



Research Article

Received: November 10, 2023

Accepted: December 11, 2023

Published: December 28, 2023

ISSN 2304-6295

Complex modification of soil cement for road pavements

Vdovin, Evgeniy Anatolievich¹ Bulanov, Pavel Efimovich^{1*} Stroganov, Victor Fedorovich¹ Morozov, Vladimir Petrovich²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; vdovin007@mail.ru (V.E.A.); pavel.bulanov1991@yandex.ru (B.P.E.); svf08@mail.ru (S.V.F.)

²Kazan (Volga region) Federal University, Russian Federation; vladimir.morozov@kpfu.ru (M.V.P.)

Correspondence: * pavel.bulanov1991@yandex.ru; contact phone +79520444348

Keywords:

Soil-cement; Organosilicon compound; Polycarboxylate superplasticizer; Electrolyte; Optimization; Complex modification

Abstract:

The study's relevance is justified by the need to ensure the required strength and frost resistance of soil-cement layers of road pavements in road-climatic zones with seasonal and daily temperature changes, especially with frequent transitions through 0 °C. **The object of research** is modified soil cement for road pavements. This work aims to develop soil-cement compositions with complex modification with an organosilicon compound, a polycarboxylate superplasticizer, and an electrolyte. **Method.** The compositions of complex-modified soil cement were optimized using the second-order rotatable planning method. Potassium methylsiliconate, polycarboxylate superplasticizer, and sodium hydroxide percentages were selected as variable factors. The X-ray phase analysis method used an automatic X-ray diffractometer Bruker D8 Advance to determine the mineralogical composition and identify the products of new formations during the hardening of modified soil cement. The construction and analysis of diffraction patterns were performed using the Bruker Diffrac Eva program. **Results.** It was established that the complex modification of soil-cement with potassium methyl silicone, polycarboxylate superplasticizer, and sodium hydroxide provided an increase in the compressive strength by 95 %, the tensile strength in bending by 132 %, and the frost resistance coefficient by 129 % with a Portland cement content of 8 %. Strength grade M40 and frost resistance grade F15 were achieved with the introduction of Portland cement in an amount of 8 % and a complex of modifiers: potassium methyl siliconate – 0.4 %, polycarboxylate superplasticizer – 0.35 %; sodium hydroxide – 0.1 %. X-ray phase analysis was used to establish that introducing a complex of modifiers into cement soils increases the amount of portlandite by 81 %, calcium hydrosilicates by 50 %, and reduces the content of residual clinker minerals C₃S and C₂S by 61 %. An increased amount of amorphous phase from 27 % to 29.9 % in the form of tobermorite gel in cement soils indicates a more significant number of new formations. The main reflection of calcite CaCO₃, as a product of calcium hydroxide carbonation, is reduced in the modified cement soil sample by 18.9 %.

1 Introduction

Цементогрунтом называется 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 цементогрунтов перед традиционными материалами конструкций дорожных одежд являются: снижение стоимости строительства, экологической нагрузки на

Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V

Complex modification of soil-cement for road pavements;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10928. doi: 10.4123/CUBS.109.28



окружающую среду, числа технологических операций на доставку и укладку материалов [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 при попеременном замораживании-оттаивании, эти минералы обуславливают возможность развития процессов разрушения конструктивных слоев дорожных одежд, приводящих к сокращению срока службы автомобильных дорог [6], [7].

В исследованиях [8], [9] установлено, что добавление в грунт только цемента недостаточно для достижения требуемого уровня характеристик по прочности и морозостойкости. Требуемые физико-механические свойства цементогрунтов возможно обеспечить или при повышении содержания вяжущего, или при введении модифицирующих добавок.

Исследования показали [10], что одними из наиболее эффективных модификаторов для снижения водопоглощения и повышения морозостойкости являются гидрофобизаторы. В качестве гидрофобизаторов известно применение водорастворимых кремнийорганических соединений – силанов, силоксанов и др. [11], [12].

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 [13].

Перспективными модификаторами для цементно-минеральных систем являются и поликарбоксилаты, которые в отличие от известных суперпластификаторов, по данным J. Plank и С. Hirsch [14], способствуют положительному изменению морфологии гидратных новообразований и уменьшению размеров кристаллов этtringита. Отмечается также возможность образования стабильных органоминеральных фаз за счет встраивания полимерного модификатора в пластинчатую структуру гидроалюмината кальция [15], [16].

Суперпластификаторы повышают пептизацию цементных флокул в результате адсорбции на поверхности частиц и гидратных фазах вяжущего и образования электростатического заряда при высвобождении иммобилизованной воды [17]. Преимущество суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов обусловлено наличием как акрилатных групп в основной цепи, так и боковых цепей, направленных в сторону порового раствора от цементных флокул, обеспечивающих стерический эффект [18], [19].

Полученные ранее положительные результаты модифицирования цементогрунтов поликарбоксилатными пластификаторами [20] объясняются эффектом воздействия как на глинистые минералы грунтов, так и на цементную систему. Теоретически предполагают существование двух основных взаимодействий глинистых минералов с поликарбоксилатами [19], [21]:

- электростатическое взаимодействие между положительно заряженными участками поверхности глины и отрицательно заряженными группами пластификатора в поровом растворе цемента;
- интеркаляция боковых цепей пластификатора между алюмосиликатными слоями глинистых минералов, с помощью водородных связей.

Важно отметить, что применение электролитов для модификации цементогрунтов приводит к замене в комплексе грунта одного химического основания на другое, сопровождающееся глубокими изменениями всего строения грунта. В случае, когда поглощающий комплекс насыщен двухвалентными основаниями концентрация катионов в растворе грунта достаточна для процесса коагуляции частиц и, следовательно, достаточна и для формирования в нем микроструктуры. При насыщении поглощающего комплекса в основной массе соединениями натрия в грунте не происходят процессы коагуляции и все минеральные, органические и органоминеральные частицы существуют отдельно. Это обусловлено тем, что концентрация иона натрия в растворе находится ниже его электролитического порога вследствие малой коагулирующей способности этого катиона [22].



В связи с изложенным, целью работы является разработка составов дорожных цементогрунтов при комплексном модифицировании кремнийорганическим соединением, поликарбоксилатным суперпластификатором и электролитом.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния портландцемента на физико-механические характеристики цементогрунтов;
- оптимизация состава цементогрунтов, комплексно-модифицированных кремнийорганическим соединением, поликарбоксилатным суперпластификатором и электролитом;
- исследование влияния модификаторов на фазовый состав цементогрунтов.

2 Materials and Methods

Для проведения исследований использовали пробы глинистого грунта Лебяжского месторождения Республики Татарстан. Число пластичности грунта определяли как разность влажности грунта на границе текучести (24.78 %) и влажности грунта на границе раскатывания (19.12 %), что соответствовало значению – 0.057. Содержание песчаных частиц (2.00–0.05 мм) в грунте по массе составляло 46.73 %. В соответствии с Российским государственным стандартом ГОСТ 25100–2020 [23] глинистый грунт относится к супеси пылеватой.

В качестве вяжущего использовали портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42.5Н ЗАО «Вольскцемент» (г. Вольск, Россия), который вводили в количестве 5 %, 8 % и 11 % от массы грунта и следующие модификаторы: метилсиликонат калия (МСК) и эфир поликарбоксилата (ПКС) и гидроксид натрия (ГН).

Содержание воды в модифицированных цементогрунтовых смесях рассчитывали 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 проводили после водонасыщения образцов в течение 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 Российскому государственному стандарту ГОСТ 23558–94 [24].

Экспериментальные данные физико-механических испытаний статистически обрабатывали с определением среднеарифметических значений результатов испытаний, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации и количества образцов, необходимых для получения результатов с заданной степенью точности. В экспериментальных исследованиях физико-механических свойств цементогрунтов коэффициент вариации составил не более 5 %. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента минимальное количество образцов в каждой серии испытаний принято не менее трех при изучении свойств цементогрунта, что удовлетворяет требованиям Российского государственного стандарта ГОСТ 10180–2012 [25]. При описании математического объекта исследований применялось ротатабельное планирование второго порядка.

Рентгенофазовый анализ применен для определения минералогического состава, изменения и идентификации продуктов новообразований в процессе твердения укрепленных грунтов с модификаторами. Эксперименты проводили на автоматическом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance, оборудованном приставкой Vario и линейным координатным детектором Vantec. Использовали $CuK\alpha$ излучение, монохроматизированное ($\lambda(Cu-K) = 1.54184 \text{ \AA}$) германиевым изогнутым монохроматором Йохансона, режим работы рентгеновской трубки 40 kV, 40 mA. Эксперименты выполняли при комнатной температуре в геометрии Брэгг-Брентано с плоским образцом. Построение и анализ дифрактограмм выполняли с использованием программы Bruker Diffrac Eva.

3 Results and Discussion

Установлено, что при увеличении количества ПЦ повышаются уровень физико-

механические свойства цементогрунтов. Марка М40, требуемая для строительства оснований и покрытий дорожных одежд, по Российскому государственному стандарту ГОСТ 23558–94 [25] достигается только при введении 11 % ПЦ, однако марка по морозостойкости F15 не обеспечивается (рисунок 1).

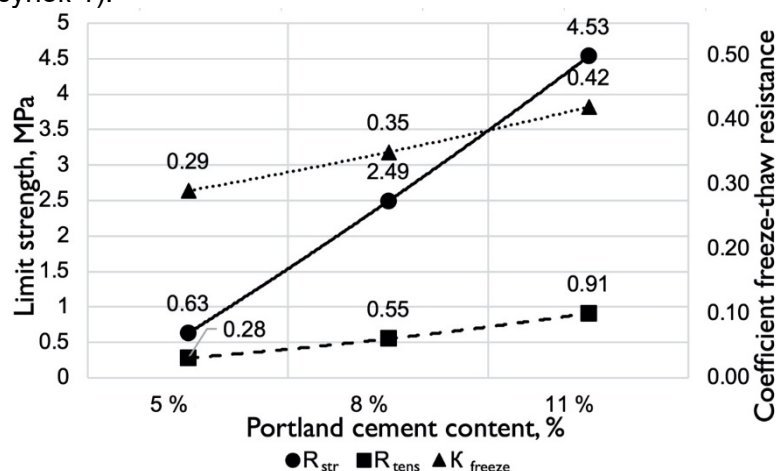


Fig. 1 - The influence of the amount of Portland cement on the physical and mechanical properties of soil-cement

Рис. 1 - Влияние количества портландцемента на физико-механические свойства цементогрунтов

Для повышения физико-механических свойств и снижения количества вяжущего ПЦ выполнена комплексная модификация цементогрунтов.

Оптимизацию состава модифицированного цементогрунта проводили по методу математического планирования эксперимента. В качестве переменных факторов выбирали процентные содержания: ГН (X1), МСК (X2) и ПКС (X3) (таблица 1).

Table 1. Coded and natural values of variable factors

Таблица 1 - Кодированные и натуральные значения переменных факторов

ПЕРВЫЙ ФАКТОР	ВТОРОЙ ФАКТОР	ТРЕТИЙ ФАКТОР
X1- ГН	X2 - МСК	X3 - ПКС
Основное значение	Основное значение	Основное значение
X1 _o	X2 _o	X3 _o
0.1	0.5	0.3
Интервал варьирования	Интервал варьирования	Интервал варьирования
ΔX1	ΔX2	ΔX3
0.05	0.25	0.15

В качестве параметров оптимизации (функций отклика) приняты показатели:

R_{сж} – предела прочности на сжатие, МПа;

R_{изг} – предела прочности на растяжение при изгибе, МПа;

K_{мор} – коэффициента морозостойкости.

Уравнения регрессии представлены в виде полинома второй степени:

$$R_{сж} = 0.2546 + 20.9785 \cdot X_1 + 5.9364 \cdot X_2 + 9.9189 \cdot X_3 + 0.8571 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2.3810 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.285 \cdot X_2 \cdot X_3 - 89.6039 \cdot X_1^2 - 5.8958 \cdot X_2^2 - 12.7933 \cdot X_3^2;$$

$$R_{изг} = -0.2999 + 8.4594 \cdot X_1 + 2.1160 \cdot X_2 + 3.5274 \cdot X_3 + 0.1905 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.6349 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.0635 \cdot X_2 \cdot X_3 - 38.2665 \cdot X_1^2 - 2.0951 \cdot X_2^2 - 4.9238 \cdot X_3^2;$$

$$K_{мор} = -0.1923 + 2.7016 \cdot X_1 + 1.7545 \cdot X_2 + 1.8419 \cdot X_3 + 0.1905 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1.871 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.3175 \cdot X_2 \cdot X_3 - 13.4357 \cdot X_1^2 - 1.3707 \cdot X_2^2 - 2.3888 \cdot X_3^2.$$

Расчетные значения F – критерия Фишера (оценка адекватности) для функций R_{сж}, R_{изг}, K_{мор} равны соответственно 4.62; 0.56; 3.62, т.е. меньше табличного, которое при уровне значимости 5 % равно 5.05. Это свидетельствует о том, что уравнения адекватны.

По полученным уравнениям регрессии построены функции отклика в виде двухпараметрических зависимостей. На рисунках 2–4 приведены зависимости предела прочности на сжатие (R_{сж}), предела прочности на растяжение при изгибе (R_{изг}) и коэффициента

морозостойкости ($K_{мор}$) от содержания модификаторов МСК и ПКС при ГН 0.05 %, 0.10 % и 0.15 %. Содержание ПЦ составляло 8 %

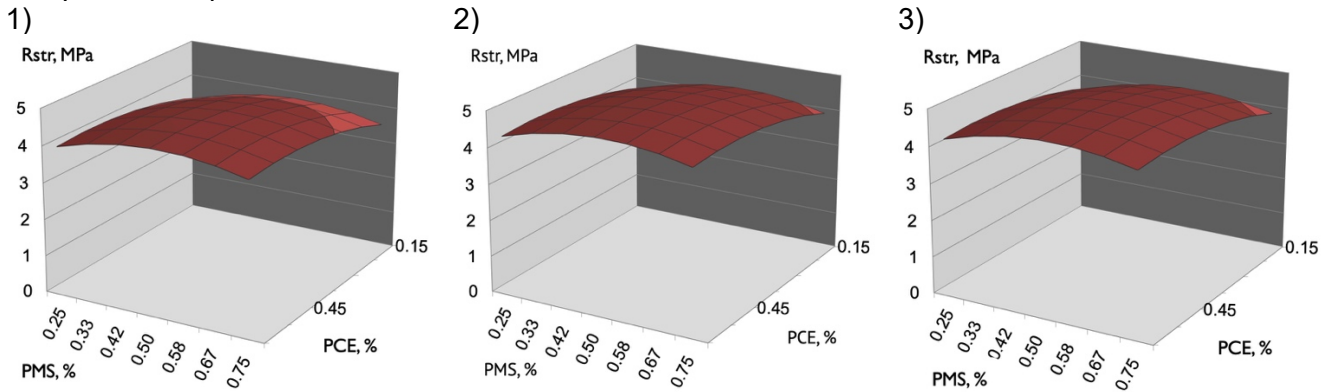


Fig. 2 - Dependencies of the influence of potassium methyl silicate, polycarboxylate superplasticizer, and sodium hydroxide on the compressive strength of modified soil-cement: 1 - with the amount of sodium hydroxide – 0.05 %; 2 - with the amount of sodium hydroxide – 0.1 %; 3 - with the amount of sodium hydroxide – 0.15 %

Рис. 2 - Зависимости влияния МСК, ПКС и ГН на предел прочности при сжатии модифицированных цементогрунтов: 1) при ГН 0.05 % и ПЦ 8 %; 2) при ГН 0.1 % и ПЦ 8 %; 3) при ГН 0.15 % и ПЦ 8 %

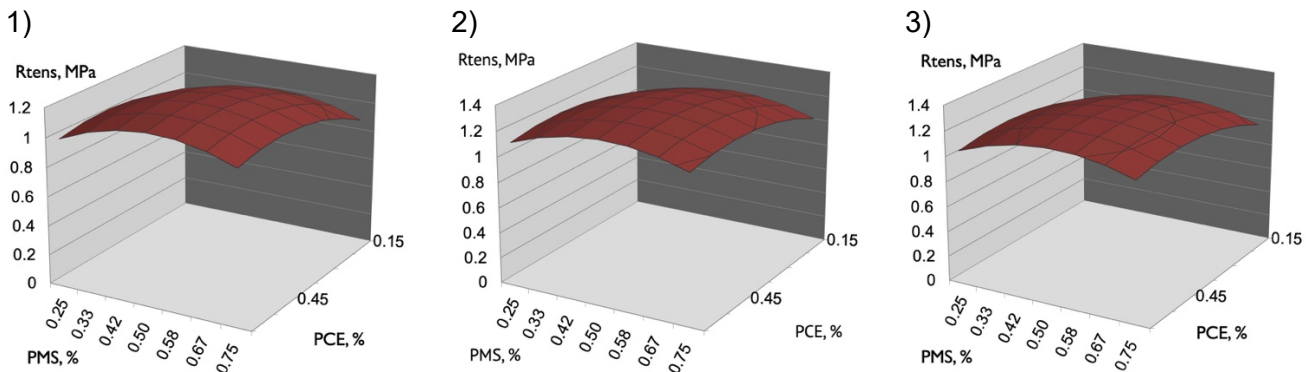


Fig. 3 - Dependencies of the influence of potassium methyl silicate, polycarboxylate superplasticizer, and sodium hydroxide on the tensile strength in bending of modified soil-cement: 1 - with the amount of sodium hydroxide – 0.05 %; 2 - with the amount of sodium hydroxide – 0.1 %; 3 - with the amount of sodium hydroxide – 0.15 %

Рис. 3 - Зависимости влияния МСК, ПКС и ГН на предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов 1) при ГН 0.05 % и ПЦ 8 %; 2) при ГН 0.1 % и ПЦ 8 %; 3) при ГН 0.15 % и ПЦ 8 %

Результаты анализов графиков рисунков 2-4 подтвердили эффективность комплексного модификации цементогрунтов.

Комплексное введение модификаторов МСК и ПКС обеспечило увеличение предела прочности на сжатие до 82 %, 95 % и 92 % при содержании ГН 0.05 %, 0.1 % и 0.15 % соответственно. Наибольший эффект достигается при введении модификаторов МСК – 0.5 %, ПКС – 0.4 % и ГН – 0.1 % с расходом ПЦ 8 %.

Предел прочности на растяжение при изгибе увеличился до 118 %, 132 % и 130 % при содержании ГН 0.05 %, 0.1 % и 0.15 % соответственно. Наибольший эффект достигается при введении модификаторов МСК – 0.5 %, ПКС – 0.35 % и ГН – 0.1 % с расходом ПЦ 8 %.

Также отмечено увеличение коэффициента морозостойкости до 117 %, 129 % и 120 % при содержании ГН 0.05 %, 0.1 % и 0.15 % соответственно. Наибольший эффект достигается при введении модификаторов МСК – 0.58 %, ПКС – 0.35 % и ГН – 0.1 % с содержанием ПЦ 8 %.

Марка по прочности М40 и марка по морозостойкости F15 достигнута при введении комплекса модификаторов МСК – 0.4 %, ПКС – 0.35 % и ГН – 0.1 % при 8 % ПЦ.

1) 2) 3)

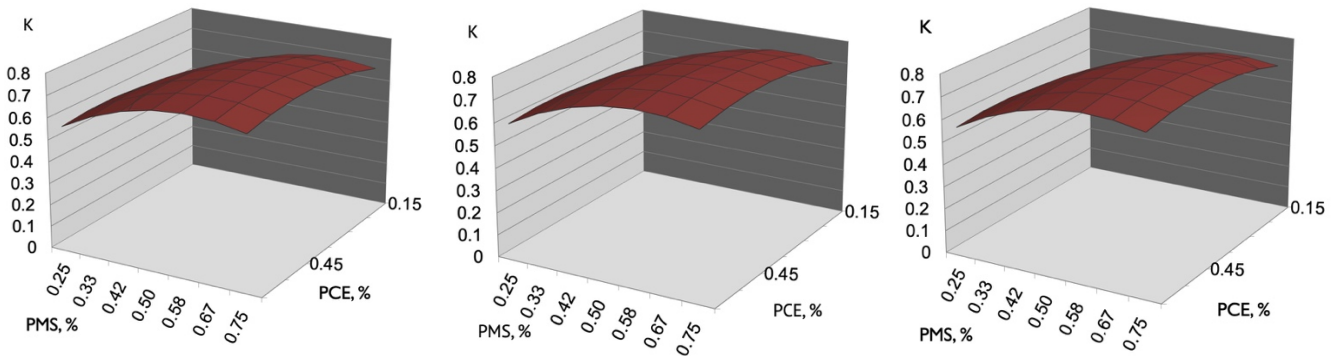


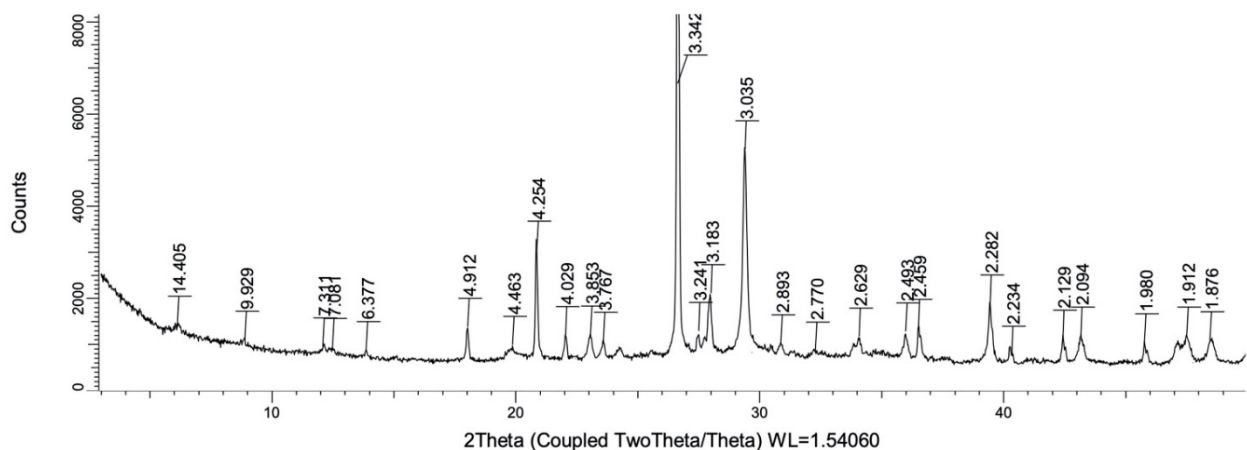
Fig. 4 - Dependencies of the influence of potassium methyl silicate, polycarboxylate superplasticizer, and sodium hydroxide on the frost resistance coefficient of modified soil-cement: 1 - with the amount of sodium hydroxide – 0.05 %; 2 - with the amount of sodium hydroxide – 0.1 %; 3 - with the amount of sodium hydroxide – 0.15 %

Рис. 4 - Зависимости влияния МСК, ПКС и ГН на коэффициент морозостойкости модифицированных цементогрунтов: 1) при ГН 0.05 % и ПЦ 8 %; 2) при ГН 0.1 % и ПЦ 8 %; 3) при ГН 0.15 % и ПЦ 8 %

Методом рентгенофазового анализа (рисунок 5) установлено, что введение комплексного модификатора в цементогрунт обеспечивает повышение количества портландита на 81 %, гидросиликатов кальция на 50 % и снижение содержания остаточных клинкерных минералов C_3S и C_2S на 61 %. Увеличенное количество аморфной фазы с 27 % до 29.9 % в виде тоберморитового геля в цементогрунтах свидетельствует о большем количестве новообразований. Основное отражение кальция $CaCO_3$, как продукта карбонатизации гидроксида кальция, характеризуется снижением интенсивности в модифицированном цементогрунте - на 18.9 %.

Учитывая климатические особенности эксплуатации материалов дорожных одежд, следует отметить, что одно из важных значений в модификации цементогрунтов имеет процесс гидрофобизации. Этот процесс основан на ориентированной хемосорбции молекул гидрофобизатора на твердой поверхности материалов. Для обеспечения устойчивости водоотталкивающих покрытий необходимо, чтобы полярные группы гидрофобизатора были химически связаны с поверхностными атомами или ионами обрабатываемых поверхностей. Эти связи образуются в процессе адсорбции кремнийорганических соединений и при протекании поверхностных химических реакций реакционноспособных функциональных групп, входящих в состав гидрофобизатора [26].

1



2

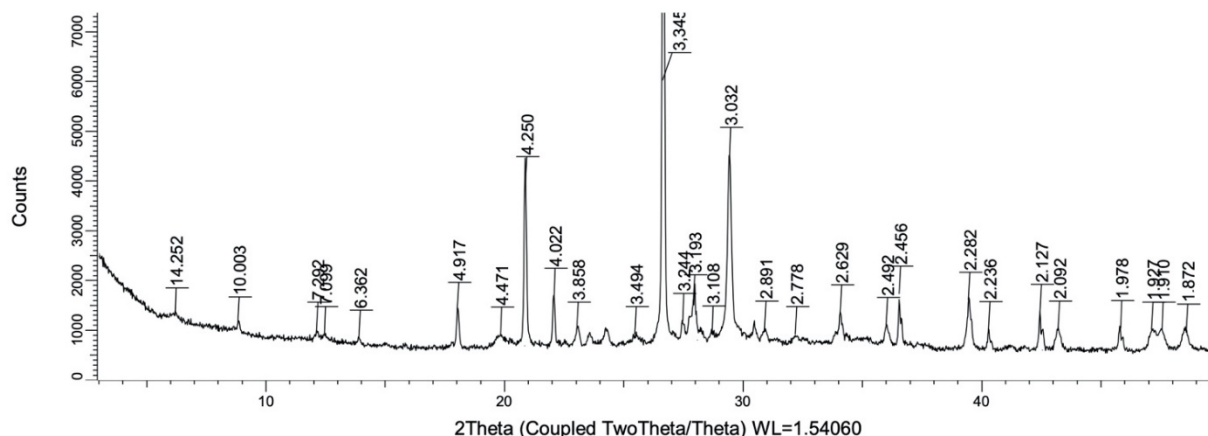


Fig. 5 – X-ray diffraction patterns of laboratory soil-cement 1 – complex modified soil-cement; 2 – unmodified soil-cement

Рис. 5 – Дифрактограммы лабораторных цементогрунтов 1 – комплексно-модифицированный цементогрунт; 2 – немодифицированный цементогрунт

Взаимодействия кремнийорганических соединений различного строения в цементно-минеральных системах (рис. 6) обеспечивает эффективность процесса 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. 6 б), способствует образованию структуры материала с большей долговечностью [27].

Кроме этого, согласно исследованиям [19, 29–30] молекулы ПКС способны образовывать с ионами Ca^{2+} метастабильные комплексы, что приводит к снижению основности гидросиликатов. При взаимодействии с C_3A они способны встраиваться в структуру образующихся гидратов с образованием стабильных органоминеральных фаз [30]. На основании этого можно заключить, что ионы Ca^{2+} карбоната кальция участвуют в реакции с поликарбоксилатом с образованием иных соединений, не идентифицирующихся с помощью РФА и ДТА.

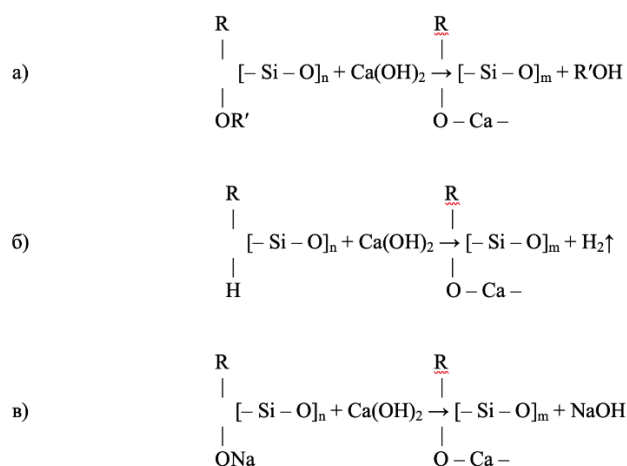


Fig. 6 - Chemical reactions in cement-mineral systems modified with various organosilicon compounds: a) polyorganoalkoxysiloxanes, b) polyhydrosiloxanes, c) sodium polyalkylsiliconate

Рис. 6 – Химические реакции в цементно-минеральных системах, модифицированных различными кремнийорганическими соединениями: а) полиорганалкоксисилоксанами, б) полигидросилоксанами, в) полиалкилсиликонатами натрия

4 Conclusions

1. Установлено, что при увеличении количества ПЦ повышаются уровень физико-механические свойства цементогрунтов. Марка М40, требуемая для строительства оснований и покрытий дорожных одежд, по Российскому государственному стандарту ГОСТ 23558–94,



достигается только при введении 11 % ПЦ, однако марка по морозостойкости F15 не обеспечивается.

2. Комплексная модификация цементогрунтов метилсиликонатом калия, поликарбоксилатным суперпластификатором и гидроксидом натрия обеспечивает возможность повышения предела прочности при сжатии на 95 %, предела прочности на растяжение при изгибе на 132 %, коэффициента морозостойкости на 129 % при содержании портландцемента 8 %. Марка по прочности М40 и марка по морозостойкости F15 достигнута при введении портландцемента в количестве 8 % и комплекса модификаторов: метилсиликоната калия – 0.4 %, поликарбоксилатного суперпластификатора – 0.35 %; гидроксида натрия – 0.1 %.

3. Методом рентгенофазового анализа установлено, что введение комплекса модификаторов в цементогрунты позволяет повысить количество портландита на 81 %, гидросиликатов кальция на 50 % и снизить содержанием остаточных клинкерных минералов C_3S и C_2S на 61 %. Увеличенное количество аморфной фазы с 27 % до 29.9 % в виде тоберморитового геля в цементогрунтах свидетельствует о большем количестве новообразований. Основное отражение кальцита $CaCO_3$, как продукта карбонатизации гидроксида кальция, характеризуется снижением интенсивности в модифицированных цементогрунтах - на 18.9 %.

References

1. Abbey, S.J., Eyo, U.E., Okeke, C.A.U., Ngambi, S. (2021) Experimental study on the use of RoadCem blended with by-product cementitious materials for stabilisation of clay soils. *Construction and Building Materials*, **280**, 122476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122476>.
2. Jiang, N.-J., Du, Y.J., Liu, K. (2018) Durability of Lightweight Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Stabilize Clayey Soils Subjected to Sulfate Attack. *Applied Clay Science*, **161**, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.014>.
3. Vdovin, E.A., Bulanov, P.E., Mavliev, L.F. (2022) Physical and mechanical characteristics of soil stabilized with quicklime for road bed. *Construction of Unique Buildings and Structure*, **105**, 10503. <https://doi.org/10.4123/CUBS.105.3>.
4. Yao, X., Junfeng, G., Guan, W. (2019) Effects of soil grading and sand content on soil-cement properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **304**, 052038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052038>.
5. Vo, B.H., Dinh, H.L., Dang, N.L. (2023) Materials Characteristics of Soil-cement Samples under Various Maintenance Conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **1289**, 012063 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1289/1/012063>.
6. Ezreig, A.M.A., Ismail, M.A.M., Ehwalat, K.I.A. (2022) Hydrophobic Effect of Soil Stabilization for a Sustainable Subgrade Soil Improvement. *Materials*, **2022**, **15**, 3087. <https://doi.org/10.3390/ma15093087>.
7. Cai, Y., Xu, L., Liu, W., Shang, Y., Su, N., Feng, D. (2020) Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **128**, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105878>.
8. Węgliński, S. (2021) Capillary water absorption in mixtures of cohesive soils stabilized with cement and hydrophobic agent. *Budownictwo i Architektura*, **20(2)**, 15-28. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.2422>.
9. Vdovin, E., Bulanov, P., Stroganov, V., Mavliev, L. (2023) Physical and Mechanical Characteristics of Modified Soil Cement with Polycarboxylate Superplasticizers. *Proceedings of STCCE. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, **291**, 125-133. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_10.
10. Vdovin, E.A., Bulanov, P.E., Stroganov, V.F. (2023) Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds. *News KSUAE*, **4(66)**, 301-309, https://doi.org/10.52409/20731523_2023_4_301.
11. Al-Kheetan, M.J., Rahman, M.M., Chamberlain, D.A. (2020) Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. *International Journal of Pavement Engineering*, **21(14)**, 1746-1754. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567917>.
12. Roshan, K., Choobbasti, A., Soleimani, K., Fakhrabadi, A. (2021) The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of liginosulfonate stabilised clayey



- sand. *Cold Regions Science and Technology*, **193(3)**, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103418>.
13. Asgari, M., Sundararaj, U. (2018) Silane functionalization of sodium montmorillonite nanoclay: The effect of dispersing media on intercalation and chemical grafting. *Applied Clay Science*, **153**, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.020>.
 14. Liu, Q., Chen, Zh., Yang, Y. (2021) Model of the charged mosaic surface of the cement particle based on the adsorption behavior of surfactants using ATR-FTIR spectroscopy. *Materials Science*, **215**, 108802. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108802>.
 15. Kanchanason, V., Plank, J. (2019) Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of slag and calcined clay blended cements. *Cement and Concrete Research*, **119(1)**, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.007>.
 16. Kanchanason, V., Plank, J. (2018) Effectiveness of a calcium silicate hydrate – Polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement. *Construction and Building Materials*, **169**, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.053>.
 17. Ilg, M., Plank, J. (2019) Non-adsorbing small molecules as auxiliary dispersants for polycarboxylate superplasticizers. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, **587**, 124307. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124307>.
 18. Akhlaghi, O., Menciloglu, Y.Z., Akbulut, O. (2017) Poly(carboxylate ether)-based superplasticizer achieves workability retention in calcium aluminate cement. *Scientific Reports*, **7**, 41743. <https://doi.org/10.1038/srep41743>.
 19. Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C., Hong, J.X. (2015) Chemical admixtures – Chemistry, Applications and Their Impact on Concrete Microstructure and Durability. *Cement and Concrete Research*, **78**, 81-99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.
 20. Bulanov, P.E., Mavliev, L.F., Vdovin, E.A., Stroganov, V.F., Asadullina, A.R., Safin, D.R. (2017) Effect of water-reducing agents with various chemical bases on the physical and technical properties of clay soils reinforced by Portland cement. *News KSUAE*, **4(42)**, 384-391. https://izvestija.kgasu.ru/files/4_2017/384_391_Bulanov_Mavliev.pdf?ysclid=lqp9798e50822691684.
 21. Meier, M.R., Lei, L., Rinkenburger, A., Plank, J. (2020) Crystal Growth of $[Ca_3Al(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 2H_2O$ (Ettringite) Studied Under Microgravity Conditions. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, **35(5)**, 893-899. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2335-0>.
 22. Vdovin, E.A., Mavliev L.F., Bulanov, P.E. (2015) Interaction of complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide. *News KSUAE*, **1(31)**, 165-170. https://izvestija.kgasu.ru/files/1_2015/165_170_Vdovin_Mavliev.pdf?ysclid=lqp97z4r51593936227.
 23. GOST 25100-2020 Soils. Classification. <https://docs.cntd.ru/document/1200174302?ysclid=lpqpa59s3m359102439>.
 24. GOST 23558-94 Crushed stone-gravel-sandy mixtures, and soils treated by inorganic binders for road and airfield construction. Specifications. <https://docs.cntd.ru/document/901705984?ysclid=lpqpdmio1a374200587>
 25. GOST 10180-2012 Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. <https://docs.cntd.ru/document/1200100908?ysclid=lpqpglk1xb933065282>
 26. She, W., Yang, J., Hong, J., Sun, D., Mu, S., Miao, C. (2020) Superhydrophobic concrete with enhanced mechanical robustness: Nanohybrid composites, strengthen mechanism and durability evaluation. *Construction and Building Materials*, **247(12)**, 118563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118563>.
 27. Huang, C.H., Fang, H.Y., Zhang, J.Z. (2019) The properties of hydrophobic concrete prepared by biomimetic mineralization method. *Computers and Concrete*, **23(5)**, 351-359. <https://doi.org/10.12989/cac.2019.23.5.351>.
 28. Mukhametrakhimov, R.Kh., Lukmanova, L.V. (2021) Influence of Portland cements with different mineralogical composition on basic properties of 3D-printed composites. *News KSUAE*, **2(56)**, 37–49. https://doi.org/10.52409/20731523_2021_2_37.



29. Plank, J., Keller H., Andres P. (2006) Novel Organo-Mineral Phases Obtained by Interaction of Maleicanhydrite-Allyl Ether Copolymers into Layered Calcium Aluminum Hydrates. *Inorganic Chemical Acta*, **359**, 4901–4908. <http://www.bauchemie.ch.tum.de/master-framework/data/dynamic/Image/47.pdf>.
30. Gubaidullina, A.M., Lygina T.Z., Khalitova A.N., Panina A.A. (2012) Study of the processes of hydration and hardening of Portland cement using thermal analysis methods. *Bulletin of Kazan Technological University*, **15**, 15-17. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18249637&ysclid=lqpadvxzud478142012>.