожных одежд и сокращению срока службы автомобильных дорог [13].

Известно, что введение различных вяжущих улучшает свойства глинистых грунтов и местных материалов. Эти вяжущие вещества подразделяют на традиционные и нетрадиционные [1, 13]. Традиционные включают как минеральные: цемент, известь,

золы уноса, так и различные органические вяжущие: битумы, дегти и пр., а нетрадиционные – спектр различных видов ферментов, жидких полимеров, смол, силикатов, производных лигнина и пр. Среди названных вяжущих для укрепления глинистых грунтов наиболее эффективны портландцементы, так как цементогрунты обладают достаточно высокой прочностью [14-16].

Опыт исследований и применения укрепленных материалов свидетельствует о том, что для повышения уровня строительно-технических характеристик и долговечности грунтов с большим содержанием глинистых минералов, укрепленных портландцементами, в слоях дорожных одежд, а также сокращения расхода минерального вяжущего целесообразно применение модификаторов [17-19].

В последние десятилетия наночастицы вызывают особый научный интерес в области строительного материаловедения [20]. Наиболее широко применяемыми наночастицами в цементных композитах являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также углеродные нанотрубки. Одним из наиболее эффективным по данным исследований является нанокремнезем [21, 22]. Из анализа литературы следует, что для определения эффективности модификации дорожных цементогрунтов нанокремнеземом не достаточно результатов исследований и практического опыта.

Цель работы заключается в исследовании влияния модификации цементогрунтов нанокремнеземом на физико-механические характеристики материала дорожных одежд.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- исследование влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов;
- исследование влияния нанокремнезема на уровни показателя морозостойкости модифицированных цементогрунтов.

## 2. Материалы и методы

Для проведения исследований использовались пробы глинистого грунта Сахаровского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан. Число пластичности грунта определялась как разность влажности грунта на границе текучести (31,04 %) и влажности грунта на границе раскатывания (18,14 %) и соответствовало 0,129. Содержание песчаных частиц (2,00-0,05 мм) в грунте по массе составляло 7,14 %. В соответствии с ГОСТ 25100 глинистый грунт относится к суглинку тяжелому пылеватому.

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент». ПЩ вводился в количестве 6%, 8% и 10% от массы грунта.

В качестве модификатора цементогрунтов применялся нанокремнезем с размером частиц 50 нм, содержание  $\text{SiO}_2$  составляло 99,6% (производитель: LUOYANG TONGRUN INFO TECHNOLOGY CO., LTD, Китай). Нанокремнезем вводился в количествах 0,15%, 0,30%, 0,45% и 0,60% от массы грунта. Распределение нанокремнезема осуществлялось в аппарате вихревого слоя (ABC Vortex 297, Нижний Новгород, Россия) под воздействием ферромагнитных частиц,двигающихся в магнитном поле реактора. Длина рабочей зоны индуктора составляла 330 мм, напряжение на индукторе вихревого слоя регулировалось в диапазоне от 30 В до 380 В, сила тока – от 20 А до 180 А, частота индуктора – до 400 Гц.

Определение степени дисперсности проводилось на лазерном анализаторе размера частиц (HORIBA LA-950, Киото, Япония) после фиксированного времени активации наполнителя. Диапазон измерений размера частиц от 0,1 до 1000 мкм. Источниками оптического излучения являлись: лазерный диод с длиной волны 650 нм и светодиод с длиной волны 405 нм.

Время распределения наночастиц в воде составляло от 30 до 75 минут в зависимости от содержания нанокремнезема. Количество ферромагнитных частиц (роликов) в реакторе составляло 25 штук. В соответствии с ГОСТ 6870 применяемые ролики имели следующее обозначение: ролик 2x19,8 А 5. Ролики были произведены в ОАО «Шумихинский ЗПИ», Россия.

Содержание воды в модифицированных цементогрунтовых смесях рассчитывалось из условия достижения оптимальной влажности, при которой обеспечивается максимальная плотность смеси.

Определение предела прочности на сжатие цементогрунтов производилось после водонасыщения образцов в течении 2 суток. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 суток. Коэффициент морозостойкости определялся как отношение прочности цементогрунтов после 15 циклов замораживания-оттаивания к прочности водонасыщенных образцов после 28-суточного твердения в нормальных условиях. Испытания физико-механических свойств цементогрунтов проводилось по ГОСТ 23558.

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ результатов исследований показал, что модификация цементогрунтов дорожного назначения нанокремнеземом способствует повышению уровня физико-механических характеристик дорожно-строительного материала, таких как предела прочности при сжатии, растяжения при изгибе, коэффициента морозостойкости (рис. 1 - 3).

Установлено, что для всех исследованных модифицированных цементогрунтов сохраняется зависимость повышения уровней пределов прочности при сжатии и растяжении при изгибе с увеличением содержания нанокремнезема в цементогрунтах (рис. 1 - 2). Наибольшее увеличение предела прочности при сжатии по сравнению с немодифицированными материалами в 3,5 раза, предела прочности на растяжение при изгибе - в 3,0 обеспечивается при наименьшем содержании ПЦ (6,0 %) и наибольшем содержании нанокремнезема (0,6 %). Полученные результаты свидетельствуют, что наибольший эффект повышения прочностных показателей при модификации нанокремнеземом проявляется в цементогрунтах с малым содержанием ПЦ. Выявленные зависимости коррелируют с данными, представленными авторами в исследованиях цементогрунтов [22-23].

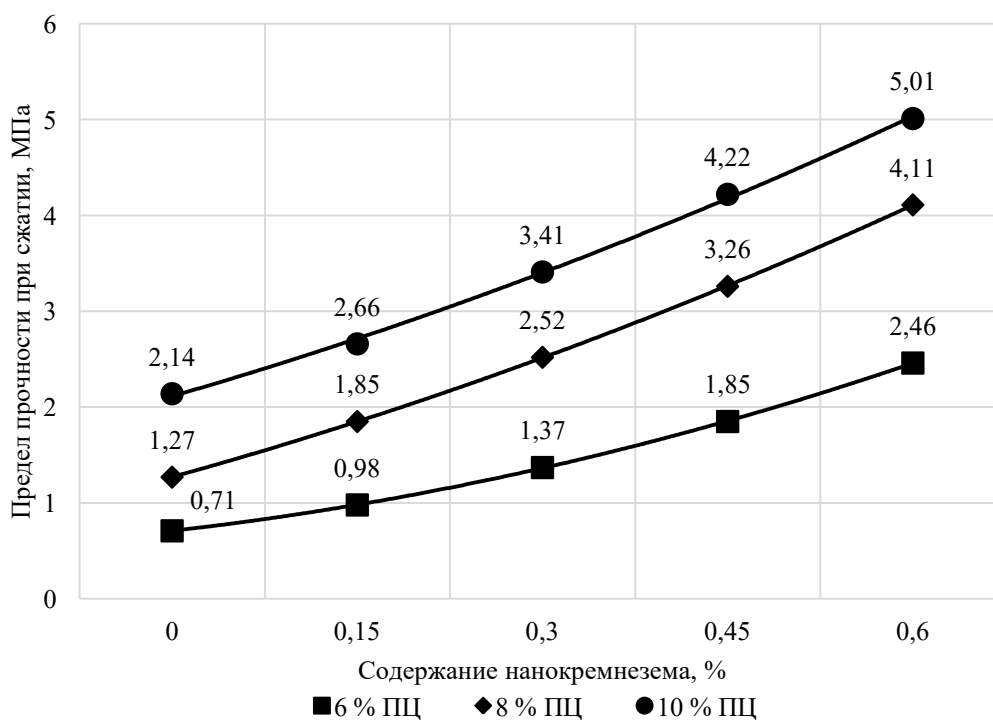


Рис. 1 – Зависимость влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 1 Dependence of the effect of nanosilicon on the compressive strength of cement soils (illustration of authors)

Следует отметить, что с увеличением содержания ПЩ и нанокремнезема повышение прочностных показателей цементогрунтов идет с меньшей интенсивностью, но достаточно эффективно: минимальное повышение прочности при содержании в составе грунта 10% ПЩ и 0,6 % нанокремнезема обеспечивается в 2,3 раза, прочности на растяжение при изгибе – в 2,0 раза по сравнению с немодифицированными материалами.

Выявлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает повышение морозостойкости цементогрунтов. Оптимальное содержание нанокремнезема в пределах исследуемого диапазона (от 0 до 0,6%), способствующее максимальному повышению коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов, составляет 0,45 % при ПЩ – 6 и 8 %, 0,6% - при ПЩ 10%. Анализ результатов показал, что наибольший эффект повышения коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов (в 1,6 раза по сравнению с немодифицированными материалами) проявляется при повышении содержания ПЩ до 10% (рис. 3). Возможно, для формирования более морозоустойчивой структуры цементогрунтов при модификации их наноматериалами требуется определенное содержание минералов клинкера ПЩ, чтобы реализовать потенциал модификатора. Данное предположение подтверждается результатами, полученными при исследовании цементоминеральных материалов [24, 25].

Основываясь на результатах и данных других исследователей, повышение прочности и морозостойкости цементогрунтов, модифицированных нанокремнеземом, по нашему мнению, связано со следующими механизмами взаимодействия продуктов гидролиза и гидратации цемента. Нанокремнезем проявляет высокую пуццолановую активность за счет большого количества чистого аморфного  $\text{SiO}_2$  [22]. Изменения, наблюдаемые в цементных смесях, модифицированных наночастицами  $\text{SiO}_2$ , являются результатом химической реакции между нанокремнеземом и портландитом, образующимся при гидратации цемента. Нанокремнезем также ускоряет гидратацию цемента благодаря своей высокой поверхностной энергии [25].

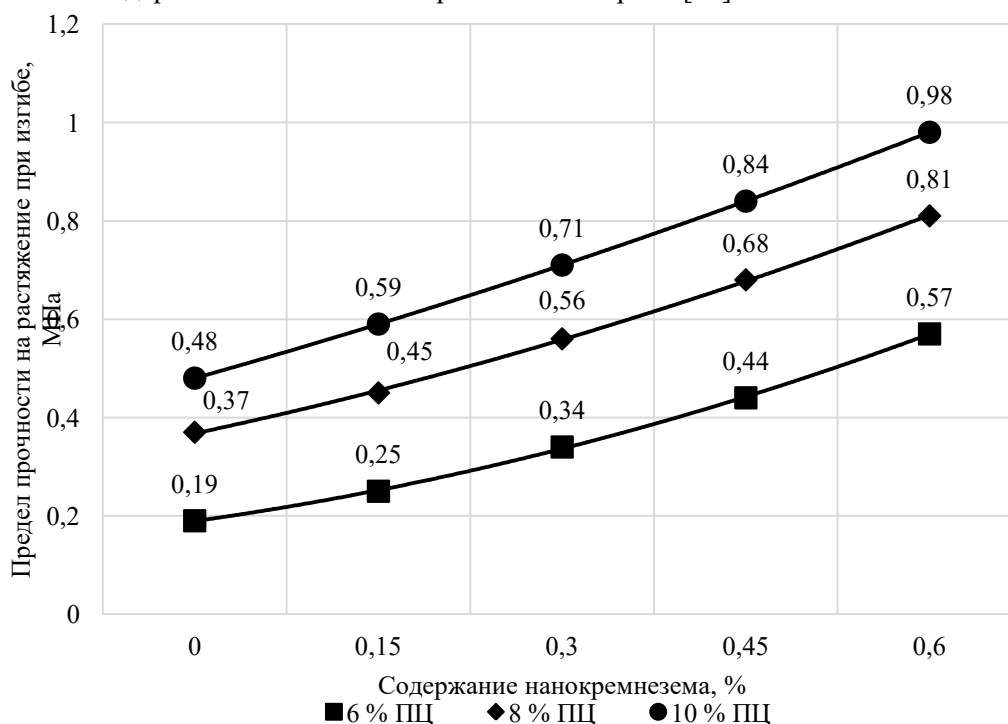


Рис. 2 – Зависимость влияния нанокремнезема на предел прочности на растяжение при изгибе цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 2 Dependence of the effect of nanosilicon on the tensile strength during bending of cement soils (illustration of authors)

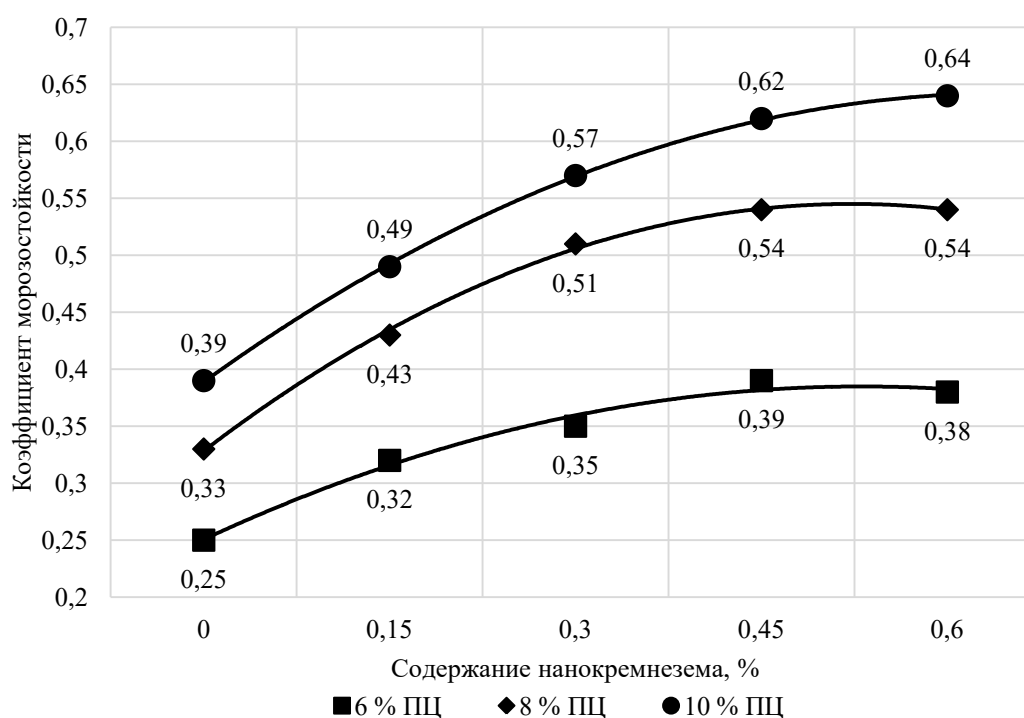


Рис. 3 – Зависимость влияния нанокремнезема на коэффициента морозостойкости цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig.3 Dependence of the effect of nanosilicon on the coefficient of frost resistance of cement soils (illustration of authors)

Наночастицы  $\text{SiO}_2$  в цементных системах вызывают физические изменения, одним из которых является повышение плотности упаковки структуры материала в результате эффекта более полного заполнения микропор частицами [23].

Другим известным физическим механизмом является эффект зародышеобразования, при котором продукты гидратации обволакивают частицы, что способствует формированию плотной матрицы материала с более равномерно распределенными продуктами гидратации [21]. Следует предположить, что вторичный гель С-S-H(II), являющийся продуктом взаимодействия цемента и нанокремнезема, обволакивает частицы грунта и заполняет микропоры в структуре, повышая плотность цементогрунтовой смеси. Данные результаты подтверждаются исследованиями [24-26].

Совместный эффект перечисленных физических и химических процессов при модификации цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает повышение уровней прочности и морозостойкости укрепленных грунтов, что коррелирует с результатами работ [21, 23].

Установлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает достижение марки по прочности М40 при содержании в грунте 8 % ПЦ и 0,6 % модификатора или 10 % ПЦ и 0,45 % модификатора. По ГОСТ 23558 разработанные модифицированные цементогрунты с маркой по прочности М40 возможно использовать в конструктивных слоях оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Однако, недостаточное значение коэффициента морозостойкости (ниже 0,75) у полученных модифицированных материалов ограничивает область применения цементогрунтов в дорожных одеждах. Для обеспечения требуемых уровней физико-механических характеристик необходимы дополнительные исследования процессов модификации цементогрунтов наночастицами.

#### 4. Заключение

1) Модификация цементогрунтов дорожного назначения нанокремнеземом способствует повышению уровня предела прочности при сжатии, растяжения при изгибе и коэффициента морозостойкости.

2) Установлено, что для всех исследованных модифицированных цементогрунтов сохраняется зависимость повышения уровней пределов прочности при сжатии и растяжения при изгибе с увеличением содержания нанокремнезема в цементогрунтах. Наибольшее увеличение предела прочности при сжатии по сравнению с немодифицированными материалами в 3,5 раза, предела прочности на растяжение при изгибе - в 3,0 обеспечивается при наименьшем содержании портландцемента (6,0%) и наибольшем содержании нанокремнезема (0,6%). С увеличением содержания портландцемента и нанокремнезема повышение прочностных показателей цементогрунтов идет с меньшей интенсивностью, но достаточно эффективно.

3) Выявлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает максимальное повышение коэффициентов морозостойкости при оптимальном содержании модификатора, которое составило 0,45 % для материалов с портландцементом 6 и 8 %, 0,6% - с портландцементом 10%. Наибольший эффект повышения коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов (в 1,6 раза по сравнению с немодифицированными материалами) проявляется при повышении содержания портландцемента до 10%.

4) Повышение уровней прочности и морозостойкости модифицированных цементогрунтов, возможно обеспечивается химической реакцией между нанокремнеземом и портландитом, образующейся при гидратации цемента, а также в результате образования более плотной упаковки структуры материала с заполнением его микропор частицами C-S-H(II).

5) Установлено, что разработанные модифицированные цементогрунты с маркой по прочности М40 возможно использовать в конструктивных слоях оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Расширение области применения цементогрунтов, модифицированных нанокремнеземом, возможно после дополнительных исследований процессов модификации укрепленных грунтов наночастицами.

#### Список литературы/References

1. Abbey S.J., Eyo U.E., Okeke C.A.U., Ngambi S. Experimental study on the use of RoadCem blended with by-product cementitious materials for stabilisation of clay soils // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 280. P. 122476. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122476.
2. Jiang N.-J., Du Y.J., Liu K. Durability of Lightweight Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Stabilized Clayey Soils Subjected to Sulfate Attack // *Applied Clay Science*. 2018. No. 161. P. 70-75. doi: 10.1016/j.clay.2018.04.014.
3. Behnood A. Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques // *Transportation Geotechnics*. 2018. No. 17. P. 14-32. doi: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002.
4. Eyo E.U., Abbey S.J. Machine learning regression and classification algorithms utilised for strength prediction of OPC/by-product materials improved soils // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 284. P. 122817. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122817.
5. Ayeldeen M., Kitazume M. Using fiber and liquid polymer to improve the behavior of cement-stabilized soft clay // *Geotextiles and Geomembranes*. 2017. No. 46. P. 592-602. doi: 10.1016/j.geotexmem.2017.05.005.
6. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F. Physical and mechanical characteristics of soil stabilized with quicklime for road bed // *Construction of Unique Buildings and Structure*. 2022. No. 105. P. 10503. doi: 10.4123/CUBS.105.3.

7. Cai Y., Xu L. R., Liu W. Z., Shang Y., Su N., Feng D. Field Test Study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. No. 128, P. 105878. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
8. Galeev R., Abdrakhmanova L., Nizamov R. Nanomodified organic-inorganic polymeric binders for polymer building materials // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 276. – P. 223-228. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.276.223. – EDN YBYFXF.
9. Amiri M., Sanjari M., Porhonor F. Microstructural evaluation of the cement stabilization of hematite-rich red soil // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. No. 16. P. e00935. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00935.
10. Zhang Y., Zhong X., Lin J., Zhao D., Jiang F., Wang M.-K., Ge H., Huang Y. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China // *Geomorphology*. 2020. No. 351. P. 106956. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106956.
11. Mukhametrakhimov R. Kh., Lukmanova L. V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – No. 2(102). – P. 10206. – DOI 10.34910/MCE.102.6. – EDN KYROBO.
12. Cai Y., Xu L., Liu W., Shang Y., Su N., Feng D. Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. No. 128. P. 105878. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
13. Roshan K., Choobbasti A., Soleimani K., Fakhrabadi A. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. No. 193. P. 103418. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
14. Wang D., Wang H., Larsson S., Benzerzour M., Maherzi W., Amar M. Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 241. P. 118085. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118085.
15. Salik T., Gandomi A.H. Improvement of shear strength of cohesive soils by additives: a review // *Basics of Computational Geophysics*. 2021. No. 12. P. 189-211. doi: 10.1016/B978-0-12-820513-6.00011-4.
16. В. Г. Хозин, О. В. Хохряков, Р. К. Низамов Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // *Бетон и железобетон*. – 2020. – № 1(601). – С. 15-28. – EDN VIDDBF [V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, R.K. Nizamov Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete // *Concrete and reinforced concrete*. – 2020. – № 1(601). – P. 15-28. – EDN VIDDB]
17. Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Панков П.П., Руш Е.А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов // Тюменский индустриальный университет. 2019. № 23(11). С. 32-37 [Konovalova N., Dabizha O., Pankov P., Rush E. Utilization of Hydrolysis Lignin in Compositions Soil-Cements // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. No. 23(11). P. 32-37.] doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-32-37.
18. Куюков С.А., Гензе Д.А., Шматок В.В., Жигайлов А.А. Комплексный подход к повышению долговечности цементогрунтового основания // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2019. № 4. С. 80-89 [Kujukov S.A., Genze D.A., Shmatok V.V., Zhigajlov A.A. A comprehensive approach to improving the durability of soil cement foundation // *Tyumen Industrial University*. 2019. No. 4. P. 80-89.] doi: 10.15593/24111678/2019.04.10.
19. Жигайлов А.А., Куюков С.А., Тестешев А.А., Шматок В.В. Технико-экономическое обоснование метода повышения физико-механических характеристик модифицированного цементогрунта дорожного назначения // *Путевой навигатор*. 2020. № 42 (68). С. 24-29. 89 [Zhigailov A.A., Kuyukov S.A., Testeshev A.A., Shmatok V.V. Feasibility study of the method for improving the physical and mechanical characteristics of the modified cement-reinforced soil // *Way navigation*. 2020. No. 42 (68). P. 24-29.]



20. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Investigation of properties in nanomodified polyethylene-based wood-polymer composites // *Nanotechnologies in construction*. 2023. No. 15(2). P. 110-116. doi: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116.
21. Niewiadomski P., Hoła J., Ćwirzeń A. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. No. 18(3). P. 877-886. doi: 10.1016/j.acme.2018.01.006.
22. Dolatabad Y.A., Kamgar R., Nezaad I.G. Rheological and Mechanical Properties, Acid Resistance and Water Penetrability of Lightweight Self-Compacting Concrete Containing Nano-SiO<sub>2</sub>, Nano-TiO<sub>2</sub> and Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2019. No. 44. P. 603-618. doi: 10.1007/s40996-019-00328-1.
23. Luo, X.; Kong, L.; Bai, W. Effect of Superhydrophobic Nano-SiO<sub>2</sub> on the Hydraulic Conductivity of Expansive Soil and Analysis of Its Mechanism // *Applied Sciences*. 2023, No. 13, P. 8198. doi: 10.3390/app13148198.
24. Zhenli H., Xiaoping X., Beibei L. Evaluating the Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study // *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2022. No. 19(24). P. 1-7. doi: 10.3390/ijerph192416805.
25. Xingchen Z., Jianen G., Henghui F., Xinghua L., Zhe G., Li X., Shengli S. Study on the Mechanism of Nano-SiO<sub>2</sub> for Improving the Properties of Cement-Based Soil Stabilizer // *Nanomaterials*. 2020. No. 10(3). P.405-416. doi: 10.3390/nano10030405.
26. Nemuschenko D.A., Larichkin V.V., Onipchenko A.P., Subbotin V.S. A research into the distribution of silicium dioxide nanoparticles in the mixing water // *Novosibirsk State Technical University (NSTU)*. 2020. No. 5. P.678-687. doi: 10.22227/1997-0935.2020.5.678-687.

#### Информация об авторах

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

E-mail: vdovin007@mail.ru

**Буланов Павел Ефимович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru

**Хусаенов Булат Каримович**, ведущий инженер, ООО «Спецдорпроект», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: husaenov1711@mail.ru

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

E-mail: f\_lays@mail.ru

#### Information about the authors

**Evgeniy A. Vdovin**, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin007@mail.ru

**Pavel E. Bulanov**, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: f\_lays@mail.ru

**Bulat K. Khusaenov**, lead Engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: husaenov1711@mail.ru

**Daniil R. Vybornov**, bachelor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: f\_lays@mail.ru