

УДК: 625.7/8; 691.3; 625.068.2
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.24
EDN: VCGQEM



Изменение ионно-обменного комплекса укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд

Е.А. Вдовин¹, В.Ф. Строганов¹, П.Е. Буланов¹, Д.Р. Выборнов¹

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

Аннотация: *Постановка задачи.* Повышение транспортных нагрузок и интенсивности движения на автомобильных дорогах, отсутствие прочных каменных материалов и высокая стоимость их транспортировки в регионы страны обуславливает необходимость совершенствования технологий укрепления глинистых грунтов в дорожном строительстве. Одним из перспективных подходов повышения эффективности технологии укрепления глинистых грунтов является применение электролитов с целью изменения ионно-обменного комплекса на основе взаимодействия глинистых минералов с щелочами, изменения процессов коагуляции и осаждения коллоидной фазы грунтов, обеспечивающих снижение оптимальной влажности, увеличение прочности и морозостойкости материалов слоев дорожных одежд. В этой связи актуальным является разработка метода модификации укрепленных глинистых грунтов в слоях дорожных одежд изменением ионно-обменного комплекса. Целью работы является исследование влияния метода модификации «Изменения ионно-обменного комплекса» на физико-механические характеристики укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд. Задачи: установить степень влияния метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на физико-механические свойства укрепленных глинистых грунтов с применением электролитов различной валентности; определить оптимальное содержание электролитов; исследовать влияние метода модификации на уровень водородного показателя укрепленных глинистых грунтов; установить зависимости влияния содержания наиболее эффективного модификатора на уровни физико-механических свойств укрепленных грунтов.

Результаты. Установлена эффективное влияние модификации укрепленных глинистых грунтов на их физико-механические свойства. Применение электролитов более низкой катионной валентности в рамках одной анионной группы, обеспечивает наибольшее повышение щелочности среды и создание более благоприятных условий для процессов взаимодействия грунтов с вяжущими. В ряду исследованных электролитов наиболее эффективным является гидроксид натрия.

Выводы. Показана возможность применения эффективного метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» укрепленных глинистых грунтов для обеспечения требуемых уровней показателей прочности и морозостойкости укрепленных грунтов в дорожных одеждах. В дорожно-климатических зонах с частыми сезонными и суточными изменениями температур, переходами через 0°C эффективно применение данного метода в составе комплексной модификации.

Ключевые слова: укрепление грунтов, глинистые грунты, дорожная одежда, метод модификации, ионно-обменный комплекс, физико-механические свойства.

Для цитирования: Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Буланов П.Е., Выборнов Д.Р. Изменение ионно-обменного комплекса укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 278-288, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.24, EDN: VCGQEM

Changes in the ion-exchange complex of stabilized soils in road pavement layers

E.A. Vdovin¹, V.F. Stroganov¹, P.E. Bulanov¹, D.R. Vybornov¹

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

Abstract: *Problem statement.* Increasing traffic loads and road traffic intensity, the lack of durable aggregates, and the high cost of transporting them to various regions of the country necessitate the improvement of clay soil stabilization technologies in road construction. One promising approach to improving the efficiency of clay soil stabilization technologies is the use of electrolytes to modify the ion-exchange complex based on the interaction of clay minerals with alkalis and alter the coagulation and sedimentation processes of the colloidal phase of soils, thereby reducing the optimal moisture content and increasing the strength and frost resistance of pavement layer materials. In this regard, the development of a method for modifying stabilized clay soils in pavement layers by altering the ion-exchange complex is relevant. The aim of this work is to study the influence of the “Changes in the Ion-Exchange Complex” modification method on the physical and mechanical properties of stabilized soils in pavement layers. The tasks are to establish the degree of influence of the “Changes in the Ion-Exchange Complex” modification method on the physical and mechanical properties of stabilized clay soils using electrolytes of varying valence; to determine the optimal electrolyte content; to study the effect of the modification method on the pH level of stabilized clay soils; to establish the dependences of the influence of the content of the most effective modifier on the levels of the physical and mechanical properties of stabilized soils.

Results. The effective impact of modifying stabilized clay soils on their physical and mechanical properties has been established. The use of electrolytes with lower cationic valence within a single anionic group provides the greatest increase in the alkalinity of the medium and creates more favorable conditions for the interaction of soils with binders. Sodium hydroxide is the most effective of the electrolytes studied.

Conclusions. The possibility of using the effective modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” of stabilized clay soils is demonstrated to ensure the required levels of strength and frost resistance for stabilized soils in pavement layers. In road climate zones with frequent seasonal and daily temperature fluctuations, including transitions through 0°C, this method is effective as part of a comprehensive modification program.

Keywords: stabilized soil, clay soil, road pavement, modification method, ion-exchange complex, physical and mechanical properties.

For citation: Vdovin E.A., Stroganov V.F., Bulanov P.E., Vybornov D.R. Changes in the ion-exchange complex of stabilized soils in road pavement layers // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 278-288, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.24, EDN: VCGQEM

1. Введение

В связи отсутствием высокопрочных каменных материалов повышается актуальность исследований по применению эффективных методов использования материалов из местных глинистых грунтов в дорожных одеждах [1, 2]. Глинистые грунты широко распространены по всему миру, однако их низкая несущая способность и технологичность при взаимодействии с водой обуславливают их непригодность для устройства слоев дорожных одежд [3]. Укрепление глинистых грунтов различными видами вяжущих и отходами промышленности нивелирует некоторые негативные процессы при устройстве дорожных конструктивных слоев и повышает их необходимые свойства экономически и экологически безопасными способами [4, 5].

Технология укрепления глинистых грунтов в строительстве автомобильных дорог известна и применяется на практике [6, 7]. Среди различных вяжущих наиболее эффективным и экономически целесообразным является портландцемент [8, 9]. В процессе

укрепления грунтов, т.е. введения в них портландцемента, смесь становится более удобоукладываемой, а в результате ряда химических процессов, происходящих в присутствии вяжущего, и дальнейшего твердения образуется монолитный материал с заданными физико-механическими характеристиками. Эти процессы разделяют на два типа: катионного обмена и флокуляции, обусловленные эффектами ионного обмена, пуццолановых реакций, гидратации, карбонизации и др. [10].

Однако, требуемый уровень физико-механических свойств укрепленных грунтов, применяемых в слоях дорожных одежд зависит не только от конкретных материалов и процессов, но и от области применения в дорожно-климатических зонах. Во многих случаях одного вяжущего недостаточно для получения технико-экономически эффективного материала, применяемого в дорожных конструкциях автомобильных дорог [11]. В таких случаях целесообразно применение методов модификации укрепленных грунтов¹. Распространенным и наиболее простым подходом из методов модификации укрепленных грунтов, по нашему мнению, является метод «Изменение ионно-обменного комплекса» [12, 13].

В результате модификации укрепленных грунтов электролитами происходит ряд процессов: ионный обмен, пептизация, флокуляция, образование новых минералов, фиксация, адсорбция, цементация, преобразование солей, преобразование и адсорбция пленок воды, обогащение поровой воды ионами, изменение капиллярных сил, изменение поверхностного натяжения в глинистых минералах, изменение электрических сил между частицами, адсорбция химически связанной воды, нейтрализация кислот и оснований, протонный обмен и др. [14].

Взаимодействие растворенных солей, включая обменные ионы натрия, в укрепляемой грунтовой смеси с обменной фазой - диффузным двойным слоем глинистых минералов, способствует изменению структуры и физико-механических свойств [15].

В цементных системах электролиты применяют в основном в качестве модификаторов, ускоряющих схватывание и твердение бетона: хлориды, карбонаты, сульфаты, нитраты, силикаты, фосфаты, другие электролитические, неэлектролитические растворы и их различные комбинации.

Основным достоинством данного метода модификации является ее распространенность и эффективность, доступность и низкая стоимость [16]. Исследования показали, что эффективность применения данных модификаторов увеличивается с повышением катионного заряда электролитов в цементных системах: многовалентные катионы гораздо эффективнее низковалентных [17, 18].

Следует отметить, что не смотря на многочисленный ряд исследований по изучению ионно-обменного комплекса глинистых грунтов, отсутствует системный подход по установлению зависимостей влияния электролитов с различной катионной и анионной валентностью на физико-механические свойства и водородный показатель укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд.

Целью работы является исследование влияния метода модификации «Изменения ионно-обменного комплекса» на физико-механические характеристики укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд. Для достижения поставленной цели сформулированы задачи:

- установить степень влияния метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на физико-механические свойства укрепленных глинистых грунтов с применением электролитов различной валентности;
- определить оптимальное содержание электролитов по наибольшей эффективности повышения характеристик материалов слоев дорожных одежд;
- исследовать влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на уровень водородного показателя укрепленных глинистых грунтов с применением электролитов различной валентности;

¹ Vdovin E.A., Stroganov V.F. Complex modification in road technology of soil stabilization based on synergetic approaches // News of KSUAE, 2025, No. 2(72), P. 268-276, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.24..

- установить зависимости влияния содержания наиболее эффективного модификатора от на уровне физико-механических свойства укрепленных грунтов с различным количеством вяжущего.

2. Материалы и методы

В качестве глинистого грунта для исследований влияния метода изменения ионно-обменного комплекса в укрепленных грунтах применялся суглинок легкий пылеватый. Исследуемый грунт имел следующие физические свойства: влажность на границе текучести – 30,04 %, на границе раскатывания – 18,42 %, число пластичности – 0,1162, содержание песчаных частиц (2,00-0,05 мм) в грунте по массе – 90,86 %. Укрепление глинистого грунта производилось портландцементом (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент» (г. Вольск, Россия). Содержание портландцемента в укрепленных грунтах составляло: 6 %, 10 % и 14 % от массы глинистого грунта. Для изучения влияния метода «Изменение ионно-обменного комплекса» в укрепленных грунтах применен ряд электролитов в виде водных растворов различной концентрации. Гидроксид натрия NaOH (ГН), карбонат натрия Na₂CO₃ (КН), сульфат натрия Na₂SO₄ (СН), хлорид кальция CaCl₂ (ХК), гидроксид калия КОН (ГК), сульфат калия K₂SO₄ (СК) – вводились в количестве от 0,1 % до 0,5 % от массы глинистого грунта; железо хлористое 6-водное FeCl₃·6H₂O (ХЖ), алюминий хлористый 6-водный AlCl₃·6H₂O (ХА), сульфат железа FeSO₄ (СЖ), алюминий сернокислый 18-водный Al₂(SO₄)₃·18H₂O (СА), магний хлористый 6-водный: MgCl₂·6H₂O (ХМ) – вводились в количестве от 0,1 % до 2,0 % по массе грунта.

Перед приготовлением образцов определяли максимальную плотность и оптимальную влажность глинистых грунтов и цементогрунтовых смесей по ГОСТ 22733. Для приготовления и испытания образцов смесей с максимальной крупностью зерен до 5 мм использовали малый прибор стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ. В соответствии с ГОСТ 23558 определяли следующие показатели образцов в возрасте 28 суток: предел прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при изгибе и коэффициент морозостойкости. Морозостойкость определяли после 15 циклов переменного замораживания и оттаивания образцов укрепленных грунтов с последующим испытанием на предел прочности при сжатии.

Исследование водородного показателя проводили с применением рН-метра СHECKER (HI 98103, производитель: HANNA Instruments) в соответствии с ГОСТ 26423. Образец укрепленного грунта предварительно измельчали в ступке до 0,05 мм и затворяли дистиллированной водой.

3. Результаты и обсуждение

При реализации системного подхода по установлению зависимостей влияния ряда электролитов с различной катионной и анионной валентностью на физико-механические свойства укрепленных грунтов в слоях дорожных одежд выполнены экспериментальные исследования (рис. 1-3).

Анализ результатов сравнительных испытаний выявил, что при применении электролитов из одной анионной группы, наибольшее влияние на повышение уровня показателей физико-механических свойств, особенно прочности укрепленных грунтов, оказывают модификаторы с низкой катионной валентностью. В ряду исследованных электролитов наиболее эффективным является гидроксид натрия.

Определено оптимальное содержание электролитов при модификации укрепленных грунтов, обеспечивающее наибольшее повышение характеристик материалов слоев дорожных одежд (рис. 4). Рекомендуемое содержание электролитов в исследованных укрепленных грунтах составляет 0,1-0,25 % от массы смеси.

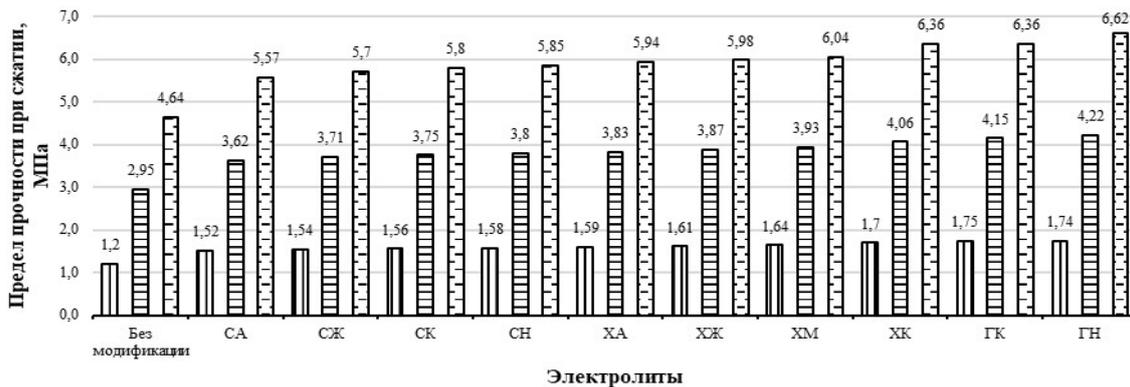


Рис. 1. Влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на предел прочности при сжатии укрепленного грунта

Fig. 1. The influence of the modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” on the compressive strength of stabilized soil

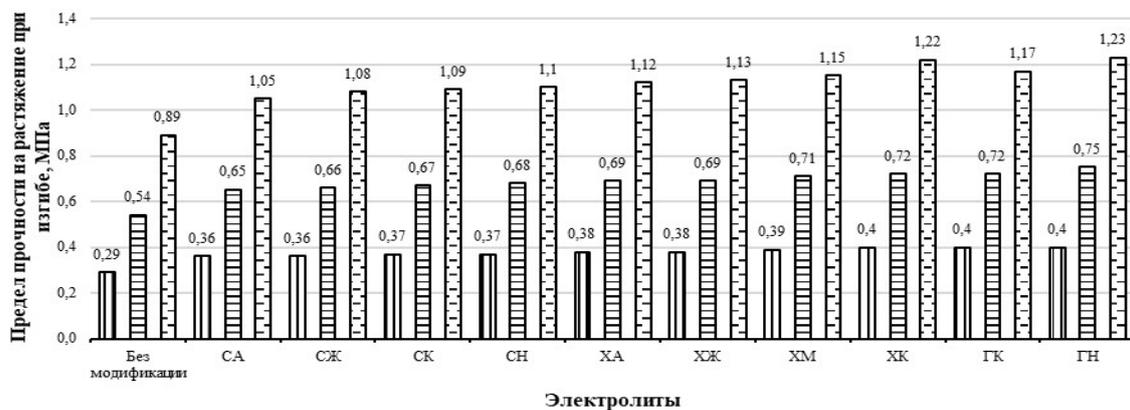


Рис. 2. Влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на предел прочности на растяжение при изгибе укрепленного грунта

Fig. 2. The influence of the modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” on the ultimate tensile strength of stabilized soil

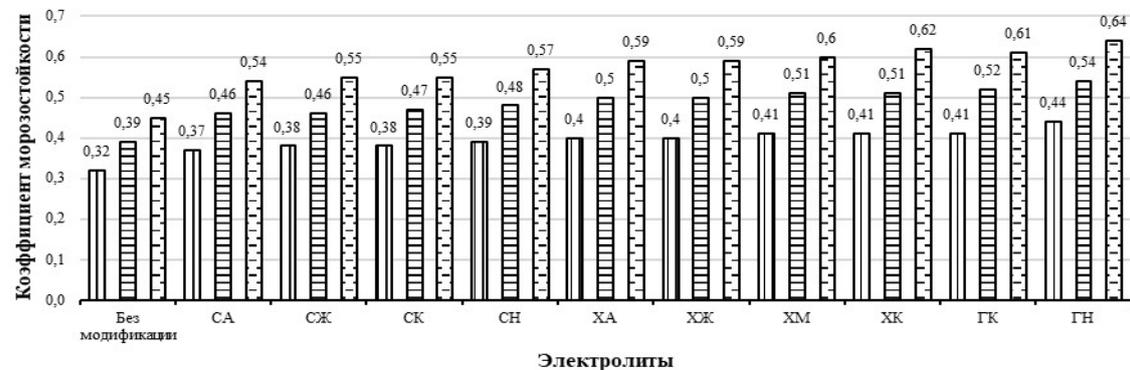


Рис. 3. Влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на коэффициент морозостойкости укрепленного грунта

Fig. 3. The influence of the modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” on the coefficient of frost-resistance of stabilized soil

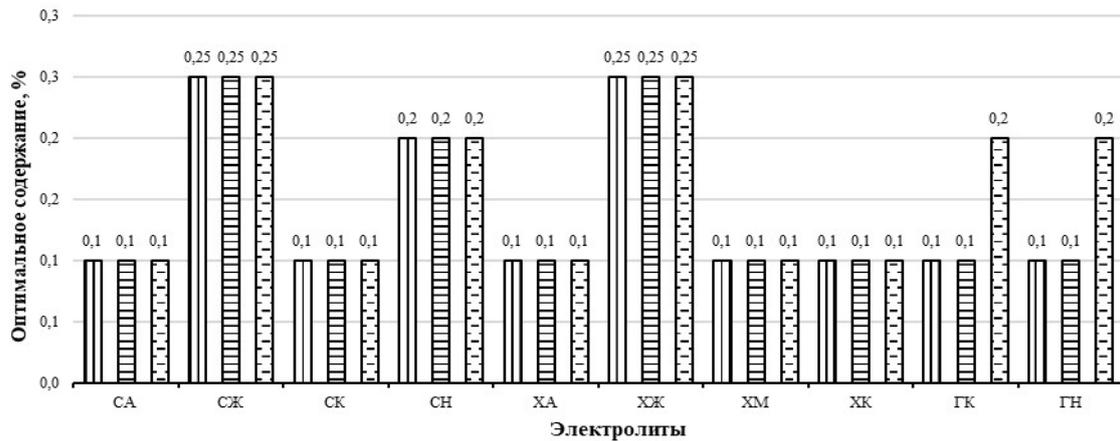


Рис. 4. Оптимальное содержание электролитов в укрепленных грунтах
 □ – 6 % ПЦ; ▨ – 10 % ПЦ; ▩ – 14 % ПЦ (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Optimal electrolyte content in stabilized soils
 □ – 6% Portland cement; ▨ – 10% Portland cement; ▩ – 14% Portland cement
 (illustration by the authors)

Установлено, что применение метода «Изменение ионно-обменного комплекса» в укрепленных грунтах, в отличие от цементных систем, обуславливает увеличение водородного показателя при использовании электролитов из одной анионной группы с более низкой катионной валентностью (рис. 5). Повышение водородного показателя при применении электролитов в рамках одной анионной группы (например, в сульфатах, хлоридах или в гидроксидах) в укрепленных грунтах оказывает влияние на увеличение щелочности среды, что способствует созданию более благоприятных условий для взаимодействия глинистых минералов с вяжущими, изменения процессов коагуляции и осаждения коллоидной фазы грунтов, протекания процессов гидролиза и гидратации минеральных вяжущих, обеспечивающих снижение оптимальной влажности, увеличение прочности и морозостойкости материалов слоев дорожных одежд.

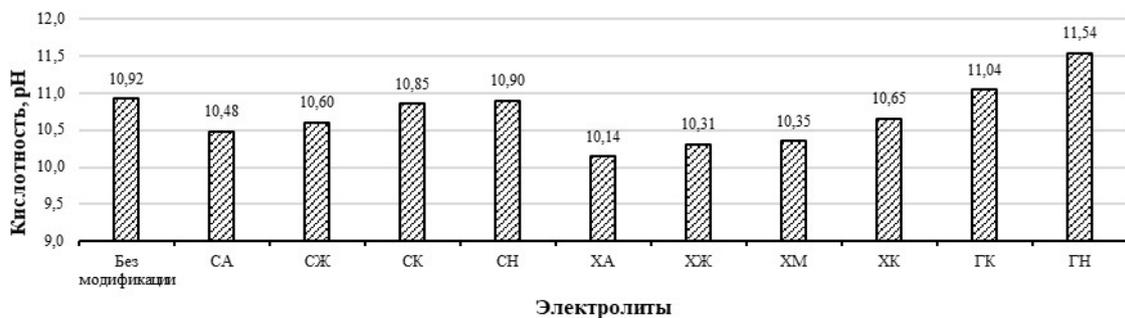


Рис. 5. Влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на водородный показатель укрепленного грунта (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of the modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” on the pH of stabilized soil (illustration by the authors)

В результате модификации укрепленных грунтов гидроксидом натрия увеличиваются: предел прочности при сжатии на 42-45 %; предел прочности на растяжение при изгибе на 37-39 %; коэффициент морозостойкости на 37- 42 %. Установлены зависимости влияния метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» с применением гидроксида натрия на физико-механические свойства укрепленных грунтов с различным содержанием вяжущего, которые аналитически описываются уравнениями полиномиальной функции (рис. 6).

Ранее выполненные исследования [19-21] подтверждают полученные результаты в работе и эффективность применения метода «Изменение ионно-обменного комплекса» модификации укрепленных грунтов. Использование электролитов с низкой катионной валентностью (Na^+ , K^+) оказывают большее влияние на физико-механические свойства

укрепленных грунтов из-за обеспечения возможности образования более плотной, однородной и прочной структуры укрепленных грунтов за счет выпадения осадка электролитов с большей катионной валентностью в диффузном слое глинистых минералов. Ионный обмен приводит к пептизации флокулированных частиц глинистых минералов и повышает эффективность вяжущего при укреплении грунта. Кроме этого, ранее отмечено, что повышение уровня прочности, уменьшение оптимальной влажности, увеличение максимальной плотности и нивелирование эффектов «замораживания-оттаивания» возможно и при введении в укрепленные грунты электролитов, которые оказывают влияние на снижение температуры замерзания поровой воды в грунтах. Подтверждена также максимальная эффективность натрийсодержащих соединений, вследствие лучшего распределения цемента по поверхности грунтовых частиц, что обеспечивает устойчивость грунта к действию сульфатов [22, 23].

Важно отметить, что применение электролитов для модификации укрепленных грунтов обуславливает возможность замены 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 [24].

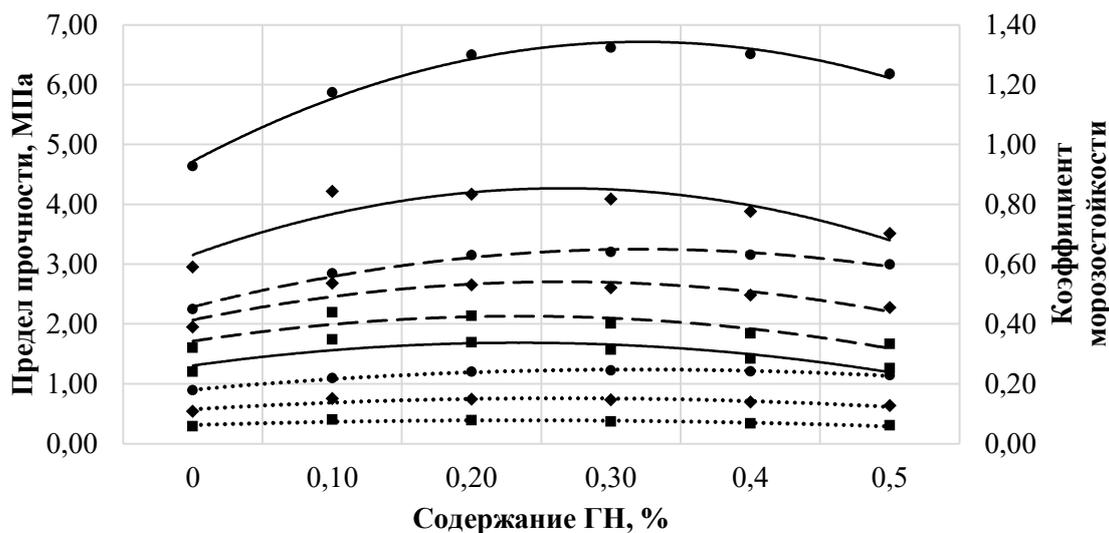


Рис. 6. Влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» с применением гидроксида натрия на физико-механические свойства укрепленных грунтов

■ – 6 % ПЦ; ♦ – 10 % ПЦ; ● – 14 % ПЦ
 ——— - предел прочности при сжатии; — — — - коэффициент морозостойкости;
 - предел прочности на растяжение при изгибе (иллюстрация авторов)

Fig. 6. The influence of the modification method “Changes in the Ion-Exchange Complex” using sodium hydroxide on the physical and mechanical properties of stabilized soil

■ – 6% Portland cement; ♦ – 10% Portland cement; ● – 14% Portland cement;
 ——— – the ultimate compressive strength; — — — – the coefficient of frost-resistance;
 – the ultimate tensile strength (illustration by the authors)

Установлено, что применение метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» укрепленных глинистых грунтов для обеспечения требуемых уровней показателей прочности и морозостойкости укрепленных грунтов целесообразно в дорожных одеждах регионов с отрицательными температурами до -10 °С. В дорожно-климатических зонах с частыми сезонными и суточными изменениями температур,

переходами через 0°C эффективно применение данного метода в составе комплексной модификации.

4. Заключение

- Установлено положительное влияние метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» на повышение уровня показателей физико-механических свойств укрепленных грунтов. Наибольшее влияние метод оказывает на увеличение предела прочности при сжатии и в большей степени это обеспечивается при применении электролитов с более низкой катионной валентностью в рамках одной анионной группы. В ряду исследованных электролитов наиболее эффективным является гидроксид натрия.

- Определено оптимальное содержание электролитов при применении метода модификации укрепленных грунтов «Изменение ионно-обменного комплекса», обеспечивающего возможность повышение уровня физико-механических характеристик: предела прочности при сжатии на 42-45 %; предела прочности на растяжение при изгибе - на 37-39 %; коэффициент морозостойкости - на 37-42 %. Рекомендуемым содержанием электролитов в исследованных укрепленных грунтах составляет 0,1-0,25 % от массы смеси.

- Установлены зависимости влияния количества гидроксида натрия на уровни физико-механических свойства укрепленных грунтов с содержанием вяжущего от 6 до 14 %, которые аналитически описываются уравнениями полиномиальной функции. Применение данного вида функциональной модификации недостаточно для обеспечения требуемых уровней морозостойкости укрепленных грунтов в дорожных одеждах регионов с отрицательными температурами ниже -10°C , частыми сезонными и суточными изменениями температур, переходами через 0°C . В данных условиях целесообразно применять метод «Изменение ионно-обменного комплекса» в составе комплексной модификации.

- Установлено, что применение метода модификации «Изменение ионно-обменного комплекса» в укрепленных грунтах обеспечивает возможность увеличения водородного показателя при использовании электролитов в рамках одной анионной группы с более низкой катионной валентностью. Применение электролитов с низкой катионной валентностью (Na^+ , K^+) оказывают наибольшее влияние на физико-механические свойства укрепленных грунтов из-за обеспечения возможности образования более плотной, однородной и прочной структуры укрепленных грунтов за счет выпадения осадка электролитов с большей катионной валентностью в диффузном слое глинистых минералов.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Acknowledgments

The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral theses and perform research.

Список литературы/References

1. Umar I.H., Lin H., Ibrahim A.S. Laboratory Testing and Analysis of Clay Soil Stabilization Using Waste Marble Powder // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 16. P. 9274. DOI: 10.3390/app13169274.
2. Driss A.A.-E., Harichane K., Ghrici M., Gadouri H. Assessing the effect of moulding water content on the behaviour of lime-stabilised an expansive soil // Geomechanics

- and Geoengineering. 2021. Vol. 16. No. 6. P. 1-13. DOI: 10.1080/17486025.2021.1903092.
3. Turan C., Javadi A.A., Vinai R., Zali R.B. Geotechnical Characteristics of Fine-Grained Soils Stabilized with Fly Ash, a Review // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 24. DOI:10.3390/su142416710.
 4. Corrêa-Silva M., Miranda T., Rouainia M., Araújo N., Glendinning S., Cristelo N. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 267. P. 122017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122017.
 5. Al-Khafaji R., Dulaimi A., Jafer H., Mashaan N.S., Qaidi S., Obaid Z.S., Jwaida Z. Stabilization of Soft Soil by a Sustainable Binder Comprises Ground Granulated Blast Slag (GGBS) and Cement Kiln Dust (CKD) // Recycling. 2023. Vol. 8. No. 1. P. 1-18. DOI:10.3390/recycling8010010
 6. Modarres A., Nosoudy Y.M. Clay stabilization using coal waste and lime – Technical and environmental impacts // Applied Clay Science. 2015. Vol. 116. DOI: 10.1016/j.clay.2015.03.026.
 7. Perri G., De Rose M., Domitrović J., Vaiana R. CO2 Impact Analysis for Road Embankment Construction: Comparison of Lignin and Lime Soil Stabilization Treatments // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 1912. DOI:10.3390/su15031912.
 8. Zada U., Jamal A., Iqbal M., Eldin S.M., Almoshaogeh M., Bekkouche S.R., Almuaythir S. Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: Current challenges and opportunities // Case Studies in Construction Materials. 2023. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01985.
 9. 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. Vol. 128. P. 105878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
 10. Mousavi S.S., Bhojaraju C., Ouellet-Plamondon C. Clay as a Sustainable Binder for Concrete - A Review // Construction Materials. 2021. Vol. 1. No. 3. P. 134-168. DOI: 10.3390/constrmater1030010.
 11. 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. Vol. 280. P. 122476. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122476.
 12. Ali H. E., Asmel N. K., Ganiyu A. A., Tijani, H. Effect of sodium compounds additives on the strength of cement-stabilized soils // Engineering and Applied Science Research. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 287–296. DOI: 10.14456/easr.2020.31.
 13. Yin C., Deng S., Zhao J., Tao Y., Huang J. Effects of Non-traditional Additives on the Early Strength of a Lean Clay Soil Stabilized by Compound Calcium-based Stabilizer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2025. Vol. 69. No 3. P. 752-762. DOI: 10.3311/PPci.37150.
 14. 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.
 15. Jayasekera S., Hall S. Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments // Geotechnical and Geological Engineering. 2007. Vol. 25. No. 1. P. 1-10. DOI: 10.1007/s10706-006-0001-8.
 16. Shepelenko T.S., Gorlenko N.P., Zubkova O.A. Structurization processes of cement composites modified with electrolytic additives // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 81. No. 5. P. 125-134. DOI: 10.18720/MCE.81.13.
 17. Тараканов О. В., Иващенко Ю. Г., Ерофеева И. В. Влияние органоминеральных добавок на формирование микроструктуры и кинетику твердения бетона при отрицательных температурах // Региональная архитектура и строительство. 2023. Т. 3. No. 56. С. 91-102. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_91.

- Tarakanov O. V., Ivashchenko Yu. G., Erofeeva I. V. The influence of organomineral additives on the formation of microstructure and kinetics of concrete hardening at subzero temperatures // *Regional Architecture and Construction*. 2023. Vol. 3. No. 56. P. 91-102. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_91.
18. Самченко С. В., Ларсен О. А., Былинкин Д. Комплексные противоморозные добавки для монолитного строительства в условиях Крайнего Севера // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. No 2. С. 145-156.
Samchenko S. V., Larsen O. A., Bylinkin D. Complex antifreeze additives for monolithic construction in the Far North // *Silicate engineering and technology*. 2022. Vol. 29. No. 2. P. 145-156.
19. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Complex modification of soil cement for road pavements // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. Vol. 4. No. 109. P. 10928. DOI: 10.4123/CUBS.109.28.
20. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Construction of road pavements using complex modified soil-cement // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. Vol 4. No. 109. P. 10927. DOI: 10.4123/CUBS.109.27.
21. Викулин И. А., Козлов Д. Г., Боровлев Ю. А. Прочность шлакосиликатогрунтовых смесей после твердения при использовании в строительстве лесовозных автомобильных дорог // *Системы. Методы. Технологии*. 2024. Т. 3. No 63. С. 95-104. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-95-104.
Vikulin I. A., Kozlov D. G., Borovlev Yu. A. Strength of slag silicate mixtures after hardening when used in the construction of logging roads // *Systems. Methods. Technologies*. 2024. Vol. 3. No 63. P. 95-104. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-95-104.
22. Mohamad H. M., Sharudin M. F. I., Amaludin A. E., Zakaria S. N. F. Characteristic and physicochemical properties of peat soil stabilized with sodium hydroxide (NaOH) // *Civil Engineering Journal*. 2023. Vol. 9. No. 9. P. 2221-32. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-09-09.
23. Kulanthaivel P., Selvakumar S., Soundara B., Krishnaraja A. R. Strength enhancement of clay soil stabilized with ordinary Portland cement, sodium silicate and sodium hydroxide // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2023. Vol. 16. No. 5. P. 1297-1310.
24. Neeladharan C., Vinitha V., Priya B., Saranya S. Stabilisation of soil by using tiles waste with sodium hydroxide as binder // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 6. No. 4. P. 6762-6768. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0604094.

Информация об авторах

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

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

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

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

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

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

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

E-mail: dan.vibor@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-5388-7698

Information about the authors

Evgeniy A. Vdovin, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

Victor F. Stroganov, doctor of chemical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

Pavel E. Bulanov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

Daniil R. Vybornov, Master's student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: dan.vibor@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-5388-7698

Дата поступления: 01.11.2025

Дата принятия: 26.12.2025