



УДК: 691, 624.138

DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301

EDN: JZUJND



Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями

Е.А. Вдовин¹, П.Е. Буланов¹, В.Ф. Строганов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Известно применение отдельных модификаторов – гидрофобизаторов из ряда кремнийорганических соединений для повышения некоторых технологических и эксплуатационных свойств цементогрунтов. Однако системные исследования по влиянию строения и объема алифатического радикала в кремнийорганических соединениях на эффективность модификации дорожных цементогрунтов не проводились. Актуальность исследования обоснована необходимостью обеспечения требуемого уровня прочности и морозостойкости цементогрунтовых слоев дорожных одежд в дорожно-климатических зонах с сезонными и суточными изменениями температур, особенно при частых переходах через 0 °С. Цель работы заключается в анализе и исследовании эффективности влияния кремнийорганических соединений, отличающихся объемом алифатического радикала, на физико-механические характеристики дорожных цементогрунтов.

Результаты. Установлено, что модификация цементогрунтов пропил- и метилсиликонатами калия обеспечивает повышение предела прочности на сжатие в пределах от 30 до 45 %, предела прочности на растяжение при изгибе от 28 до 40 %, коэффициента морозостойкости от 64 до 88 % по сравнению с немодифицированными составами. Показано, что при равных уровнях прочностных показателей модифицированных цементогрунтов, влияние пропилсиликоната калия способствует более значительному повышению уровня морозостойкости – на 10-20 %.

Выводы. Показано положительное влияние модификации гидрофобизаторами – кремнийорганическими соединениями, содержащими алкильный радикал, отличающихся по строению и объему. Установлено, что наибольший уровень морозостойкости и прочности обеспечивается при модификации кремнийорганическими соединениями, содержащих пропильный радикал (C₃H₇). Выявлено, что с увеличением объема радикала кремнийорганического соединения возможно снижение оптимального содержания модификатора в дорожных цементогрунтах при повышении характеристик материалов дорожных одежд. Подтверждением данной закономерности являются результаты по определению оптимального содержания исследованных модификаторов, в которых отмечается снижение на 20 % количества пропилсиликоната калия по сравнению с метилсиликонатом калия при различных составах цементогрунтов.

Ключевые слова: цементогрунты, строение кремнийорганических соединений, прочность, морозостойкость, дорожная одежда

Для цитирования: Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 301-309, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301, EDN: JZUJND

Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds

E.A. Vdovin¹, P.E. Bulanov¹, V.F. Stroganov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* It is known to use individual modifiers – water repellents from a number of organosilicon compounds to improve some technological and operational properties of soil-cement. However, systematic studies on the influence of the structure and volume of the aliphatic radical in organosilicon compounds on the efficiency of modification of road soil-cement have not been carried out. The relevance of the study is justified by the need to ensure the required level of strength and frost resistance of cement-soil layers of road pavements in road-climatic zones with seasonal and daily temperature changes, especially with frequent transitions through 0 °C. The purpose of the work is to analyze and study the effectiveness of the influence of organosilicon compounds, differing in the volume of aliphatic radical, on the physical and mechanical characteristics of road soil-cement.

Results. It has been established that modification of soil-cement with potassium propyl and methyl siliconates provides an increase in the compressive strength in the range from 30 to 45 %, the tensile strength in bending from 28 to 40 %, and the freeze-thaw resistance coefficient from 64 to 88 % compared to unmodified compositions. It has been shown that at equal levels of strength parameters of modified soil-cement, the influence of potassium propyl siliconate contributes to a more significant increase in the level of frost resistance – by 10-20 %.

Conclusions: The positive effect of modification with water repellents - organosilicon compounds containing an alkyl radical, differing in structure and volume - has been shown. It has been established that the highest level of freeze-thaw resistance and strength is provided when modified with organosilicon compounds containing propyl radical (C₃H₇). It has been revealed that with an increase in the volume of the radical of an organosilicon compound, it is possible to reduce the optimal content of the modifier in road soil-cement while increasing the characteristics of road pavement materials. This pattern is confirmed by the results of determining the optimal content of the studied modifiers, in which there is a 20% decrease in the amount of potassium propyl siliconate compared to potassium methyl siliconate for different compositions of soil-cement.

Keywords: soil-cement, structure of organosilicon compounds, strength, freeze-thaw resistance, road pavement

For citation: Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 301-309, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301, EDN: JZUJND

1. Введение

Цементогрунт – это укрепленная смесь, состоящая из различных видов материалов, таких как грунт, цемент, вода и модификаторы при необходимости, полученная в результате смешения и последующего уплотнения механизированным способом [1, 2]. Цементогрунты широко применяется при строительстве автомобильных дорог для стабилизации грунтов верха земляного полотна и в качестве оснований и покрытий дорожной одежды [3]. Основными преимуществами цементогрунта перед традиционными конструкциями дорожных одежд являются: снижение стоимости строительства, экологической нагрузки на окружающую среду, технологических операций на доставку и укладку цементогрунтовой смеси [4, 5]. К недостаткам цементогрунтов, снижающих прочность и морозостойкость, а также требующих повышенного количества вяжущего, следует отнести присутствие в укрепляемом грунте глинистых минералов (монтмориллонит, каолинит и др.) [6]. При увлажнении

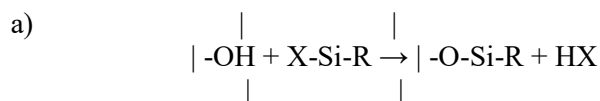
укрепленных грунтов, а также попеременного замораживания-оттаивания, эти минералы обуславливают развитие процессов разрушения конструктивных слоев дорожных одежд, приводящих к сокращению срока службы автомобильных дорог [6-8].

В исследованиях [9, 10] установлено, что добавление в грунт только цемента недостаточно для достижения требуемых характеристик по прочности и морозостойкости. Получение требуемых физико-механических свойств цементогрунтов возможно получить или при повышении содержания вяжущего, или при введении модифицирующих добавок.

Наиболее эффективными модификаторами для снижения водопоглощения и повышения морозостойкости являются гидрофобизаторы. В качестве гидрофобизаторов известно применение водорастворимых кремнийорганических соединений – силанов, силоксанов и др. [11-13].

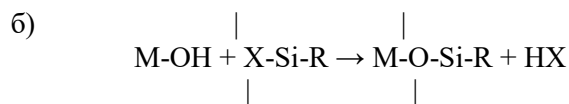
Молекулы кремнийорганических соединений состоят из двух частей, противоположных по своей природе и свойствам. Одна часть представляет собой гидрофильные полярные силоксановые цепочки с кремнийкислородными связями, которые вступают в химическую связь с ОН-группами влаги, находящейся в порах и на поверхности грунта, а также с реакционноспособными участками (нескомпенсированными зарядами кристаллической решетки) минеральной части грунта. Кремнийкислородные цепочки ориентируются по направлению к поверхности минеральных частиц. Другая часть кремнийорганических соединений представляет собой гидрофобные углеводородные радикалы, связанные с кремнием и нерастворимые в воде. Они образуют водоотталкивающий слой, ориентированный в направлении от поверхности минеральных частиц в сторону порового пространства [14].

Процесс гидрофобизации основан на ориентированной хемосорбции молекул гидрофобизатора на твердой поверхности, обрабатываемого материала. Для обеспечения устойчивости водоотталкивающих покрытий необходимо, чтобы полярные группы гидрофобизатора были химически связаны с поверхностными атомами или ионами обрабатываемой поверхности. Эти связи образуются в процессе адсорбции кремнийорганических соединений и при протекании поверхностных химических реакций реакционноспособных функциональных групп, входящих в состав гидрофобизатора [14, 15]. Наглядным изображением таких взаимодействий могут служить химические реакции (рис. 1, 2), представленные в работе под руководством В.Г. Батракова [19].



где R – алкил, или арил, X – Cl, HO, H, OR и др.

| -OH – схематическое изображение частично реагирующей поверхности гидроксида кальция.



где M – Ca, Mg, Al и т.д.

Рис. 1 – Химические реакции функциональных групп гидрофобизатора:

а) с гидроксильными группами гидратного покрова поверхности строительных материалов;

б) со структурными гидроксильными группами, входящими в состав строительных материалов (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Chemical reactions of the functional groups of the water repellent:

a) with hydroxyl groups of the hydrate cover of the surface of building materials;

b) with structural hydroxyl groups that are part of building materials (illustration by the authors)

Взаимодействие кремнийорганических соединений различного строения в цементно-минеральных системах (рис. 2) обеспечивает эффективный процесс

гидрофобизации стенок пор и капилляров с образованием пленки мозаичного строения, с органическими радикалами, обращенными в жидкую фазу. В исследованиях В.Г. Батракова установлено, что гидрофобизация обеспечивает повышение уровня морозостойкости цементно-минеральных систем, а выделение газов, в частности водорода (рис. 2 б), способствует образованию структуры материала с большей долговечностью [16].

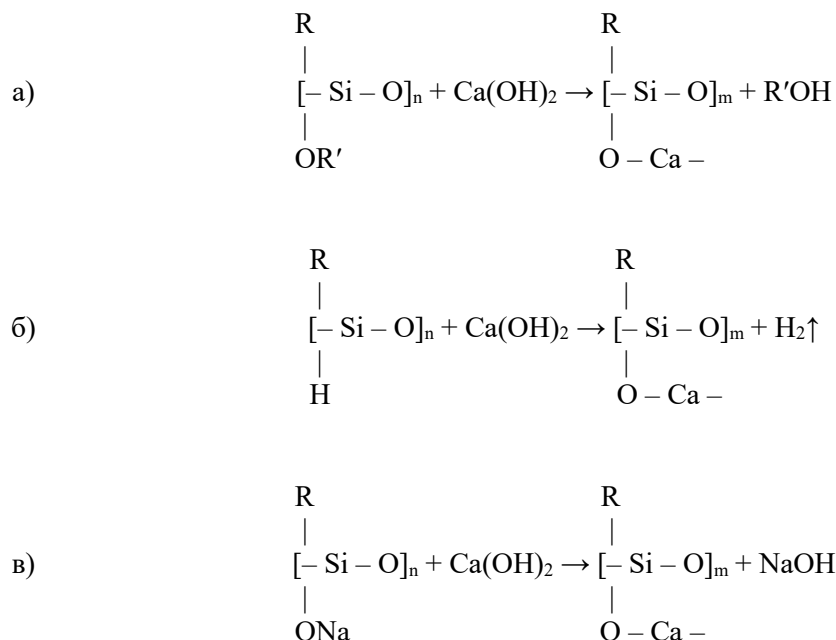


Рис. 2 – Химические реакции в цементно-минеральных системах, модифицированных различными кремнийорганическими соединениями:

- а) полиорганосилоксанами, б) полигидросилоксанами, в) полиалкилсиликонатами натрия (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Chemical reactions in cement-mineral systems modified with various organosilicon compounds:

- a) polyorganoalkoxysiloxanes, b) polyhydrosiloxanes, c) sodium polyalkylsiliconate (illustration by the authors)

Прочность связи полисилоксановых пленок с поверхностью материала зависит от функциональности мономеров. Пленки на основе трифункциональных мономеров RSiX_3 имеют большую вероятность их химической связи с поверхностью [20]. Трифункциональные мономеры при гидролизе и последующей конденсации образуют разветвленные (сетчатые) пространственные полимеры, в которых силоксановые цепи могут связываться как между собой, так и с поверхностью материала за счет входящих в ее состав гидроокисей и окисей металлов. Образование многослойной трехмерной пленки, надежно обволакивающей все микрочастицы стройматериала, после соприкосновения с гидрофобизирующим раствором, препятствует гидролизу связей Si-O-M, обеспечивающих химическое сцепление гидрофобного покрытия с поверхностью. Благодаря этому трехмерные полимерные пленки оказываются весьма устойчивыми в эксплуатации [19].

В дорожно-климатических зонах с сезонными и суточными изменениями температур, частыми переходами через 0°C появляется проблема обеспечения требуемого уровня прочности и морозостойкости цементогрунтовых слоев дорожных одежд, одним из решений которой является применение модификаторов на основе кремнийорганических соединений. Из проведенного анализа теоретических и экспериментальных работ известно применение отдельных кремнийорганических модификаторов для повышения некоторых технологических и эксплуатационных свойств цементогрунтов. Однако, системные исследования по влиянию строения и объема

алифатического радикала в кремнийорганических соединениях на эффективность модификации дорожных цементогрунтов не проводились.

В связи с изложенным, целью работы является анализ и экспериментальные исследования эффективности влияния кремнийорганических соединений, отличающихся объемом алифатического радикала, на физико-механические характеристики дорожных цементогрунтов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния метил- и пропилсиликонатов калия на предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов;
- исследование влияния кремнийорганических соединений на уровни показатели морозостойкости модифицированных цементогрунтов;
- определение оптимального содержания метил- и пропилсиликонатов калия в цементогрунтах при различном количестве портландцемента;
- установить эффективность повышения качества и долговечности цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с разным объемом алифатических радикалов.

2. Материалы и методы

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

В качестве вяжущего использовался портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент», который вводили в количестве 6 %, 10 % и 14 % от массы грунта.

Применяли кремнийорганические соединения: метилсиликонат калия и олигомерный концентрат пропилсиликоната калия.

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

Определение предела прочности на сжатие ($R_{сж}$) и предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$) цементогрунтов производили после водонасыщения образцов в течении 2 суток. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 суток. Коэффициент морозостойкости ($K_{мор}$) определяли как отношение прочности цементогрунтов после 15 циклов замораживания-оттаивания к прочности водонасыщенных образцов после 28-суточного твердения в нормальных условиях. Испытания физико-механических свойств цементогрунтов проводили по ГОСТ 23558.

3. Результаты и обсуждение

При введении метилсиликоната калия в цементогрунты в количестве от 0,25 до 1,25 % и содержании ПЦ 6 %, 10 % и 14 % от массы грунта повысились следующие физико-механические показатели: предел прочности на сжатие на 45 %, 39 % и 33 % (рис. 3 а); предел прочности на растяжение при изгибе на 40 %, 37 % и 30 % (рис. 4 а); коэффициент морозостойкости на 64 %, 68 % и 71 % (рис. 5 а), соответственно. При модификации пропилсиликонатом калия в количестве от 0,20 до 1,00 % и содержании ПЦ 6 %, 10 % и 14 % от массы грунта повысились следующие физико-механические показатели: предел прочности на сжатие на 40 %, 36 %, 31 % (рис. 3 б); предел прочности на растяжение при изгибе на 37 %, 33 % и 28 % (рис. 4 б); коэффициент морозостойкости на 76 %, 83 %, 88 % (рис. 5 б), соответственно. Аналогичные результаты получены авторами [15] в части прочности и морозостойкости.

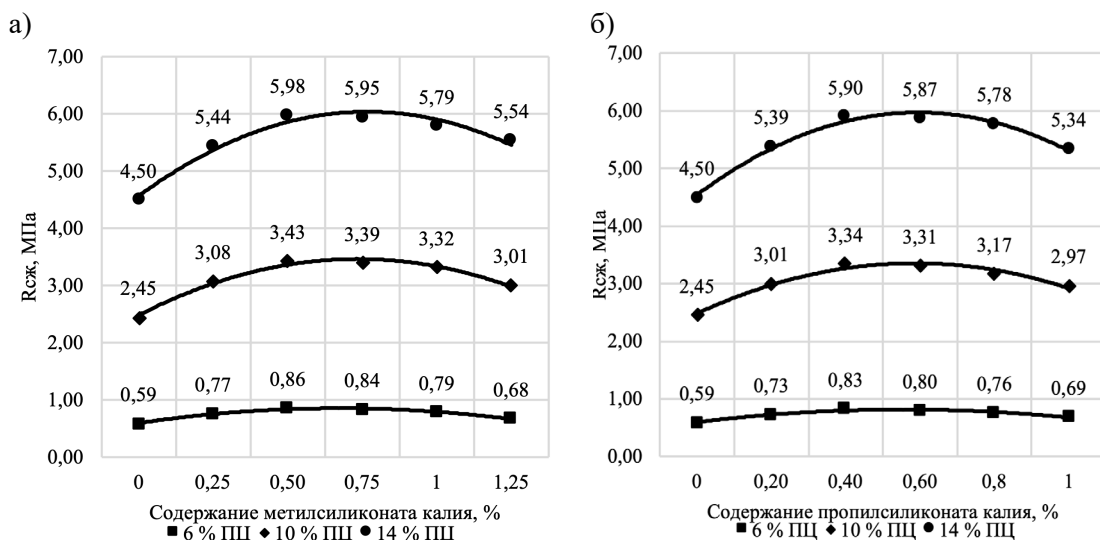


Рис. 3 – Зависимость влияния кремнийорганических соединений на предел прочности при сжатии модифицированных цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the compressive strength of modified soil-cement (illustration by the authors)

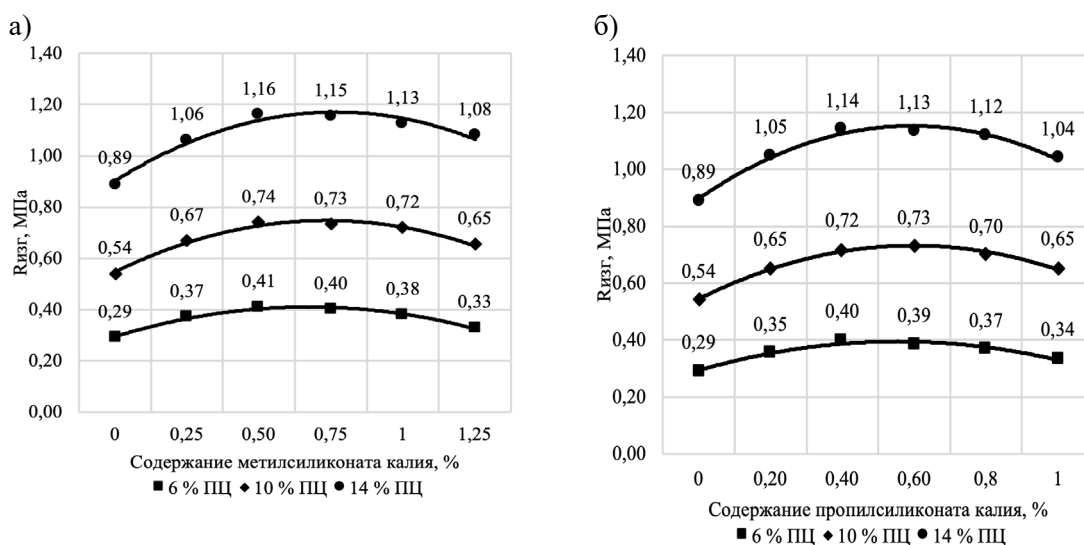


Рис. 4 – Зависимость влияния кремнийорганических соединений на предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the tensile strength in bending of modified soil-cement (illustration by the authors)

Модификация цементогрунтов кремнийорганическими соединениями показали положительные результаты в повышении физико-механических свойств. Определено оптимальное содержание метил- и пропилсиликонатов калия в цементогрунтах при различном количестве ПЦ в укрепленных материалах: 0,5 % и 0,4 %, соответственно. Выявлено, что с увеличением объема радикала кремнийорганического модификатора возможно снижение его оптимального содержания в дорожных цементогрунтах при повышении характеристик материалов дорожных одежд. Подтверждением данной закономерности являются результаты по определению оптимального содержания метил- и пропилсиликоната калия (на 20 %) в цементогрунтах при различных количествах портландцемента. В литературных источниках отсутствуют системные данные по

содержанию модификаторов. Авторами [17, 18] рассматривались кремнийорганические соединения, их оптимальные содержания, однако подтверждения возможности снижения в исследованиях не отмечалось.

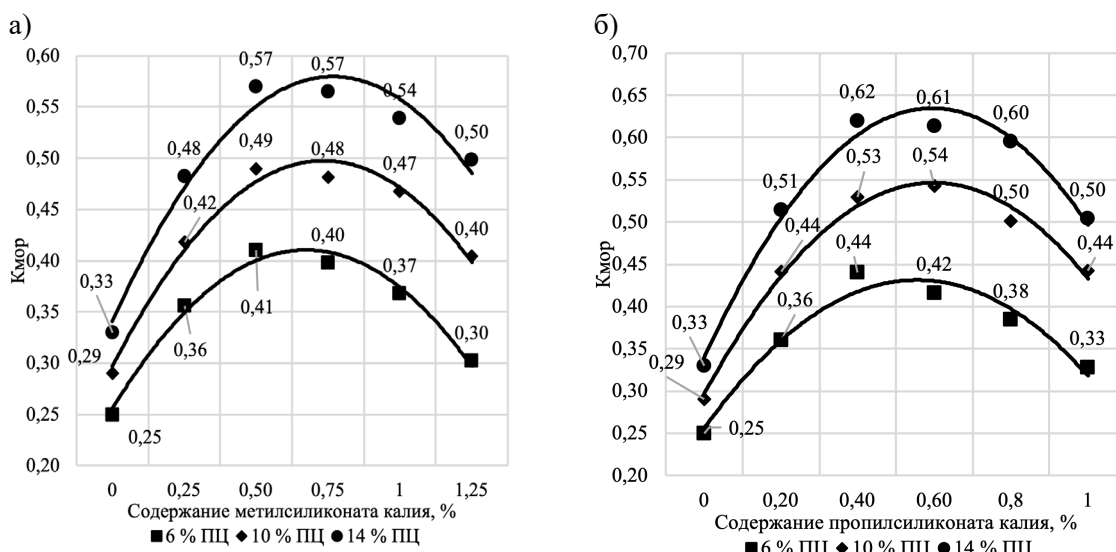


Рис. 5 – Зависимость влияния кремнийорганических соединений на коэффициент морозостойкости модифицированных цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the freeze-thaw resistance coefficient of modified soil-cement (illustration by the authors)

Установлено, что наиболее эффективным в повышении морозостойкости цементогрунтов является пропилсиликонат калия, что обусловлено строением и объемом радикала. В данном случае, увеличение радикала до C_3H_7 (пропил) обеспечило увеличение уровня морозостойкости в отличие от метилсиликоната калия с радикалом CH_3 (метил).

4. Заключение

- Установлено увеличение эффективности повышения уровней морозостойкости дорожных цементогрунтов при применении кремнийорганических модификаторов: метил- и пропилсиликонатов калия, что обусловлено увеличением объема углеводородного радикала.

- Выявлено, что модификация цементогрунтов исследованными кремнийорганическими соединениями обеспечивает повышение предела прочности на сжатие в пределах от 30 до 45 %, предела прочности на растяжение при изгибе от 28 до 40 %, коэффициента морозостойкости от 64 до 88 % по сравнению с немодифицированными составами.

- Показано, что при равных уровнях прочностных показателей модифицированных цементогрунтов, влияние пропилсиликоната калия способствует более значительному повышению уровня морозостойкости - на 10-20 %.

- Выявлено, что с увеличением объема радикала кремнийорганического модификатора возможно снижение оптимального содержания модификатора в дорожных цементогрунтах при повышении характеристик материалов дорожных одежд. Применение пропилсиликоната калия обеспечивает снижение его оптимального содержания в дорожных цементогрунтах с различным количеством портландцемента на 20 % по сравнению с метилсиликонатом калия.

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. 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.
 4. Yao X., Junfeng G., Guan W. Effects of soil grading and sand content on soil-cement properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. No. 304. P. 052038. doi: 10.1088/1755-1315/304/5/052038.
 5. Vo B.H., Dinh H.L., Dang N.L. Materials Characteristics of Soil-cement Samples under Various Maintenance Conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2023. 1289. P. 012063 doi:10.1088/1757-899X/1289/1/012063.
 6. Ezreig A.M.A., Ismail M.A.M., Ehwaitat K.I.A. Hydrophobic Effect of Soil Stabilization for a Sustainable Subgrade Soil Improvement. *Materials*. 2022. No. 15. P. 3087. doi: 10.3390/ma15093087.
 7. 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.
 8. Низамов, Р К Обоснование эффективности наполнения ПВХ-композиций тонкодисперсными отходами металлургических производств / Низамов Р К, Галеев Р Р , Абдрахманова Л А , Хозин В Г, Наумкина Н И , Лыгина Т.З //Строит материалы - 2005 - №7. - С 18-19.[Nizamov, R K Substantiation of the effectiveness of PVC compositions filling with finely dispersed waste from metallurgical industries / Nizamov R K, Galeev R R, Abdrakhmanova L A , Khozin V G, Naumkina N I, Lygina T.Z //Builds materials - 2005 - No. 7. - P. 18-19.]
 9. Węgliński S. Capillary water absorption in mixtures of cohesive soils stabilized with cement and hydrophobic agent. *Budownictwo i Architektura*. 2021. No. 20(2). P. 15-28. doi: 10.35784/bud-arch.2422.
 10. Vdovin E., Bulanov P., Stroganov V., Mavliev L. Physical and Mechanical Characteristics of Modified Soil Cement with Polycarboxylate Superplasticizers. *Proceedings of STCCE*. 2022. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. No. 291. P. 125-133. doi: 10.1007/978-3-031-14623-7_10.
 11. Al-Kheetan M.J., Rahman M.M., Chamberlain D.A. Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020. Vol. 21. No. 14. P. 1746-1754. doi: 10.1080/10298436.2019.1567917.
 12. 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(3). P. 103418. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
 13. Galeev, R., Nizamov, R., Abdrakhmanova, L., Khozin, V.: Resource-saving polymer compositions for construction purposes. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2020)*. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012111.
 14. Asgari M., Sundararaj U. Silane functionalization of sodium montmorillonite nanoclay: The effect of dispersing media on intercalation and chemical grafting. *Applied Clay Science*. 2018. No. 153. P. 228-238. doi: 10.1016/j.clay.2017.12.020.
 15. She W., Yang J., Hong J., Sun D., Mu S., Miao C. Superhydrophobic concrete with enhanced mechanical robustness: Nanohybrid composites, strengthen mechanism and durability evaluation. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 247(12). P. 118563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118563.
 16. Huang C.H., Fang H.Y., Zhang J.Z. The properties of hydrophobic concrete prepared by biomimetic mineralization method. *Computers and Concrete*. 2019. No. 23(5). P. 351-359. doi: 10.12989/cac.2019.23.5.351.

17. Mundo R.D., Labianca C., Carbone G., Notarnicola M. Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete. *Coatings*. 2020. No. 10(5). P. 449. doi: 10.3390/COATINGS10050449.
18. Bao J., Hu W., Zhang P., Li Z., Lei F., Zhao T. (2020). Effect of Organic Silicon Hydrophobic Agent on Strength and Capillary Absorption of Concrete. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2020. No. 48(10). P. 1644-1652. doi: 10.14062/j.issn.0454-5648.20200283.
19. Батраков, В.Г. О взаимосвязи адсорбционных характеристик полиорганосилоксанов и технических свойств бетонной смеси и бетонов / В.Г. Батраков, О.П. Гень, Ф.М. Иванов // Коллоидный журнал. – 1979. – № 5 – С. 842-848. [Batratkov, V.G. On the relationship of adsorption characteristics of polyorganosiloxanes and technical properties of concrete mixture and concretes / V.G. Batratkov, O.P. Gen, F.M. Ivanov // Colloidal Journal. – 1979. – No. 5 – pp. 842-848.]
20. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Батраков. – М.: Высшая школа, 1998. – 768 с.). [Batratkov, V.G. Modified concrete. Theory and practice. 2nd ed., reprint. and additional / V.G. Batratkov. – M.: Higher School, 1998. – 768 p.]

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

Строганов Виктор Федорович, доктор химических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: svf08@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: pavel.bulanov1991@yandex.ru

Viktor F. Stroganov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: svf08@mail.ru