

## Прочность шлакосиликатогрунтовых смесей после твердения при использовании в строительстве лесовозных автомобильных дорог

И.А. Викулин<sup>1a</sup>, Д.Г. Козлов<sup>2b</sup>, Ю.А. Боровлев<sup>3c</sup>, А.С. Сергеев<sup>4d</sup>,  
А.А. Скрыпников<sup>1e</sup>, А.О. Бутенко<sup>1f</sup>, А.Ю. Жук<sup>5g</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный аграрный университет им. Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия

<sup>3</sup> Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, Россия

<sup>4</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

пр. Комсомольский, 29, Пермь, Россия

<sup>5</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> vikiigor\_1719@mail.ru, <sup>b</sup> dimvsau@mail.ru, <sup>c</sup> borov.borov.ar@yandex.ru, <sup>d</sup> pnipu\_sk@mail.ru,

<sup>e</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>f</sup> tella-alina@mail.ru, <sup>g</sup> ftslk@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5072-6748>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0817-9300>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0009-0006-4523-841X>,

<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 05.09.2024, принята 23.09.2024

*В данной работе проанализировано воздействие различных солей на физические и механические характеристики грунтов, укрепленных с помощью шлакосиликатных вяжущих материалов. Хотя ранее вопрос влияния солей на свойства стабилизированных грунтов не исследовался, практика показывает, что в районах лесозаготовок встречается значительное количество разнообразных засоленных почв. Наиболее распространенными являются натриевые соли, поэтому они были предметом исследования с точки зрения их взаимодействия с жидким стеклом и солями щелочноземельных металлов, используемых в качестве вяжущих компонентов. Для проведения испытаний были выбраны два типа грунта — тяжелая супесь с пылеватыми частицами и пылеватый песок. В качестве вяжущего материала применялся измельченный гранулированный фосфорный шлак, активированный раствором жидкого стекла разной плотности. Шлакосиликатогрунтовая смесь была приготовлена путем тщательного смешивания грунта с шлакосиликатным вяжущим. Затем полученная смесь выдерживалась во влажных условиях, и через определенные интервалы времени из нее формовались образцы для дальнейших испытаний. После 28 дней влажного хранения образцы подвергались компрессионным испытаниям на сжатие. Результаты показали, что увеличение времени между увлажнением и уплотнением смеси приводит к снижению прочности укрепленного грунта. Степень этого снижения варьируется в зависимости от типа грунта и плотности используемого раствора жидкого стекла. Менее концентрированный раствор жидкого стекла создает менее щелочную среду, что замедляет процессы гидратации и твердения шлакосиликатного вяжущего; аналогичное влияние оказывает и разновидность исследуемого грунта. Проведенные исследования имеют практическую значимость при подготовке стабилизированных грунтов для использования в строительстве лесовозных автомобильных дорог, особенно в зонах с засоленными участками. Полученные данные помогут оптимизировать процессы укрепления грунтов и улучшить качество дорожного покрытия в сложных геологических условиях.*

**Ключевые слова:** растворы солей; шлакосиликатные вяжущие; влажностные характеристики грунта; щелочности среды; прочность укрепленного грунта.

## The strength of slag silicate mixtures after hardening when used in the construction of logging roads

I.A. Vikulin<sup>1a</sup>, D.G. Kozlov<sup>2b</sup>, Yu.A. Borovlev<sup>3c</sup>, A.S. Sergeev<sup>4d</sup>,  
A.A. Skrypnikov<sup>1e</sup>, A.O. Butenko<sup>1f</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>5g</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolyutsii Ave., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great; 1, Michurin St., Voronezh, Russia

<sup>3</sup> Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin; 54a, Starykh Bolshevikov St., Voronezh, Russia

<sup>4</sup> Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Pros., Perm, Russia

<sup>5</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> vikiigor\_1719@mail.ru, <sup>b</sup> dimvsau@mail.ru, <sup>c</sup> borov.borov.ar@yandex.ru, <sup>d</sup> pnipu\_sk@mail.ru,

<sup>e</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>f</sup> tella-alina@mail.ru, <sup>g</sup> ftslk@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5072-6748>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0817-9300>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>,  
<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0009-0006-4523-841X>,  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Received 05.09.2024, accepted 23.09.2024

*The article analyzes the effect of salts on the physico-mechanical properties of soils reinforced with slag silicate. The problem of the effect of salts on the physico-mechanical properties of reinforced soils has not been studied before, but as practice shows, there are quite a large number of different types of saline soils in the areas of logging sites. The most common salts are sodium salts, which have been studied from the point of view of the interaction between liquid glass and salts of alkaline earth metals used as binders. Two types of soil are selected for the tests: heavy powdery sandy loam and powdery sand. Ground granular phosphoric slag activated with a solution of liquid glass of different specific gravity is used as a binder. A slag-silicate-ground mixture is prepared by mixing the soil with a slag-silicate binder, then the prepared mixture is stored in humid conditions and test samples are formed at certain intervals. After 28 days of wet storage, the samples are tested for compression. As the test results show, with an increase in the time between humidification and compaction of the mixture, a decrease in the strength of the reinforced soil is observed. The decrease in strength occurs in different ways depending on the type of soil and the specific gravity of the liquid glass solution. The obtained research results show the effect of the time between humidification and compaction of the mixture, as a result of which a less concentrated solution of liquid glass creates a less alkaline environment, which leads to a slowdown in the process of hydration and hardening of the slag silicate binder, the same effect is exerted by the type of soil under study. The conducted research is of practical importance in the preparation of fortified soils for use in the construction of logging roads with saline areas.*

**Keywords:** salt solutions; slag silicate binders; soil moisture characteristics; alkalinity of the medium; strength of the reinforced soil.

**Введение.** Исследование влияния солей на физико-механические свойства грунтов, стабилизированных шлакосиликатным вяжущим, является актуальной задачей по нескольким практическим причинам. Во многих регионах, где активно ведутся лесозаготовительные работы, одной из характерных природных особенностей является широкое распространение грунтов с различными типами засоления [1; 3–5]. Эти засоленные грунты могут значительно влиять на качество и долговечность строительных материалов и сооружений. Несмотря на это, до настоящего времени систематические исследования, посвященные изучению воздействия солей на физико-механические свойства грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, не проводились.

Учитывая важность этой проблемы для строительной отрасли и инфраструктурных проектов в «засоленных» регионах, необходимо провести комплексное изучение данного вопроса. Понимание того, как различные соли влияют на процессы твердения и прочностные характеристики укрепленных грунтов, позволит разработать более эффективные методы стабилизации и улучшения грунтовых оснований. Это, в свою очередь, способствует повышению надежности и долговечности сооружений, а также оптимизации затрат на строительство и эксплуатацию.

**Результаты исследований.** Среди наиболее распространенных легкорастворимых солей, присутствующих в природных грунтах, выделяют сульфат магния ( $MgSO_4$ ), хлорид кальция ( $CaCl_2$ ), сульфат натрия ( $Na_2SO_4$ ) и карбонат натрия ( $Na_2CO_3$ ) [2; 9; 10; 19; 20; 25]. В рамках нашего исследования мы сфокусировались на воздействии именно натриевых солей на физико-механические свойства грунтов. Такой выбор обусловлен тем, что при взаимодействии жидкого стекла — одного из ключевых компонентов шлакосиликатного вяжущего — с засоленными грунтами в растворе остаются преимущественно натриевые соли как легкорастворимые.

Это происходит потому, что жидкое стекло реагирует с солями щелочноземельных металлов, приводя к образованию менее растворимых соединений, тогда как натриевые соли сохраняют свою растворимость в системе. Таким образом, в процессе химических реакций другие соли либо выпадают в осадок, либо образуют новые фазовые компоненты, а натриевые соли продолжают активно взаимодействовать с грунтом и вяжущим. Понимание этого механизма важно для корректной оценки влияния солей на процессы твердения и формирования прочностных характеристик укрепленных грунтов. Таким образом, реакция между жидким стеклом и солями щелочноземельных металлов может быть представлена следующим образом.

В рамках наших экспериментов мы использовали легкий суглинок, который подвергался искусственному засолению с помощью водных растворов различных солей: хлорида натрия ( $NaCl$ ), сульфата натрия ( $Na_2SO_4$ ) и карбоната натрия ( $Na_2CO_3$ ). Эти соли были выбраны из-за их распространенности в природных условиях и потенциального влияния на физико-механические свойства грунтов.

Для достижения заданных уровней засоления мы вводили водные растворы солей в грунт таким образом, чтобы после полного испарения воды остаточное содержание солей составляло 0,5; 1,3 и 5 % от массы грунта. Такой подход позволял нам моделировать различные степени засоления, характерные для природных условий, и исследовать их влияние на поведение укрепленных грунтов.

Чтобы обеспечить равномерное распределение солей внутри грунта, после увлажнения солевыми растворами до состояния пластичной консистенции образцы оставлялись на 7 суток во влажной камере. Это способствовало равномерной диффузии ионов соли по всему объему грунта. По истечении этого периода образцы высушивались на воздухе при регулярном перемешивании, что предотвращало образование зон с повышенной концентрацией солей и обеспечивало однородность состава.

Мы сознательно ограничили максимальное содержание солей в грунте до 5 %, поскольку более высокие уровни засоления встречаются крайне редко и обычно ограничены небольшими участками в природных условиях. Избыточное засоление может приводить к аномальному поведению грунтов, что не соответствует целям нашего исследования. По аналогичным причинам содержание карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) было ограничено до 1 %, так как более высокие концентрации этой соли также редко встречаются в естественных условиях и могут искажать результаты эксперимента.

После подготовки засоленных грунтов мы приступили к изготовлению образцов укрепленного грунта. Процесс включал уплотнение грунта под нагрузкой  $100 \text{ кг/см}^2$  в течение 3 мин, что обеспечивало необходимую плотность и структурную целостность образцов. Затем образцы подвергали 28-дневному выдерживанию во влажной камере, создавая оптимальные условия для процессов гидратации и твердения шлакосиликатного вяжущего.

По завершении этого периода образцы насыщались водой в течение 2 дней, имитируя возможные условия эксплуатации в реальной среде с повышенной влажностью. После водонасыщения проводились испытания на прочность при сжатии. Результаты этих испытаний представлены на рис. 1 и демонстрируют существенное влияние легкорастворимых солей на прочностные характеристики укрепленного грунта.

Анализ данных показал, что не только процентное содержание солей, но и их химический характер значительно влияют на прочность материала. Например, при небольшом содержании хлорида натрия (до 1,5 %) наблюдалось повышение прочности укрепленного грунта по сравнению с незасоленным образцом. Это можно объяснить ускорением процессов твердения шлакосиликатного вяжущего под воздействием хлорид-ионов. Однако при увеличении содержания  $\text{NaCl}$  свыше 1,5 % прочность начинала снижаться, что указывает на негативное влияние избыточного количества хлоридов на структуру грунта.

Сульфатное засоление грунта до 1–2 % также способствовало повышению прочности укрепленных образцов. Это, вероятно, связано с тем, что сульфат-ионы могут активировать процессы гидратации и способствовать формированию более прочной структуры. Однако при содержании сульфатов более 3 % наблюдалось резкое и постоянное снижение прочности грунта [6–8; 11; 15]. Это снижение может быть обусловлено образованием избыточных кристаллогидратов сульфатов, которые приводят к внутренним напряжениям и микротрещинам в материале.

Карбонат натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) показал наименьшее влияние на прочностные свойства укрепленного грунта. При содержании этой соли в диапазоне от 0,5 до 1,0 % прочность образцов практически не отличалась от прочности незасоленного грунта и составляла  $36\text{--}40 \text{ кг/см}^2$ . Это свидетельствует о том, что карбонат-ион не оказывает значимого влияния на процессы твердения шлакосиликатного вяжущего и не способствует изменению структуры грунта.

Повышение прочности грунтов, засоленных небольшими количествами хлоридов и сульфатов натрия, можно объяснить их положительным воздействием на процессы твердения шлакосиликатного вяжущего [12–14; 22–24]. Хлорид- и сульфат-ионы способны повышать растворимость гранулированного шлака за счет изменения ионной силы раствора. Это приводит к ускорению реакций гидратации и более быстрому образованию гидратных новообразований, укрепляющих структуру грунта. Подобный эффект наблюдается и в цементных системах при добавлении  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , где эти соли действуют как ускорители твердения.

Исследователь Е. Пранди также отмечал, что добавление хлористого натрия существенно ускоряет процессы твердения гравийных смесей, укрепленных доменными гранулированными шлаками. Это подтверждает нашу гипотезу о положительном влиянии небольших количеств хлоридов на укрепление грунтов. Однако важно учитывать, что превышение оптимальных концентраций солей может приводить к обратному эффекту, вызывая снижение прочности из-за развития нежелательных процессов, таких как выцветание, образование солевых корок и микротрещин.

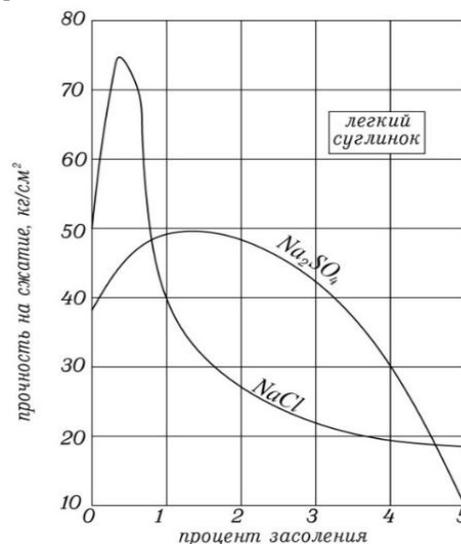


Рис. 1. Изменение прочности образцов в зависимости от характера и степени засоления исходного грунта

Поскольку небольшие добавки солей преимущественно оказывают ускоряющее воздействие на процессы твердения вяжущего, повышение прочности, обусловленное присутствием этих солей, следует считать временным явлением. Это означает, что по мере увеличения сроков твердения различия в прочности между засоленными и незасоленными грунтами должны нивелироваться. Действительно, представленные данные (рис. 2) подтверждают этот вывод: видно, что в первые месяцы твердения прочность укрепленного грунта с добавлением 0,5–1,0 %  $\text{NaCl}$  значительно выше по сравнению с незасоленным образцом. Однако со временем эта разница уменьшается, и к 6–9 месяцам становится практически незаметной.

Таким образом, эффект от малых добавок солей на прочность укрепленного грунта является временным и наблюдается преимущественно на начальных стадиях твердения. Это связано с тем, что соли ускоряют начальные процессы гидратации и твердения шлакосиликатного вяжущего, способствуя более быстрому набору прочности в первые месяцы. Однако в долгосрочной перспективе, когда основные процессы твердения завершаются, прочностные характеристики укрепленных грунтов с засолением и без него выравниваются.

При планировании длительной эксплуатации и оценке долговечности укрепленных грунтовых конструкций важно учитывать этот фактор, чтобы обеспечить надежность и устойчивость сооружений на протяжении всего срока службы. Это особенно актуально для инфраструктурных проектов и объектов гражданского строительства, где стабильность грунтового основания играет ключевую роль в безопасности и эффективности эксплуатации. Учитывая временный характер влияния солей, следует разрабатывать стратегии укрепления грунтов, ориентированные на долгосрочные характеристики, а не только на начальные показатели прочности.

Кроме того, понимание временной природы повышения прочности позволяет оптимизировать состав и технологию приготовления укрепленных грунтов, чтобы достичь наиболее эффективного соотношения между краткосрочными и долгосрочными свойствами материала. Это может включать в себя подбор оптимальных дозировок солей, использование дополнительных добавок или изменение условий твердения для обеспечения стабильности и прочности грунтового основания в течение всего периода эксплуатации сооружения.

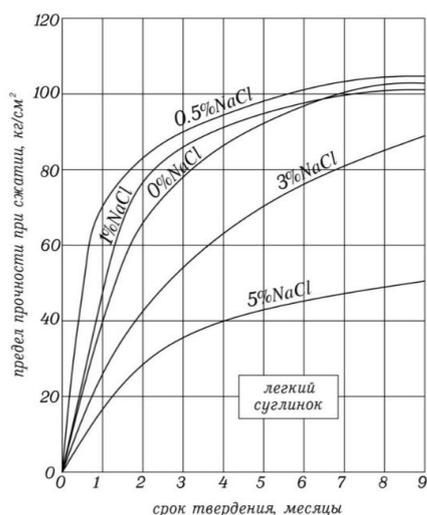


Рис. 2. Изменение прочности засоленного грунта, укрепленного шлакосиликатным вяжущим, в зависимости от сроков твердения

В целом результаты проведенных исследований позволяют заключить, что засоленность грунта с суммарным содержанием хлоридных солей до 2 % не только не оказывает негативного влияния, но и может служить положительным фактором для прочности укрепленного грунта. Однако при содержании

сульфатов более 3% (см. рис. 1) наблюдается снижение прочности. Это связано с неоднородным уплотнением грунта, вызванным увеличением объема солей при их кристаллизации, что приводит к внутренним напряжениям и микротрещинам в структуре материала. Дополнительно, негативное воздействие избыточного засоления можно объяснить аналогично процессам, происходящим при укреплении засоленных грунтов цементом. Как отмечала Л.И. Кайманова, при высоком уровне засоления процессы твердения вяжущего замедляются, а соль не полностью взаимодействует с вяжущим и грунтом. При водонасыщении укрепленного грунта свободные соли растворяются, образуя пустоты, что увеличивает пористость материала и снижает его прочность.

Исходя из этого, укрепление засоленных грунтов с использованием шлакосиликатного вяжущего возможно при соблюдении определенных ограничений по содержанию солей. При хлоридном засолении содержание солей не должно превышать 2 % от массы грунта. При сульфатном засолении допустимое содержание солей составляет не более 3 %. В случае содового засоления предел содержания солей ограничивается 1 %. Соблюдение этих условий позволяет минимизировать негативное влияние солей на процессы твердения и обеспечить необходимую прочность укрепленного грунта для надежной и долговечной эксплуатации сооружений.

Процесс приготовления шлакосиликатогрунтовых смесей может быть реализован различными методами. Один из подходов включает смешение компонентов непосредственно на строительной площадке с использованием многопроходных или однопроходных машин, что позволяет оперативно готовить смесь в необходимых объемах. Альтернативный метод предусматривает предварительное смешение компонентов в стационарных установках с последующей транспортировкой готовой смеси на место проведения работ. Выбор конкретной технологической схемы зависит от масштабов строительства, доступного оборудования, экономических соображений и требований к качеству смеси.

Выбранная технология приготовления и укладки смеси, тип используемого оборудования, а также режимы его работы оказывают непосредственное влияние на продолжительность процесса приготовления шлакосиликатогрунтовых смесей. Длительность этого процесса, аналогично ситуациям при укреплении грунтов цементом, существенно влияет на качество и прочностные характеристики укрепленного грунта. Оптимизация временных параметров и технологических режимов является ключевым фактором для обеспечения стабильности свойств материала и достижения необходимых эксплуатационных показателей.

Для изучения влияния временных и технологических факторов на качество укрепленного грунта была проведена серия лабораторных испытаний. В качестве объектов исследования выбраны два типа грунта с различными гранулометрическими характеристиками: тяжелая пылеватая супесь и

пылеватый песок. В качестве вяжущего материала использовался измельченный гранулированный фосфорный шлак, активированный раствором жидкого стекла разной плотности, что позволяло варьировать концентрацию активных компонентов и щелочность среды.

Процесс подготовки образцов включал несколько этапов. Сначала грунт тщательно смешивался со шлакосиликатным вяжущим до получения однородной смеси. Затем, по истечении определенных временных интервалов (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 24, 48 и 72 ч) после приготовления и выдержки смеси во влажных условиях, из нее формовались образцы цилиндрической формы с размерами диаметра и высоты по 5 см. Такой подход позволял оценить влияние времени между увлажнением и уплотнением на прочностные характеристики укрепленного грунта.

После 28 суток влажного хранения образцы подвергались испытаниям на сжатие. Анализ результатов, представленных на рис. 3, показал, что увеличение времени между увлажнением и уплотнением смеси приводит к снижению прочности укрепленного грунта. Степень этого снижения зависит от типа грунта и плотности раствора жидкого стекла. Было установлено, что при использовании раствора жидкого стекла с меньшей плотностью влияние времени на снижение прочности менее выражено. Это объясняется тем, что менее концентрированный раствор создает менее щелочную среду, замедляя процессы гидратации и твердения шлакосиликатного вяжущего. Такой замедленный режим твердения позволяет сохранить технологическую активность смеси на более длительный период, что может быть полезно при проведении масштабных строительных работ.

Тип грунта также оказывает существенное влияние на скорость снижения прочности. Более тяжелые грунты, содержащие повышенное количество пылевато-глинистых частиц, обладают большей способностью к поглощению щелочи из раствора жидкого стекла. Это приводит к снижению щелочности среды и, как следствие, замедлению процессов твердения вяжущего компонента. В легких грунтах с меньшим содержанием мелких частиц этот эффект выражен в меньшей степени, что отражается на динамике изменения прочности укрепленного грунта.

Кроме того, на замедление процессов твердения влияет изменение содержания диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в шлакосиликатогрунтовых смесях. При введении в грунт шлакосиликатного вяжущего происходит поглощение  $\text{SiO}_2$  из раствора жидкого стекла, что снижает его концентрацию в системе. Уменьшение содержания  $\text{SiO}_2$  может также быть следствием использования жидкого стекла с пониженной плотностью, где изначально присутствует меньшее количество этого компонента. Снижение концентрации  $\text{SiO}_2$  в растворе приводит к увеличению индукционного периода твердения, замедляя процессы взаимодействия между силикатами натрия и кальция.

Исследования, проведенные И.Ю. Уваровой, О.К. Лукьяновой и другими учеными [11; 19–22; 26], подтвердили, что уменьшение содержания  $\text{SiO}_2$  в

растворе жидкого стекла приводит к увеличению индукционного периода твердения. Это явление наблюдается при взаимодействии силикатов натрия и кальция, где недостаток  $\text{SiO}_2$  замедляет процесс образования кристаллических структур вяжущего материала. Понимание этого механизма важно для оптимизации состава шлакосиликатогрунтовых смесей и управления скоростью их твердения. Контроль содержания  $\text{SiO}_2$  в системе позволяет регулировать технологические параметры приготовления и укладки смеси, обеспечивая необходимые прочностные характеристики укрепленного грунта и долговечность сооружений, возводимых на его основе.

Медленней схватывания и твердения шлакосиликатогрунтовых смесей позволяет значительно удлинить процесс их приготовления без значительных потерь прочностных характеристик, о чем свидетельствуют данные на рис. 3. На рисунке видно, что прочность образцов, приготовленных через трое суток после увлажнения смеси, отличается от прочности образцов, приготовленных сразу же после увлажнения, всего на 2–7 кг/см<sup>2</sup>, или на 5–10 %, в то время как для цементогрунтов запаздывание с уплотнением всего на 2–4 ч ведет к потере прочности до 30 % и более.

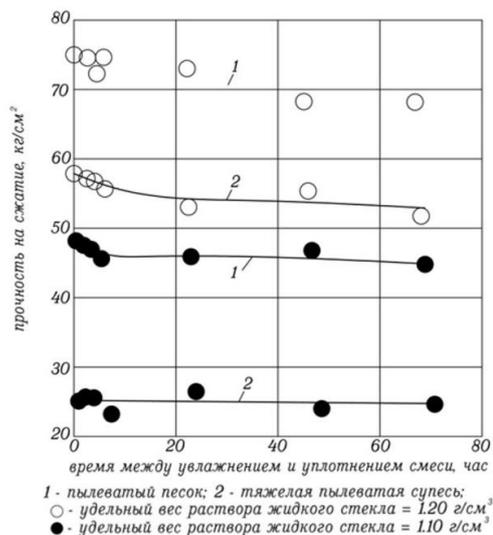


Рис. 3. Зависимость прочности шлакосиликатогрунта от времени между увлажнением и уплотнением смеси

Подобное поведение шлакосиликатогрунтовых смесей связано с их замедленным процессом твердения, а точнее — с медленным формированием необратимых кристаллических связей внутри материала. Известно, что при добавлении в грунт активных компонентов, таких как шлакосиликатное вяжущее, возникают новые структурные связи, которые в конечном итоге определяют физико-механические свойства укрепленного грунта. Эти структурные связи делятся на два основных типа, коагуляционные и кристаллизационные.

Коагуляционные связи характеризуются способностью к обратимому восстановлению после механического разрушения структуры. Это означает, что если материал подвергнется механическому воздействию, его структура может восстановиться без

потери первоначальных свойств. Кристаллизационные связи, напротив, при механическом воздействии разрушаются необратимо, что приводит к снижению прочности и устойчивости материала.

Исходя из этого, длительность процесса приготовления укрепленных грунтов должна быть ограничена временем, необходимым для образования кристаллизационных связей. После начала их формирования механическое воздействие на грунт следует минимизировать или полностью прекратить. В противном случае может произойти необратимое разрушение кристаллизационных связей, что негативно скажется на прочностных характеристиках укрепленного грунта [16–18].

Свойство структурных связей — их способность к обратимому или необратимому разрушению под действием механических нагрузок — было использовано нами для определения типа связей, присутствующих в шлакосиликатогрунтовых смесях во время их приготовления и на начальных стадиях твердения. Для этого мы провели серию экспериментов по методике, предложенной Ю.М. Васильевым.

В эксперименте использовался легкий суглинок в двух состояниях, необработанном и обработанном шлакосиликатным вяжущим. Из грунта формовались цилиндрические образцы размером  $d=h=5$  см. Прочность этих образцов определялась сразу после уплотнения, это значение обозначалось как  $R_0$ . После проведения первоначальных испытаний разрушенные образцы измельчались, и из полученного материала формовались новые образцы. Часть этих новых образцов снова испытывалась на прочность при сжатии сразу после формования (также обозначаемая как  $R_0$ ), а другая часть — через сутки (обозначаемая как  $R_1$ ) и в последующие дни.

Таким образом, ежедневно проводились испытания на прочность образцов, изготовленных накануне, а также формовались новые образцы из той же шлакосиликатогрунтовой смеси, которые отвердевали во влажных условиях в течение 3–7 суток. Такой подход позволил проследить динамику изменения прочности материала и влияние повторных циклов разрушения и формования на его структурные свойства.

В результате были получены значения прочности как необработанного, так и укрепленного шлакосиликатным вяжущим грунта при последовательном разрушении структурных связей.

Эти данные представлены в табл. 1–4. На основе табличных данных на рис. 4 показана динамика изменения прочности образцов из шлакосиликатогрунтовой смеси: 1 — испытанных сразу после формования; 2 — после 3-х суток твердения во влажных условиях; 3 — после 7 суток твердения. Анализ рис. 4 показывает, что прочность образцов, испытанных сразу после формования, практически не зависит от количества циклов разрушения и повторного формования. После каждого цикла прочность стабильно воспроизводится и сохраняет почти постоянное значение, которое можно считать прочностью, обусловленной коагуляционными связями. Примечательно, что эта прочность достаточно высокая и достигает  $10 \text{ кг/см}^2$ , что свидетельствует о значительной роли коагуляционных связей на начальных этапах.

Это указывает на то, что на ранних стадиях твердения в шлакосиликатогрунтовых смесях доминируют именно коагуляционные связи, обеспечивающие существенную прочность материала сразу после приготовления. Однако для достижения максимальных физико-механических свойств и долговечности укрепленного грунта необходимо образование кристаллизационных связей. Эти связи формируются медленнее и более чувствительны к механическим воздействиям, особенно при продолжительном перемешивании или уплотнении смеси.

Разрушение кристаллизационных связей на этапе их формирования может привести к необратимому снижению прочности материала. Поэтому важно оптимизировать процесс приготовления укрепленных грунтов, ограничивая время и интенсивность механического воздействия после начала формирования кристаллизационных связей. Это включает в себя контроль времени перемешивания, скорости уплотнения и обеспечение надлежащих условий твердения.

Кроме того, понимание механизма формирования структурных связей в шлакосиликатогрунтовых смесях позволяет разрабатывать более эффективные технологии укрепления грунтов. Например, можно подобрать оптимальные добавки или изменить условия твердения для ускорения образования кристаллизационных связей без ущерба для их целостности. Это особенно важно при строительстве объектов, требующих высокой надежности и длительного срока эксплуатации.

**Таблица 1.** Изменение прочности неукрепленного грунта при последовательных разрушениях структурных связей

Время с момента приготовления образцов до момента их испытания в сутках									Примечание
0	1		2		3		4		
Прочность при сжатии, $\text{кг/см}^2$									
$R_0$	$R_0$	$R_1$	$R_0$	$R_1$	$R_0$	$R_1$	$R_0$	$R_1$	
0,84	0,93	1,20	0,96	1,07	0,88	1,17	1,02	1,07	
1,00	1,02	1,12	0,82	1,19	0,95	1,13	0,98	1,10	
0,93	0,86	1,18	0,94	1,17	0,99	1,22	0,83	1,26	
0,89	0,81	1,16	0,87	1,12	0,86	1,14	0,93	1,21	
0,86	1,00	1,22	1,01	1,25	1,01	1,24	0,89	–	
0,96	0,94	1,14	0,92	1,22	0,90	–	–	–	
0,88	1,05	1,16	0,80	1,13	–	–	–	–	
0,94	0,84	–	–	–	–	–	–	–	

Испытание производили сразу же после приготовления образцов

0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,91	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Подводя итог, следует отметить, что шлакосиликатогрунтовые смеси характеризуются замедленными процессами схватывания и твердения. Продолжительность этих процессов существенно зависит от типа используемого грунта и плотности раствора жидкого стекла, применяемого в качестве активатора. Чем ниже

плотность раствора жидкого стекла, тем медленнее происходит схватывание смеси. Это увеличивает период, в течение которого смесь остается пригодной для технологических операций, таких как перемешивание, распределение по поверхности и уплотнение.

Медленное схватывание шлакосиликатогрунтовых смесей предоставляет возможность проведения дополнительного уплотнения под воздействием движения строительного транспорта. Одновременно с этим происходит выравнивание поверхности, что помогает избежать деформаций, вызванных неравномерным уплотнением материала. Рекомендуется разрешать движение строительной техники по уложенной смеси в первые 2–3 суток после ее укладки. В этот период прочность укрепленного грунта обеспечивается преимущественно коагуляционными связями, которые обладают способностью к восстановлению после механических воздействий.

Важно отметить, что в течение этих первых суток необходимо внимательно контролировать влажностный режим смеси, особенно в жаркую и сухую погоду. Поддержание влажности, близкой к оптимальной, предотвращает преждевременное высыхание смеси и способствует правильному протеканию процессов твердения. Это обеспечивает формирование первоначальной структуры материала и закладывает основу для последующего образования кристаллизационных связей.

После истечения 2–3 суток движение строительного транспорта по шлакосиликатогрунтовому слою следует прекратить. На поверхность слоя рекомендуется нанести паронепроницаемое покрытие, которое предотвратит испарение влаги из материала и создаст благоприятные условия для дальнейшего твердения. Такое покрытие может быть выполнено из различных материалов, способных обеспечить необходимую герметичность и долговечность в условиях строительства.

Устройство верхнего слоя основания или дорожного покрытия рекомендуется осуществлять не ранее чем через 28 суток после укладки шлакосиликатогрунтового слоя. Этот временной интервал необходим для полного формирования кристаллизационных связей внутри материала, которые обеспечивают его окончательную прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Достижение требуемых показателей прочности является критически важным для надежности и долговечности сооружений, построенных с использованием шлакосиликатогрунтовых смесей.

Таким образом, правильное управление процессами схватывания и твердения шлакосиликатогрунтовых смесей, а также соблюдение технологических рекомендаций по укладке и уходу за материалом позволяют получить укрепленный грунт с высокими эксплуатационными характеристиками. Учитывая влияние типа грунта и плотности раствора жидкого стекла, можно оптимизировать состав смеси и условия ее применения для конкретных строительных задач, что способствует повышению эффективности и качества работ.

Для того, чтобы шлакосиликатогрунтовый слой мог затвердеть до наступления отрицательных температур, устройство его следует прекращать с понижением температуры до +50 °С.

**Таблица 2.** Изменение прочности укрепленного грунта при последовательных разрушениях структурных связей

Время с момента приготовления образцов до момента их испытания в сутках													Примечание
0		1		2		3		4					
Прочность при сжатии, $кз/см^2$													
$R_0$		$R_0$		$R_1$	$R_0$		$R_1$	$R_0$		$R_1$	$R_0$	$R_1$	
10,5	10,4	10,1	11,3	8,2	10,1	11,0	7,9	10,5	10,6	7,7	11,6	9,1	
10,3	9,8	10,7	9,9	8,5	10,4	10,2	8,7	11,8	–	8,0	11,0	7,5	
8,9	11,0	10,2	11,5	8,1	9,8	9,9	8,5	10,2	–	8,0	9,6	7,8	
9,7	10,2	9,0	11,4	8,2	10,7	9,9	8,9	10,9	–	8,5	9,9	7,9	
10,4	10,7	10,7	11,1	8,5	8,7	10,9	8,0	9,1	–	8,3	10,0	9,3	
11,2	9,8	10,8	12,1	–	10,3	10,6	–	8,9	–	–	11,1	8,4	
9,8	10,8	11,5	11,5	–	10,4	10,5	–	11,0	–	–	10,1	7,7	
10,2	10,2	11,4	11,1	–	9,9	–	–	10,2	–	–	–	–	
10,7	9,6	12,1	12,3	–	9,7	–	–	9,5	–	–	–	–	
11,3	9,9	11,5	11,2	–	10,8	–	–	10,4	–	–	–	–	
10,5	10,1	10,9	–	–	10,7	–	–	12,0	–	–	–	–	

Испытание образцов из шлакосиликатогрунтовой смеси производили сразу же после приготовления образцов

**Таблица 3.** Изменение прочности укрепленного грунта при последовательных разрушениях структурных связей

Время с момента приготовления образцов до момента их испытания в сутках												Примечания
3		4			5			6		7		
Прочность при сжатии, кг/см <sup>2</sup>												
R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>
13,5	12,8	9,0	7,8	9,2	9,0	10,1	9,9	8,0	11,3	7,6	12,4	9,5
12,9	13,1	7,9	8,6	8,7	9,3	10,2	10,6	9,5	12,0	9,4	11,8	7,8
12,1	12,7	8,2	8,8	9,8	8,4	7,8	11,7	7,9	11,5	10,3	10,4	8,4
12,6	12,5	7,6	9,0	9,5	7,3	11,5	–	9,2	10,9	8,4	9,7	10,0
14,3	13,0	8,7	9,6	10,1	9,0	9,1	–	9,4	11,0	8,8	9,2	8,3
13,8	13,8	–	9,3	9,9	–	9,3	–	–	11,7	–	–	–
13,4	13,2	–	8,3	12,2	–	12,3	–	–	10,1	–	–	–
12,7	13,2	–	9,0	–	–	10,4	–	–	9,8	–	–	–
12,9	13,7	–	8,6	–	–	12,0	–	–	–	–	–	–
13,1	13,9	–	7,9	–	–	10,0	–	–	–	–	–	–
12,3	13,5	–	10,5	–	–	9,4	–	–	–	–	–	–
14,1	13,5	–	9,8	–	–	10,7	–	–	–	–	–	–
13,3	13,7	–	10,1	–	–	10,5	–	–	–	–	–	–

Испытание образцов из шлакосиликаогрунтовой смеси производили после трех суток их твердения во влажных условиях

**Таблица 4.** Изменение прочностных характеристик укрепленного грунта при последовательных разрушениях структурных связей

Время с момента приготовления до момента их испытания в сутках												Примечание
7		8			9			10		11		
Прочность при сжатии, кг/см <sup>2</sup>												
R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>		R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>
19,3	20,2	8,0	10,0	12,0	9,8	11,3	11,7	11,0	12,9	9,3	10,8	9,3
19,6	20,0	7,5	11,4	9,3	8,2	12,7	13,2	9,5	13,4	9,0	12,2	10,6
18,9	19,4	8,8	11,9	11,5	9,5	11,6	11,8	9,6	11,9	10,4	12,5	9,4
19,1	19,9	9,6	10,2	12,1	7,9	9,3	–	10,5	11,5	11,1	11,2	8,9
18,6	19,8	9,1	10,5	11,8	10,1	12,1	–	8,9	12,4	10,6	12,6	10,3
18,4	19,1	–	11,3	9,5	–	10,8	–	–	9,9	–	10,9	–
18,1	18,8	–	11,2	11,9	–	11,4	–	–	12,6	–	–	–
18,8	20,4	–	13,2	10,7	–	12,1	–	–	13,1	–	–	–
20,5	18,8	–	9,4	11,0	–	11,6	–	–	11,6	–	–	–
19,4	20,3	–	11,5	–	–	12,4	–	–	12,5	–	–	–
18,5	19,5	–	10,3	–	–	11,9	–	–	10,1	–	–	–
20,0	19,5	–	11,1	–	–	10,5	–	–	13,1	–	–	–
19,7	20,7	–	10,7	–	–	12,9	–	–	–	–	–	–
19,0	19,2	–	11,9	–	–	10,0	–	–	–	–	–	–
19,3	19,7	–	11,7	–	–	11,5	–	–	–	–	–	–

Испытание образцов из шлакосиликаогрунтовой смеси производилось после 7 суток их твердения во влажных условиях

**Заключение.** Проведенные испытания образцов шлакосиликаогрунтовых смесей, которые предварительно подвергались процессу твердения перед тестированием, выявили интересную закономерность. После первых циклов разрушения структурных связей наблюдалось снижение прочности материала. Однако затем, аналогично тому, что отмечается при испытании свежесформированных образцов, прочность стабильно восстанавливалась до первоначальных значений. Это указывает на то, что в образцах, твердеющих некоторое время во влажных условиях, присутствуют оба типа связей: коагуляционные и кристаллизационные.

Особенно примечательно, что в образцах, твердеющих в течение 3-х суток, прочность кристаллизационных связей составляла всего 2–3 кг/см<sup>2</sup>. Это свидетельствует об их начальной слабости и незначительном влиянии на общую прочность материала на ранних стадиях твердения. Формирование этих слабых кристаллизационных связей начинается на вторые-третьи сутки процесса твердения смеси. Этот факт подтверждает, что оптимальный период для эффективного использования шлакосиликаогрунтовой смеси — перемешивания, распределения и уплотнения без существенной потери прочности — ограничивается двумя-тремя сутками.

Если продолжительность этого периода увеличивается, в смеси начинает формироваться значительное количество кристаллизационных связей. Разрушение этих связей при дальнейшем механическом воздействии, например, при повторном уплотнении или перемещении материала, может привести к существенному снижению прочности укрепленного грунта. Исследования показали, что после 7 суток твердения прочность кристаллизационных связей в образцах достигает примерно 50 % от общей прочности (см. рис. 4).

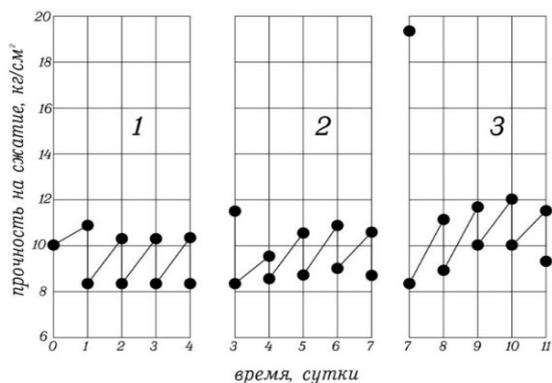


Рис. 4. Динамика изменения прочности образцов из шлакосиликатогрунтовой смеси при многократных разрушениях и формированиях

#### Литература

- Боровлев А.О., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Логойда В.С. Методология проектирования лесовозных автомобильных дорог // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 01 октября 2021 года). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 168-175.
- Прокопец В.С., Скрыпников А.А., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Букреев В.Ю., Казачек М.Н. Методика проведения обследования эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2022. № 2. С. 51-54.
- Козлов Д.Г., Мануковский А.Ю. Технологические основы и методология строительства зимних лесовозных дорог // Строительные и дорожные машины. 2022. № 5. С. 43-48.
- Козлов Д.Г., Никитин В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Сапелкин Р.С., Тихомиров П.В., Тверитнев О.Н., Денисенко В.В. Интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. 206 с.
- Никитин В.В., Денисенко В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Тихомиров П.В., Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С., Прокопец В.С. Методика разработки нормативов для проектирования лесотранспортных сетей // Строительные и дорожные машины. 2021. № 12. С. 45-49.
- Popov M.I., Skrypnikov A.V., Khvostov V.A., Kozlov V.G., Kozlov D.G., Bukreev V.Y., Tikhomirov P.V., Abasov M.A. Accelerated convergence of numerical solution to square plate bending problem // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 969-976.
- Prokopets V.S., Skrypnikov A.V., Volodina Yu.Yu., Boykov P.A., Bondarev A.B., Borovlev Yu.A. Influence of the strength of the road structure on the resistance to movement // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 19–21 апреля 2022 года) Vol. Часть I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. P. 168-186.
- Nikitin V.V., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Pilyushina G.A., Kozlov D.G., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Denisenko V.V. Development of Mathematical Models for Optimization of the Road

Это означает, что материал становится значительно более устойчивым к механическим воздействиям, и любое разрушение структурных связей после этого периода может негативно сказаться на его прочностных характеристиках и долговечности.

Таким образом, при работе со шлакосиликатогрунтовыми смесями важно строго соблюдать временные рамки технологических операций. Понимание процессов формирования структурных связей позволяет оптимизировать этапы перемешивания, распределения и уплотнения смеси, чтобы предотвратить необратимое разрушение кристаллизационных связей и обеспечить максимальную прочность и устойчивость материала. Это особенно критично при строительстве инженерных сооружений, где надежность и долговечность укрепленных грунтовых оснований имеют первостепенное значение.

Дополнительно следует учитывать внешние условия, такие как температура и влажность, которые могут влиять на скорость процессов твердения и формирования структурных связей. Контроль этих параметров позволяет более точно прогнозировать поведение материала и планировать строительные работы таким образом, чтобы обеспечить наилучшие физико-механические свойства укрепленного грунта.

- Network, Taking into Account Geographical and Natural Factors // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes : Proceedings of 8th International Scientific Conference-School for Young Scientists (Cham, 01 января – 31 2022 года). Cham: Springer, 2023. P. 315-330.
- Сапелкин Р.С., Чернышова Е.В., Тверитнев О.Н., Скрыпников А.В., Боровлев Ю.А., Бондарев А.Б., Жук А.Ю. Увлажнение земляного полотна поверхностными водами // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 98-101.
- Тверитнев О.Н. Укрепление грунтов при строительстве лесовозных автомобильных дорог: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тверитнев Олег Николаевич, 2023. 130 с.
- Тимофеев В.А., Скрыпников А.В., Бавыкина Е.Г., Карпов А.С., Безрук А.С., Романов П.О., Жук А.Ю. Исследования структурной однородности укрепленных грунтов, применяемых при строительстве лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 172-180.
- Скрыпников А.В., Скворцова Т.В., Кондрашова Е.В., Вакулин А.И., Логачев В.Н. Методы, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ФЛИНТА", 2013. 312 с.
- Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В., Вакулин А.И. Повреждение лесных экосистем под влиянием лесозаготовительной техники и лесных автомобильных дорог // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 2. С. 101-102.
- Скрыпников А.В., Вакулин А.И., Логачев В.Н. Моделирование транспортного потока на лесовозных автомобильных дорогах // Моделирование систем и процессов. 2011. № 4. С. 64-67.
- Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 6(366). С. 117-127.
- Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Оптимизация межремонтных сроков лесовозных автомобильных дорог // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-3. С. 667-671.

17. Тимофеев В.А., Скрыпников А.В., Бавыкина Е.Г., Карпов А.С., Безрук А.С., Романов П.О., Жук А.Ю. Опыт применения укрепленных грунтов в строительстве лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 181-190.
18. Смирнов М.Ю., Скрыпников А.В., Логачев В.Н., Чернышова Е.В., Логойда В.С., Ломакин Д.В. Использование укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесных дорог. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 168 с.
19. Кайманова Л.И. Укрепление засоленных грунтов цементом для дорожных одежд в условиях Западной Сибири: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.22.10) / Кайманова Лидия Ивановна, 1973. 20 с.
20. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 с.
21. Ивашенко Ю.Г., Фомина Н.Н. Вяжущие вещества в строительстве: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2015. 156 с.
22. Qutowski W. Inz. Chem., 1973, V. 3, N 3, P. 477.
23. Yirgensons B., Straumanis M.E. Colloid Chemistry, Mcmillan., New York, 1962, P. 101-132.
24. Anderson P., Klein L.C. Shrinkage of lithium aluminosilicate gels during drying// J. of NonCrystalline Solids, 1987. V. 93. P. 415-422.
25. Buckley X.D. Stronhal O., Sansler I.I. Ceramic Bull., 1981, U 60, N 11, P. 1196-1199.
26. Qi-Ming Yuan, Jia-Qi Tan. Processing and Microstruktura of Mullite-Zirkonia Composites Prepared from Sol-Gel Powders., J. Amer. Ceram. Soc., 1986, V. 69, N 3, P. 268-269.
8. Nikitin V.V., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Pilyushina G.A., Kozlov D.G., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Denisenko V.V. Development of Mathematical Models for Optimization of the Road Network, Taking into Account Geographical and Natural Factors // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of 8th International Scientific Conference-School for Young Scientists (Cham, 01 yanvarya - 31 2022 goda). Cham: Springer, 2023. P. 315-330.
9. Sapelkin R.S., Chernyshova E.V., Tveritnev O.N., Skrypnikov A.V., Borovlev Yu.A., Bondarev A.B., Zhuk A.Yu. Moistening of the earthbed with surface waters // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 98-101.
10. Tveritnev O.N. Soil strengthening in the construction of logging roads: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Tveritnev Oleg Nikolaevich, 2023. 130 p.
11. Timofeev V.A., Skrypnikov A.V., Bavykina E.G., Karpov A.S., Bezruk A.S., Romanov P.O., Zhuk A.Yu. Studies of structural homogeneity of fortified soils used in the construction of logging highways // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 2 (58). P. 172-180.
12. Skrypnikov A.V., Skvorcova T.V., Kondrashova E.V., Vakulin A.I., Logachev V.N. Methods, models and algorithms for improving the transport and operational qualities of forest highways in the process of design, construction and operation. M.: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "FLINTA", 2013. 312 p.
13. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Skvorcova T.V., Vakulin A.I. Damage to forest ecosystems under the influence of logging equipment and forest highways // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2012. № 2. P. 101-102.
14. Skrypnikov A.V., Vakulin A.I., Logachev V.N. Modeling of traffic flow on logging roads // Modeling of systems and processes. 2011. № 4. P. 64-67.
15. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichij S.A., Mogutnov R.V. Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging highways // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 6 (366). P. 117-127.
16. Skrypnikov A.V., Skvorcova T.V. Optimization of interrepair terms of logging automobile roads // Fundamental research. 2011. № 8-3. P. 667-671.
17. Timofeev V.A., Skrypnikov A.V., Bavykina E.G., Karpov A.S., Bezruk A.S., Romanov P.O., Zhuk A.Yu. The experience of using reinforced soils in the construction of logging roads // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 2 (58). P. 181-190.
18. Смирнов М.Ю., Скрыпников А.В., Логачев В.Н., Чернышова Е.В., Логойда В.С., Ломакин Д.В. The use of fortified soils, local materials and industrial waste for the construction of road coverings of forest roads. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 168 p.
19. Кайманова Л.И. Strengthening of saline soils with cement for road coverings in the conditions of Western Siberia: Avtoreferat dis. na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. (05.22.10) / Kaimanova Lidiya Ivanovna, 1973. 20 p.
20. Корнеев В.И., Данилов В.В. Liquid and soluble glass. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 p.
21. Ивашенко Ю.Г., Фомина Н.Н. Binders in construction: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2015. 156 p.
22. Qutowski W. Inz. Chem., 1973, V 3, N 3. P. 477.
23. Yirgensons V., Straumanis M. E. Colloid Chemistry, Mcmillan., New York, 1962. P. 101-132.
24. Anderson P., Klein L.C. Shrinkage of lithium aluminosilicate gels during drying// J. of NonCrystalline Solids, 1987. V. 93. P. 415-422.
25. Buckley X.D. Stronhal O., Sansler I.I. Ceramic Bull., 1981, U 60, N 11. P. 1196-1199.
26. Qi-Ming Yuan, Jia-Qi Tan. Processing and Microstruktura of Mullite-Zirkonia Composites Prepared from Sol-Gel Powders., J. Amer. Ceram. Soc., 1986, V 69, N 3. P. 268-269.

#### References

1. Borovlev A.O., Kozlov D.G., Tihomirov P.V., Logojda V.S. Methodology of designing logging roads // Problemy resursoobespechennosti i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii (Voronezh, 01 oktyabrya 2021 goda). Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I, 2021. P. 168-175.
2. Prokopec V.S., Skrypnikov A.A., Kozlov D.G., Tihomirov P.V., Bukreev V.Yu., Kazachek M.N. Methodology for conducting a survey of the operational condition of logging roads // Construction and Road Building Machinery. 2022. № 2. P. 51-54.
3. Kozlov D.G., Manukovskij A.Yu. Technological foundations and methodology of construction of winter logging roads // Construction and Road Building Machinery. 2022. № 5. P. 43-48.
4. Kozlov D.G., Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bryuhoveckij A.N., Sapelkin R.S., Tihomirov P.V., Tveritnev O.N., Denisenko V.V. Intelligent systems for designing logging automobile networks. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I, 2021. 206 p.
5. Nikitin V.V., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Bryuhoveckij A.N., Tihomirov P.V., Kozlov D.G., Sapelkin R.S., Prokopec V.S. Methodology for the development of standards for the design of forest transportation networks // Construction and Road Building Machinery. 2021. № 12. P. 45-49.
6. Popov M.I., Skrypnikov A.V., Khvostov V.A., Kozlov V.G., Kozlov D.G., Bukreev V.Y., Tihomirov P.V., Abasov M.A. Accelerated convergence of numerical solution to square plate bending problem // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 969-976.
7. Prokopets V.S., Skrypnikov A.V., Volodina Yu.Yu., Boykov P.A., Bondarev A.B., Borovlev Yu.A. Influence of the strength of the road structure on the resistance to movement // Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologij v APK: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii (Voronezh, 19-21 aprelya 2022 goda) Vol. Chast' I. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I, 2022. P. 168-186.