

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 625.7.8

DOI:10.18324/2077-5415-2024-3-84-94

Взаимодействие фосфорного шлака, жидкого стекла и грунта
в земляном полотне лесовозных автомобильных дорогИ.А. Викулин^{1a}, Д.Г. Козлов^{2b}, Ю.А. Боровлев^{3c}, А.С. Сергеев^{4d},
А.А. Скряпников^{1e}, А.О. Бутенко^{1f}, А.Ю. Жук^{5g}¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия² Воронежский государственный аграрный университет им. Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия³ Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, Россия

⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

пр. Комсомольский, 29, Пермь, Россия

⁵ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия^a vikigor_1719@mail.ru, ^b dimvsau@mail.ru, ^c borov.borov.ar@yandex.ru, ^d pnipu_sk@mail.ru,^e skrypnikovvsafe@mail.ru, ^f tella-alina@mail.ru, ^g ftslk@brstu.ru^a <https://orcid.org/0000-0001-5072-6748>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0817-9300>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>,^d <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, ^f <https://orcid.org/0009-0006-4523-841X>,^g <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 05.09.2024, принята 23.09.2024

В статье проводится исследование взаимодействия между фосфорным шлаком, жидким стеклом и почвой в контексте создания земляного полотна для лесовозных автомобильных дорог. Проанализированы эффекты от внедрения фосфорного шлака и жидкого стекла в грунт с целью оптимизации его свойств и улучшения эксплуатационных характеристик. Исследование включает лабораторные испытания, направленные на оценку влияния этих добавок на механические и физико-химические свойства грунта. Особое внимание уделено повышению прочности, устойчивости к воздействию влаги и другим параметрам, влияющим на долговечность и надежность дорожных покрытий в лесной промышленности. Полученные результаты предлагают новый подход к использованию фосфорного шлака и жидкого стекла в инженерных решениях для укрепления и совершенствования грунтовых дорожных покрытий. Кроме того, в статье проанализированы прочностные характеристики укрепленного грунта в зависимости от химического состава жидкого стекла, а также количественных показателей шлака. В ходе лабораторных испытаний были изучены различные формулы жидкого стекла и количества шлака, а также их воздействие на механические свойства стабилизированного грунта. Результаты экспериментов указывают на значительное улучшение прочности грунта при определенных комбинациях жидкого стекла и шлака. Исследование также показало, что прочностные характеристики укрепленного грунта зависят от множества факторов, включая плотность грунта, уровень его влажности, исходные свойства почвы и концентрацию используемых добавок. Полученные данные могут быть полезны для разработки эффективных технологий строительства и реконструкции лесовозных автомобильных дорог, направленных на повышение их устойчивости и снижение экологического воздействия. Кроме того, это позволяет оптимизировать процесс укрепления грунта и повысить его прочностные показатели за счет использования жидкого стекла и фосфорного шлака.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги; грунтовое полотно; шлакосиликатные вяжущие; прочность укрепленного грунта.

The interaction of phosphoric slag, liquid glass and soil in the roadbed
of logging roadsI.A. Vikulin^{1a}, D.G. Kozlov^{2b}, Yu.A. Borovlev^{3c}, A.S. Sergeev^{4d},
A.A. Skrypnikov^{1e}, A.O. Butenko^{1f}, A.Yu. Zhuk^{5g}¹ Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolyutsii Ave., Voronezh, Russia² Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great; 1, Michurin St., Voronezh, Russia³ Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin; 54a, Starykh Bolshevikov St., Voronezh, Russia⁴ Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Pros., Perm, Russia⁵ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a vikiyor_1719@mail.ru, ^b dimvsau@mail.ru, ^c borov.borov.ar@yandex.ru, ^d pnipu_sk@mail.ru,

^e skrypnikovvsafe@mail.ru, ^f tella-alina@mail.ru, ^g ftslk@brstu.ru

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

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

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

Received 05.09.2024, accepted 23.09.2024

The article examines the interaction between phosphorus slag, liquid glass and soil in the context of logging road subgrades. The work analyzes the effects of adding phosphorus slag and liquid glass to the soil layer in order to optimize its properties. The study includes laboratory tests that evaluate the effect of additives on the mechanical and physicochemical properties of the soil. Particular attention is paid to improving strength, resistance to moisture and other parameters that affect the durability and reliability of timber road surfaces. The study results provide new insight into the use of phosphorus slag and liquid glass in engineering solutions for strengthening and improving road surfaces. In addition, the article examines the effect of the composition of liquid glass and the dosage of slag on the strength of reinforced soil. Laboratory tests are carried out, during which various compositions of liquid glass and slag dosages are studied, as well as their effect on the mechanical properties of the reinforced soil. The results of the study indicate a significant improvement in soil strength with certain combinations of liquid glass and slag. The study also reveals that the strength of the reinforced soil depends on many factors, including soil density, moisture level, initial soil properties and the concentration of additives used. The data obtained can be useful for the development of effective technologies for the construction and reconstruction of logging roads in order to increase their stability and reduce environmental impact, as well as to optimize the process of strengthening the soil and increase its strength characteristics through the use of liquid glass and slag.

Keywords: logging roads; unpaved road surface; slag silicate binders; strength of the reinforced soil.

Введение. В процессе совершенствования технологии проектирования и организации работ строительства лесовозных автомобильных дорог стоит задача в выборе наиболее рационального метода исследования, который даст наиболее точные и достоверные результаты. Как показывает практика, данные задачи обладают достаточно сложным решением, что приводит к необходимости использовать аналитические методы и математический аппарат при их решении. Поэтому данная статья направлена на поиск решений с помощью математических подходов, которые помогут найти наиболее рациональное решение при производстве строительных работ лесовозных автомобильных дорог.

В частности, рассматриваются методы математического моделирования, оптимизации и алгоритмического анализа, которые позволяют эффективно планировать и управлять ресурсами в условиях сложной географии и ограничений, характерных для лесных районов. Также обсуждаются способы интеграции этих методов в практику проектирования, что способствует повышению эффективности и экономичности строительных процессов.

Дополнительно анализируются современные тенденции в применении математических методов в строительной отрасли, включая использование программного обеспечения для симуляции и прогнозирования. Это позволяет не только улучшить качество проектных решений, но и сократить время и затраты на реализацию проектов. Особое внимание уделяется адаптации математических моделей к специфическим условиям строительства лесных автодорог, где необходимо учитывать факторы окружающей среды, доступность материалов и техники, а также соблюдение экологических норм.

Постановка задачи. Решение задач организации производства строительных работ сводится к двум основным математическим методам — стохастическим и детерминированным. Детерминированные методы

включают в себя аналитические расчеты параметров объекта и аналитическое моделирование, которые основаны на точных исходных данных и предполагают предсказуемое поведение системы. Они позволяют определить оптимальные параметры строительства при известных условиях и ограничениях.

С другой стороны, стохастические методы охватывают аналитические расчеты параметров объекта в условиях неопределенности и методы имитационного моделирования. Эти подходы учитывают случайные факторы и вариации, неизбежные в реальных проектах, такие как колебания цен на материалы, погодные условия или риски задержек. Имитационное моделирование позволяет воспроизводить и анализировать различные сценарии развития событий, что помогает в принятии более обоснованных решений.

Использование как детерминированных, так и стохастических методов обеспечивает комплексный подход к планированию и управлению строительными проектами. Выбор конкретного метода зависит от специфики задачи, доступности данных и степени неопределенности факторов, влияющих на проект. Таким образом, сочетание этих методов способствует повышению эффективности организации строительства и минимизации возможных рисков.

Методика. Наши исследования опирались на методику, предложенную В.Е. Соколовичем, которую мы несколько модифицировали, главным образом, в части подготовки образцов. Изменения были внесены для более точного соответствия условиям нашего исследования.

По методике В.Е. Соколовича, подготовка образцов осуществляется следующим образом. Был приготовлен глинисто-силикатный раствор на основе алюминия натрия и жидкого стекла, которым заполняли стальные формы в виде стакана, внутренняя поверхность которых покрывалась парафином для предотвращения прилипания раствора к стенкам. По истечении времени

образцы извлекались и подвергались лабораторным испытаниям [1].

Данный метод наиболее близко воспроизводит реальные условия затвердевания глинисто-силикатных растворов при их укреплении методом инъекции жидкого стекла непосредственно в грунт.

Но, как показывает практика, в процессе строительства дорожного полотна из укрепленного грунта в месте производства уплотненного слоя данная методика не позволяет правильно моделировать процесс, происходящий внутри данного слоя в результате его неоднородности. Поэтому в процессе проводимых нами лабораторных исследований, направленных на изучение свойств укрепленных грунтов, данная методика не нашла место.

В связи с этим мы внесли изменения в процедуру приготовления образцов, адаптировав методику для более точного отражения условий уплотнения слоев в дорожном строительстве. Наша модифицированная методика позволяет лучше моделировать реальные процессы, происходящие в укрепленном грунте при его уплотнении, что обеспечивает более достоверные результаты при последующих испытаниях. Это, в свою очередь, способствует получению более точных данных о физико-механических свойствах материала, необходимых для оптимизации технологии строительства и повышения долговечности дорожных покрытий.

Решение задачи. За основу нами была принята методика В.Е. Соколовича, и во всех проводимых экспериментах соотношение жидкого стекла к шлаку составляло 0,32. Приготовленную смесь укладывали в формы в два слоя, используя штыкование для уплотнения каждого слоя. Затем формы с образцами подвергали 30-кратному встряхиванию на лабораторном встряхивающем столе, что способствовало равномерному распределению компонентов и удалению воздушных пузырьков. После этого в течение 20 ч формы помещали в камеру, заполненную водой. По истечении времени испытываемые образцы извлекали из форм и перемещали во влажные условия, в эксикатор над водой, на сроки 7 и 28 суток, обеспечивая оптимальные условия для процессов твердения [2–4].

После завершения указанных периодов выдержки образцы подвергались испытаниям на прочность при изгибе с использованием аппарата Кюля. Затем каждый образец разрезали на кубики для проведения испытаний на сжатие с габаритными размерами 1 см³. С помощью радиографического и термического методов были исследованы внутренние части лабораторных образцов. На основании справочных источников по термографии и рентгенографии были проведены интерполяции результатов исследований.

В качестве лабораторных образцов была использована шлаковая смесь с грунтом, которые затворялись жидким стеклом. В результате приготовления образцов получались силикатогрунтовые и шлакосиликатогрунтовые образцы, которые имели цилиндрическую форму диаметром и высотой 5 см. В течение 3 мин производилась формовка лабораторного образца с

нагрузкой 100 кг/см², что давало возможность создать необходимую степень уплотнения материала. После приготовления образцов их помещали во влажные условия хранения — над водой в эксикаторе — на различные сроки: 7, 14, 28, 90 и 360 дней, чтобы исследовать динамику изменения их свойств со временем [5–12].

После выдержки заданного срока, некоторые образцы извлекали из десикаторов и помещали в стеклянные стаканы, заполненные дистиллированной водой в соотношении объемов 1:5 (образец к воде). В течение определенного времени воду периодически заменяли и анализировали на содержание оксида натрия (Na₂O) и диоксида кремния (SiO₂). По изменению концентраций этих компонентов в воде и их исходному содержанию в образцах оценивали количество Na₂O и SiO₂, вымытых из материала и поглощенных грунтом и шлакогрунтовой смесью. Это позволяло определить степень растворения и миграции активных компонентов.

Часть образцов подвергалась дополнительным термическим и рентгенографическим исследованиям для изучения их микроструктуры и фазового состава. Эти методы помогали выявить особенности кристаллизации, степень гидратации и образование новых фаз в процессе твердения.

Согласно общеизвестным методикам, применяемым для цементно-шлаковых смесей, производились подготовка и испытание образцов грунта, которые затворялись шлакосиликатными вяжущими. Такой подход обеспечивал сопоставимость результатов и использование проверенных экспериментальных техник.

Грунт предварительно измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 5 мм для удаления крупных включений и получения однородной фракции. В воздушно-сухом состоянии грунт смешивали с молотым гранулированным шлаком, тщательно перемешивая для равномерного распределения компонентов. Полученную смесь перемешивали до образования однородной шлакосиликатогрунтовой массы, при этом ее затворяли жидким стеклом.

Из полученной массы с помощью гидравлического пресса ПСУ-50 под нагрузкой 100 кг/см² в течение 3 мин изготавливали цилиндрические образцы диаметром и высотой по 5 см, а также балочки размером 4×4×16 см. Хранение полученных образцов осуществлялось в ваннах с гидравлическим затвором, в результате чего поддерживалась постоянная влажность и предотвращалось ее испарение из материала [13–18].

На универсальной испытательной машине МИМ.1 были произведены испытания балочек на изгиб, что позволило наиболее точно измерить прочностные характеристики при изгибающих нагрузках. Половинки балочек, полученные после испытаний на изгиб, подвергались испытаниям на сжатие на механическом прессе, что давало информацию о прочности материала при сжимающих нагрузках.

Как показывают результаты лабораторных исследований, при взаимодействии воды с фосфорным шлаком и фосфорсодержащими стеклами происходит постепенная гидратация этих материалов (рис. 1).

Данные результаты важны для понимания особенностей поведения фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол в строительных материалах. Низкая скорость гидратации может влиять на сроки набора прочности и другие эксплуатационные характеристики материалов на их основе. Понимание этих процессов позволяет оптимизировать условия применения таких материалов в строительстве, особенно при создании укрепленных грунтовых слоев в дорожном строительстве.

Таким образом, модифицированная методика приготовления и испытания образцов, адаптированная под условия уплотнения слоев в дорожных конструкциях, позволила более точно моделировать реальные процессы, происходящие в укрепленном грунте. Полученные данные способствуют развитию эффективных технологий использования шлакосиликатных вяжущих в строительстве и повышению долговечности и надежности сооружений [19–22].

Графики на рис. 1 показывают недостаточную гидратацию фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол, что свидетельствует о низкой гидравлической активности соединений с добавками пятиоксида фосфора. Повышение содержания пятиоксида фосфора в стеклах уменьшает их гидратацию. Наименьшая гидратация наблюдается у молотого гранулированного фосфорного шлака. При взаимодействии жидкого стекла и фосфорного шлака переход к $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкую фазу значительно снижается из-за низкой растворимости $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в щелочной среде. Например, в чистой воде при 200 °С растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ составляет 1,19–1,21 г/л (зависит от размеров кристаллов), а в щелочной среде при концентрации NaOH в 6,141 г/л — 0,196 г/л. При более высокой концентрации щелочи (более 20 г/л) содержание CaO в растворе минимально (только «следы») [5–7]. Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в дистиллированной воде и щелочах при различных температурах представлена в табл. 1 и 2.

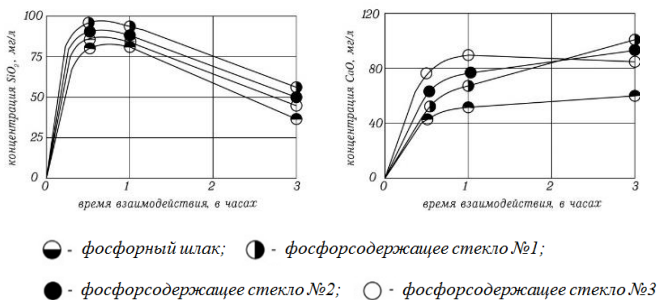


Рис. 1. График изменения концентрации SiO_2 и CaO в жидкой фазе при гидратации шлака и фосфорсодержащих стекол (под действием воды)

Таблица 1. Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в дистиллированной воде при различных температурах

Температура, град.	Концентрация, CaO , г/л	Температура, град.	Концентрация, CaO , г/л
0	1,30	120	0,400
15	1,22	125	0,308
25	1,13	150	0,247
40	1,00	190	0,084
50	0,917	250	0,037
90	0,523	–	–

0	1,30	120	0,400
15	1,22	125	0,308
25	1,13	150	0,247
40	1,00	190	0,084
50	0,917	250	0,037
90	0,523	–	–

На рис. 2 приведены графики изменения содержания оксида кальция (CaO) в жидкой фазе при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом. В частности, при контакте фосфорного шлака с раствором жидкого стекла плотностью 1,0036 г/см³ в течение 3 ч было обнаружено содержание CaO , равное 81 мг/л. Однако при использовании более концентрированного раствора жидкого стекла с плотностью 1,16 г/см³ содержание оксида кальция в жидкой фазе снизилось до 15 мг/л. Аналогично при взаимодействии фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом той же плотности (1,16 г/см³) содержание CaO в жидкой фазе составило около 8 мг/л.

Эти наблюдения свидетельствуют о том, что увеличение плотности (концентрации) жидкого стекла приводит к снижению растворимости оксида кальция в системе. Это может быть связано с тем, что более концентрированный раствор жидкого стекла обладает повышенной щелочностью, что способствует уменьшению растворения CaO из фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла. Таким образом, концентрация CaO в жидкой фазе уменьшается с увеличением плотности жидкого стекла.

В табл. 2, в дополнение, приведены данные о растворимости гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в растворах гидроксида натрия (NaOH) при различных температурах. Эти данные важны для понимания процессов, происходящих в системе, поскольку растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ влияет на концентрацию ионов кальция в жидкой фазе. Из таблицы можно увидеть, как температура и концентрация NaOH влияют на способность $\text{Ca}(\text{OH})_2$ растворяться в растворе. Например, при повышении температуры растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ может увеличиваться, что, в свою очередь, влияет на химические реакции в системе и на процессы твердения шлакосиликатного вяжущего.

Сопоставление данных на рис. 2 и в табл. 2 позволяет сделать вывод о комплексном влиянии концентрации жидкого стекла и температуры на растворимость компонентов системы. Понимание этих зависимостей важно для оптимизации процесса укрепления грунтов. Например, выбор оптимальной плотности жидкого стекла может позволить контролировать концентрацию CaO в жидкой фазе, что влияет на скорость и эффективность процессов твердения и, следовательно, на конечные физико-механические свойства укрепленного грунта.

Таблица 2. Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в щелочах при различных температурах

Температура, град.	Концентрация	
	NaOH, г/л	CaO, г/л
20	1,008	0,779
20	2,100	0,516
20	4,140	0,281
20	6,141	0,196
20	8,361	0,146
70	0,400	0,530
70	1,600	0,250
70	5,00	0,040
70	8,00	0,010
70	20,00	следы
100	0,40	0,350
100	1,60	0,140
100	5,00	0,010
100	8,00	следы

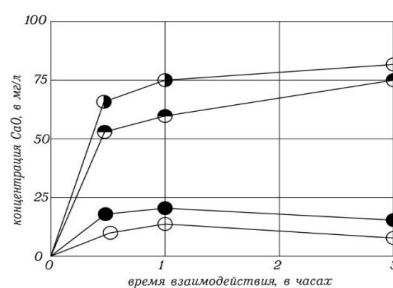
Кроме того, учитывая влияние температуры на растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в растворах NaOH, можно регулировать условия твердения шлакосиликатогрунтовых смесей для достижения желаемых свойств материала. Это особенно актуально при строительстве в различных климатических условиях, где температура окружающей среды может существенно влиять на протекающие в материале процессы.

Таким образом, представленные данные подчеркивают важность контроля параметров системы при взаимодействии фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом и фосфорного шлака. Оптимизация этих параметров позволяет улучшить процессы твердения шлакосиликатного вяжущего и получить укрепленные грунты с заданными прочностными характеристиками, что имеет большое значение для строительной отрасли и повышения надежности возводимых сооружений.

Согласно проведенным исследованиям, суспензии фосфорного шлака и жидкого стекла с добавками P_2O_5 плотностью $1,26 \text{ г/см}^3$, вызывают присутствие извести в виде «следов».

На рис. 2 и 3 видно, что интенсивность перехода CaO в раствор неравномерная: в первые часы она является наибольшей, а в дальнейшем имеет менее выраженное возрастание. Объясняется это тем, что возникающая в результате взаимодействия исходного продукта и реагента пленка оказывает замедляющее действие на скорость гидратации. По прошествии

времени данная пленка увеличивается в размерах и плотности, что снижает проникновение жидкого стекла или воды вовнутрь частиц фосфорсодержащего стекла или шлака. Данное явление было отмечено рядом отечественных и зарубежных ученых при взаимодействии жидкого стекла на частицах доменного шлака и глиноземсодержащих стекол. Для таких самотормозящих процессов скорость перехода CaO в жидкую фазу зависит от концентрации жидкого стекла, времени взаимодействия и температуры [8–9].



- - фосфорный шлак и жидкое стекло уд. веса $1,036 \text{ г/см}^3$
- - фосфорсодержащее стекло и жидкое стекло уд. веса $1,036 \text{ г/см}^3$
- - фосфорный шлак и жидкое стекло уд. веса $1,16 \text{ г/см}^3$
- - фосфорсодержащее стекло и жидкое стекло уд. веса $1,16 \text{ г/см}^3$

Рис. 2. График изменения концентрации CaO в жидкой фазе при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом

А.Л. Ротинян и Б.В. Дроздов предложили наиболее подходящее уравнение для самотормозящих реакций, охватывающее все факторы [10]:

$$V = \frac{1}{t} \lg \frac{a}{a-x} - \beta \frac{x}{t}, \quad (1)$$

где V — суммарная скорость реакции; a — начальная концентрация вещества; x — концентрация вещества, вступившего в реакцию ко времени t от начала опыта; β — коэффициент торможения реакции.

Как показывает практика, применение уравнения (1) к процессам самоторможения, происходящим при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом низкой плотности ($1,036 \text{ г/см}^3$), было подтверждено экспериментально. Результаты расчетов показали линейную зависимость, что отражено на рис. 3, где по оси ординат отложено значение $\frac{1}{t} \lg \frac{a}{a-x}$, а по оси абсцисс — $\frac{x}{t}$.

Данное уравнение позволяет более точно описать кинетику самотормозящих реакций, учитывая не только начальные концентрации реагентов, но и влияние продуктов реакции на ее скорость. Коэффициент β отражает степень замедления реакции из-за накопления продуктов, которые могут ингибировать дальнейшее протекание процесса.

В контексте взаимодействия фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом это уравнение помогает понять, как изменяется скорость

реакции со временем и какие факторы на нее влияют. Например, при использовании жидкого стекла низкой плотности наблюдается определенная динамика изменения концентрации СаО в жидкой фазе, что связано с особенностями растворимости и реакции компонентов системы.

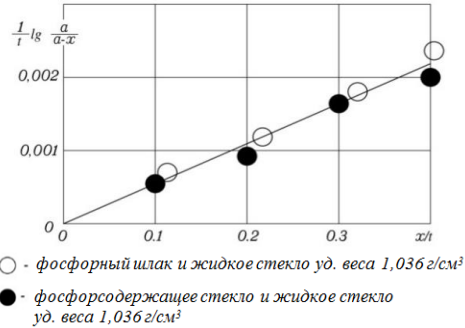


Рис. 3. Применимость уравнения А.Л. Ротиняна и Б.В. Дроздова к взаимодействию исследуемых продуктов

Как показали результаты наших предыдущих исследований, частичное поглощение жидкого стекла грунтовыми частицами происходит при введении шлакосиликатного вяжущего. Данное явление приводит к снижению процесса твердения грунта при нарушении оптимальных соотношений вяжущих. Как показывает практика, различные грунты обладают разной способностью к поглощению жидкого стекла, каждый тип грунта требует индивидуального подбора оптимального состава шлакосиликатного вяжущего для обеспечения эффективного твердения. Эти выводы подтверждаются результатами наших экспериментов.

Данные, представленные на рис. 4, показывают, что в каждом конкретном случае максимальная прочность укрепленного материала достигается при определенном удельном весе жидкого стекла. Просматривается закономерность в том, что наличие мелкодисперсных

частиц приводит к замедлению процесса набора прочности. Для таких отдельных случаев рекомендуется использовать жидкое стекло более высокой плотности в целях получения максимального значения прочности материала.

Это явление объясняется тем, что мелкие частицы грунта обладают большей удельной поверхностью и, следовательно, более высокой способностью поглощать компоненты жидкого стекла. В результате активная концентрация вяжущего в системе снижается, что замедляет процессы гидратации и твердения. Поэтому для грунтов с высоким содержанием тонкодисперсных фракций необходимо увеличивать плотность жидкого стекла, чтобы компенсировать поглощение и поддерживать оптимальные условия для твердения.

Таким образом, при разработке и применении шлакосиликатного вяжущего важно учитывать гранулометрический состав грунта и его адсорбционные свойства. Индивидуальный подбор состава вяжущего для каждого типа грунта позволяет обеспечить оптимальные условия твердения и достичь максимальных прочностных характеристик укрепленного грунта. Это особенно актуально при строительстве на грунтах с высоким содержанием глинистых и пылеватых частиц, где стандартные составы вяжущего могут быть неэффективны.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что эффективное укрепление грунтов шлакосиликатным вяжущим требует комплексного подхода, включающего анализ свойств грунта и корректировку состава вяжущего. Такой подход обеспечивает надежность и долговечность строительных конструкций, возводимых на различных типах грунтов, и способствует оптимизации технологических процессов в строительстве.

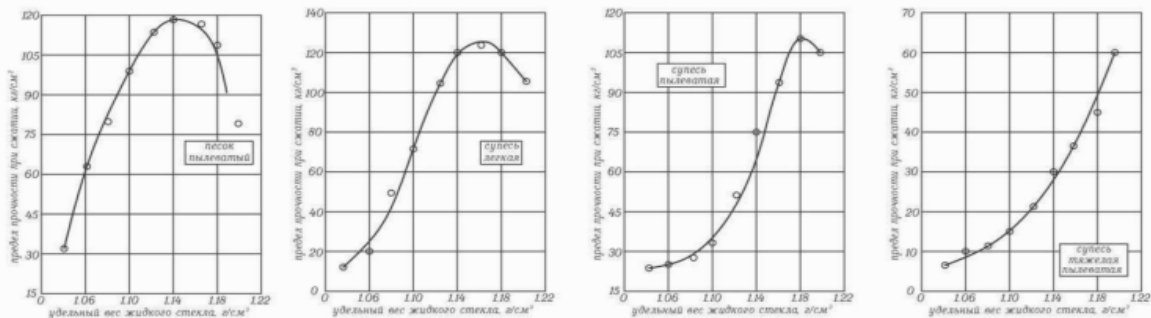


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии от удельного веса жидкого стекла и типа грунта

Анализ данных, представленных на рис. 5, указывает на зависимость прочности укрепленного грунта от удельного веса жидкого стекла. При низких значениях удельного веса жидкого стекла, а, следовательно, при низком содержании в нем оксида натрия (Na₂O) и диоксида кремния (SiO₂) значительная часть этих компонентов поглощается тонкодисперсными частицами грунта. Это поглощение препятствует участию активных компонентов в реакциях со шлаком, что приводит к замедленному

процессу твердения вяжущего и медленному увеличению прочности укрепленного грунта.

Первый участок кривой зависимости прочности при сжатии $R_{сж} = f(\text{уд. вес})$ характеризуется плавным, постепенным ростом прочности. Причем чем больше в грунте содержится пылегато-глинистых частиц, тем более протяженным становится этот участок кривой. Это связано с увеличенной поглотительной способностью таких

грунтов, которые активно адсорбируют компоненты жидкого стекла [15; 16].

С увеличением удельного веса жидкого стекла и, соответственно, повышением содержания Na_2O и SiO_2 происходит насыщение грунта этими компонентами. В результате уменьшается степень их поглощения грунтом, и они начинают активно участвовать в реакциях со шлаком. Это способствует нормализации процесса твердения вяжущего и приводит к существенному увеличению прочности укрепленного грунта. На этом этапе наблюдается второй участок кривой, где рост прочности становится более интенсивным.

Дальнейшее увеличение удельного веса жидкого стекла приводит к перенасыщению грунта его компонентами. Избыточное количество жидкого стекла негативно влияет на процесс твердения и структуру образующегося материала. Это проявляется в замедлении роста прочности, а после достижения определенного предела — в ее снижении. Третий участок кривой отражает эту тенденцию: повышение прочности сначала замедляется, а затем начинает уменьшаться.

Важно отметить, что чем выше поглотительная способность грунта, тем более выраженным становится эффект перенасыщения при высоких значениях удельного веса жидкого стекла. Грунты с большой долей тонкодисперсных частиц способны поглощать больше компонентов жидкого стекла, что при избытке приводит к ухудшению физико-механических свойств укрепленного грунта [9–14; 17].

Таким образом, для достижения оптимальных прочностных характеристик необходимо тщательно подбирать удельный вес жидкого стекла в зависимости от типа грунта. Оптимизация этого параметра позволяет обеспечить эффективное твердение шлакосиликатного вяжущего и предотвратить негативные эффекты, связанные с недостатком или избытком компонентов жидкого стекла. Это имеет особое значение при строительстве на грунтах с высокой поглотительной способностью, где стандартные составы вяжущего могут быть неэффективными без соответствующей корректировки.

Кроме того, понимание этой зависимости помогает в разработке более эффективных технологий укрепления грунтов, учитывающих индивидуальные свойства каждого типа грунта. Это способствует повышению надежности и долговечности строительных конструкций, а также оптимизации затрат на материалы и процессы строительства.

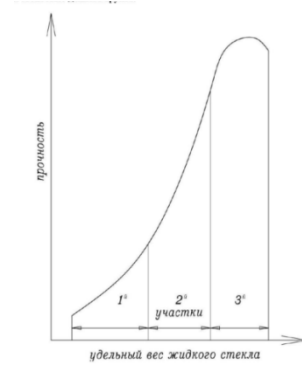


Рис. 5. Влияние удельного веса жидкого стекла на прочность грунта, укрепленного шлакосиликатным вяжущим

Математические выражения изменения прочности на сжатие ($R_{сж}$, кг/см^2) водонасыщенных образцов в зависимости от удельного веса жидкого стекла (Δ , г/см^3) при кремнеземистом модуле жидкого стекла 1,75 и 20 % шлаков в смеси для различных грунтов имеют следующий вид:

а) для пылеватого песка:

$$R_{сж} = 10^3 (-84,44\Delta^2 + 192,38\Delta - 108,4) \quad (2)$$

при $1,04 \leq \Delta \leq 1,20$.

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла ($\Delta_{опт}$), при котором достигается максимальная прочность укрепленного грунта, определяется путем взятия первой производной исходного уравнения и приравнивания ее к нулю:

$$\frac{dR_{сж}}{d\Delta} = -2 \cdot 84,44\Delta + 192,38 = 0. \quad (3)$$

Отсюда $\Delta_{опт} \approx 1,14 \text{ кг/см}^3$.

б) для легкой супеси:

$$R_{сж} = \begin{cases} e^{32,63\Delta - 31,43} & \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,09 \\ 10^3 (-12,59\Delta^2 + 29,27\Delta - 16,88) & \text{при } 1,09 \leq \Delta \leq 1,20 \end{cases} \quad (4)$$

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла равна $1,16 \text{ г/см}^3$;

в) для супеси пылеватой:

$$R_{сж} = \begin{cases} e^{20,82\Delta - 19,75} & \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,155 \\ 10^3 (-23,75\Delta^2 + 56,33\Delta - 33,3) & \text{при } 1,155 \leq \Delta \leq 1,20 \end{cases} \quad (5)$$

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла равна $1,19 \text{ г/см}^3$;

г) для тяжелой пылеватой супеси:

$$R_{сж} = e^{13,02\Delta - 1,15} \text{ при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,20. \quad (6)$$

Согласно уравнению (6), для тяжелой пылеватой супеси зависимость $R_{сж} = f(\Delta)$ представлена в виде экспоненциальной зависимости. Это говорит о том, что для данного типа грунта при величине удельного веса жидкого стекла $1,20 \text{ г/см}^3$, очевидно, не наступает еще перенасыщение шлакосиликатного вяжущего жидким стеклом и не наблюдается точка перелома, что

обуславливается большой поглотительной способностью данного грунта.

Полученные аналитические зависимости еще раз подтверждают влияние типа грунта на выбор состава шлакосиликатного вяжущего. Согласно полученной зависимости, при укреплении пылеватого песка шлакосиликатным вяжущим оптимальный удельный вес жидкого стекла равняется 1,14 г/см³, а при укреплении пылеватой супеси — 1,19 г/см³. Полученные математические зависимости прочности от удельного веса жидкого стекла могут быть использованы при проектировании составов укрепленных грунтов. Результаты расчетов, проведенных по приведенным зависимостям, дают высокую сходимость между теоретическими и экспериментальными данными. Полученные корреляционные отношения дают хорошую сходимость результатов между расчетными и экспериментальными данными, рассчитанные по формуле:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum (R_{i\phi} - R_{ip})^2}{\sum (R_{ip} - R_{i\phi})^2}} \quad (7)$$

Результаты сходимости лежат в пределах 0,92 до 0,99, а средний процент отклонений расчетных данных от экспериментальных, рассчитанный по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum \frac{(R_{\phi} - R_p)}{R_{\phi}} \quad (8)$$

составляет 1,5–5 %.

Результаты исследований влияния кремнеземистого модуля жидкого стекла на прочность грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, представлены в табл. 3.

Анализируя данные табл. 3, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальным кремнеземистым модулем жидкого стекла при укреплении грунтов шлакосиликатным вяжущим является модуль, равный 1,75.

Так как в шлакосиликатное вяжущее входят компоненты жидкое стекло и шлак, они оба оказывают влияние на прочность укрепленного грунта. Экспериментальные исследования проводились на различных типах грунта с использованием жидкого стекла кремнеземистого модуля 1,75 и удельного веса 1,20 г/см³. Результаты исследований представлены на рис. 6.

Таблица 3. Влияние кремнеземистого модуля жидкого стекла на прочность шлакосиликатогрунта

Наименование грунта	Количество шлака в смеси, % по весу	Показатели жидкого стекла		Предел прочности образцов при сжатии после 28 суток влажного твердения, кг/см ²	
		Удельный вес	Кремнеземистый модуль	Неводонасыщенные	Водонасыщенные
Супесь пылеватая	20	1,15	1,50	88	75
	20	1,15	1,75	81	77
	20	1,15	2,00	82	66
	20	1,15	2,25	55	44
	20	1,15	2,50	34	20
Супесь легкая крупная	30	1,20	1,50	86	74
	30	1,20	1,75	135	146
	30	1,20	2,00	77	75
	20	1,15	1,50	47	40
	20	1,15	1,75	82	74
	20	1,15	2,00	48	41

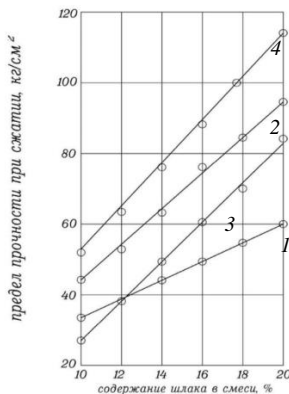


Рис. 6. Зависимость между пределом прочности при сжатии грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, и содержанием шлака в смеси: 1 — пылеватый песок; 2 — супесь легкая; 3 — супесь пылеватая; 4 — супесь тяжелая

Как показано на рис. 6, с увеличением дозировки шлака прочность на сжатие укрепленного грунта непрерывно увеличивается. При этом чем меньше пылеватых глинистых частиц в грунте, тем значительнее будет рост прочности с увеличением дозировки шлака.

Данные о влиянии содержания шлака на прочность укрепленного грунта показывают, что изменение содержания шлака позволяет изменить прочностные характеристики грунта.

Во всех случаях, рассматриваемых в рамках наших исследований, была обнаружена прямая пропорциональная зависимость между прочностью на сжатие укрепленного грунта и содержанием шлака в смеси (до 3 %). Эта зависимость для различных типов грунтов может быть математически описана следующими выражениями:

а) для пылеватого песка при 10 % ≤ Ш ≤ 20 %:

$$R_{сж} = 5,2 \cdot Ш - 22; \quad R_{сж} = 5,2 \cdot Ш - 22;$$

б) для легкой супеси при $10 \% \leq Ш \leq 20 \%$:

$$R_{сж} = 5,7 \cdot Ш - 3; \quad R_{сж} = 5,7 \cdot Ш - 3;$$

в) для пылевой супеси при $10 \% \leq Ш \leq 20 \%$:

$$R_{сж} = 4,6 \cdot Ш; \quad R_{сж} = 4,6 \cdot Ш;$$

г) для тяжелой пылевой супеси при $10 \% \leq Ш \leq 20 \%$:

$$R_{сж} = 2,4 \cdot Ш + 11; \quad R_{сж} = 2,4 \cdot Ш + 11,$$

где $R_{сж}$ — прочность на сжатие, $кг/см^2$; Ш — содержание шлака в смеси, %.

Эти уравнения позволяют расчетным путем определить необходимую прочность для каждого конкретного типа укрепленного грунта. Однако практический опыт применения шлаков в укреплении грунтов показывает, что содержание шлака в смеси должно составлять не менее 20 %. Такое количество активного компонента (шлака вместе с активатором) в составе смеси обеспечивает эффективное обволакивание частиц грунта, что способствует значительному повышению прочности материала.

Кроме того, высокое содержание шлака в диапазоне от 15 до 25 % способствует достижению высокой однородности смеси. Однородность является важным фактором, влияющим на стабильность и долговечность укрепленного грунта, особенно в условиях эксплуатации под нагрузкой.

Таким образом, при проектировании составов укрепленных грунтов необходимо учитывать не только математические зависимости прочности от содержания шлака, но и практические рекомендации по минимальному содержанию шлака в смеси. Это позволяет обеспечить оптимальные физико-механические свойства грунта, повысить его устойчивость к внешним воздействиям и продлить срок службы сооружений, возводимых на таком основании.

Важно также учитывать, что увеличение содержания шлака сверх определенного предела может не приводить к пропорциональному росту прочности, а в некоторых случаях может быть экономически нецелесообразным. Поэтому оптимизация состава укрепленного грунта должна основываться на комплексном анализе как технических, так и экономических факторов, с учетом специфики конкретного грунта и условий эксплуатации.

Результаты. Взаимодействие фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла №3 с жидким стеклом плотности $1,16 \text{ г/см}^3$ проявляет уникальные особенности, важные для понимания процессов твердения шлакосиликатных материалов. Изначально процесс протекает аналогично самотормозящимся реакциям: наблюдается быстрый переход компонентов в жидкую фазу, после чего содержание оксида кальция (CaO) в растворе начинает снижаться. Это свидетельствует о начальном интенсивном растворении реагентов в жидком стекле.

После этого происходит замедление реакций, обусловленное снижением концентрации активных компонентов в растворе. Медленные химические реакции между растворенной известью (CaO) и кремнеземом (SiO_2) приводят к образованию новых

соединений, нерастворимых в щелочной среде. Эти нерастворимые новообразования, такие как гидросиликаты кальция, выпадают в осадок. Данный феномен подтверждается экспериментальными наблюдениями: при длительном хранении фильтрата, полученного после фильтрации суспензии фосфорного шлака или фосфорсодержащего стекла с жидким стеклом, на стенках колб образуется осадок в виде очень тонкодисперсного белого порошка.

Образование вторичных продуктов в жидкой фазе происходит за счет взаимодействия различных анионов с коллоидными частицами гидроксидов кальция и магния. В частности, кремнекислородные (Si-O), алюмокислородные (Al-O) и аналогичные им анионы взаимодействуют с этими коллоидными частицами. На поверхности частиц шлака или фосфорсодержащих стекол образуются ионогенные центры с отрицательным зарядом, способные адсорбировать катионы кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}) из раствора. Гидроксильные ионы (OH⁻), связанные с этими катионами, формируют второй диффузный слой вокруг частиц, что влияет на электрическую двойную слойность и стабильность системы.

Поглощение извести и окиси магния приводит к развитию сорбционных процессов, в результате которых на поверхности частиц формируются вторичные продукты. Эти продукты представлены гидросиликатами и гидроалюмосиликатами кальция или магния. Формирование таких соединений способствует упрочнению структуры материала, повышая его механические свойства, такие как прочность и долговечность. Эти процессы особенно важны при использовании шлакосиликатных материалов в строительстве и грунтоукреплении.

Несмотря на низкую растворимость окиси кальция в щелочной среде, в жидкой фазе происходит непосредственное взаимодействие ионов кальция с кремнекислородными анионами. Кальциевые катионы, обладающие высокой ионной силой и зарядом, присоединяются к полимерным цепям кремнекислородных анионов жидкого стекла. Это приводит к разрыву полимерных цепей и замене ковалентных связей на ионные, т. е. связи типа Si-O-Si преобразуются в связи Si-O-Ca²⁺-O-Si.

Внедрение катионов кальция в структуру жидкого стекла вызывает деструкцию его полимерной сети. Разрыв полимерных кремнекислородных цепей происходит не хаотично, а зависит от соотношения концентраций Ca^{2+} и Na^+ в системе. Количество доступных кальциевых катионов влияет на степень разветвления и длину получающихся после разрыва цепочек. Ионы натрия (Na^+), присутствующие в жидком стекле, также играют роль в стабилизации заряда и влияют на процесс деструкции.

Понимание этих химических процессов имеет важное практическое значение при разработке и использовании шлакосиликатных вяжущих в строительстве. Контроль над концентрациями компонентов, такими как плотность жидкого стекла и содержание ионов кальция и натрия, позволяет регулировать процессы твердения и формирования структуры материала. Это, в свою очередь,

влияет на конечные физико-механические свойства укрепленных грунтов и строительных смесей.

Например, при стабилизации грунтов или изготовлении строительных блоков важно обеспечить оптимальное образование гидросиликатов кальция, которые придают материалу прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Регулируя условия реакции, можно добиться формирования желаемых свойств материала, что способствует повышению надежности и долговечности строительных конструкций.

Взаимодействие фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла с жидким стеклом является сложным многокомпонентным процессом, включающим растворение, химические реакции и образование новых фаз. Глубокое понимание этих процессов позволяет оптимизировать составы шлакосиликатных материалов для различных строительных целей. Это открывает возможности для создания более эффективных и устойчивых материалов, отвечающих современным требованиям строительства и эксплуатации сооружений.

Выводы. При взаимодействии фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом и гранулированного фосфорного шлака происходит коррозия частиц исходных материалов. Однако полное разрушение этих частиц предотвращается благодаря образованию на их поверхности пленки, состоящей из продуктов реакции с жидким стеклом. Эта защитная пленка замедляет дальнейшую коррозию и способствует сохранению структуры материала.

Литература

- Соколович В.Е. Химическое закрепление грунтов. М.: Стройиздат, 1980. 119 с.
- Antunes A., Seco A., Pinto N. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing. 2003. V. 18. P. 224-240.
- Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И. Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2001. № 3. С. 64-70.
- Герасимов Ю.Ю., Давыдов Г.А., Кильпелайнен С.А., Соколов А.П., Сюньев В.С. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2003. № 5. С. 122-128.
- Питухин А.В., Петров А.Н. Расчёт дорожных конструкций лесовозных автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2011. № 1 (86). С. 120-123.
- Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с.
- Шегельман И.Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: словарь. 4-е изд., перераб. и доп. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 278 с.
- Брюховецкий А.Н. Система конечно-разностных уравнений для определения тепловых характеристик грунтов лесовозных автомобильных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (1 марта - 28 апр. 2023 г.). Воронеж, 2023. С. 92-101.
- Брюховецкий А.Н. Комплексный метод измерения тепловлажностных свойств грунтов земляного полотна // Строительные и дорожные машины. 2023. № 4. С. 27-33.
- В процессе взаимодействия наблюдаются два типа реакций. Первый тип — самотормозящие реакции, которые замедляются по мере накопления продуктов реакции в системе. Второй тип включает три последовательных процесса: сначала происходит насыщение жидкой фазы продуктами разложения исходных компонентов, затем образуются гидросиликаты кальция, и в итоге эти новообразования выпадают в осадок.
- Увеличение нагрузки при уплотнении грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, приводит к повышению прочности укрепленного грунта и снижению расхода раствора жидкого стекла. Эта закономерность основана на физических принципах уплотнения материалов с коагуляционным типом структуры. Под действием повышенной нагрузки в грунте происходят необратимые сдвиги частиц и их агрегатов, что способствует более плотной упаковке и упрочнению структуры материала.
- Таким образом, оптимизация процесса уплотнения и контроль прикладываемых нагрузок при укреплении грунтов шлакосиликатными вяжущими позволяют не только улучшить физико-механические свойства грунта, но и снизить затраты на материалы, такие как жидкое стекло. Понимание механизмов взаимодействия компонентов и влияния технологических параметров на свойства укрепленных грунтов является ключевым для разработки эффективных строительных технологий и обеспечения долговечности сооружений.
- 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. V. 19, № 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 нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. Имп. Петра I, 2022. Ч. I. 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 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 (1 jan. - 31 jan. 2022 year.). Cham: Springer, 2023. P. 315-330.
- 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 нац. науч.-практической конф. (1 окт. 2021 г.). Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. Имп. Петра I, 2021. С. 168-175.
- Прокопцев 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.

15. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 с.
16. Иващенко Ю.Г., Фомина Н.Н. Вяжущие вещества в строительстве. Саратов: СГТУ, 2015. 156 с.
17. Тимофеев В.А., Козлов Д.Г., Левушкин Д.М., Скрыпников А.А. Однородность показателей укрепленных грунтов при отработке технологии строительства лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2023. № 7. С. 48-51.
18. Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С., Скрыпников А.В., Зеликов В.А., Микова Е.Ю., Казачек М.Н. Методологические основы регулирования водно-теплового режима лесовозных автомобильных дорог: моногр. Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. Имп. Петра I, 2023. 110 с.
19. 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.
20. Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Pilyushina G.A., Kazachek M.N., Vikulin I.A., Kleveko V.I. Developing an intelligent information system to solve the tasks of heat and mass transfer processes in soils in the design of logging roads // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2023. V. 101, № 8. P. 2946-2959.
21. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Zernograd, Rostov Region (27-28 aug. 2020 year.). Zernograd, Rostov Region, 2021. P. 012011.
22. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.
- // Construction and Road Building Machinery. 2023. № 4. P. 27-33.
10. 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. V. 19, № 1. P. 969-976.
11. 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 innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh: Voronezhskij gos. agrarnyj un-t im. Imp. Petra I, 2022. Ch. I. P. 168-186.
12. 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 (1 jan. - 31 jan. 2022 year.). Cham: Springer, 2023. P. 315-330.
13. Borovlev A.O., Kozlov D.G., Tikhomirov P.V., Logojda V.S. Methodology of designing logging automobile roads // Problemy resursosbespechennosti i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (1 okt. 2021 g.). Voronezh: Voronezhskij gos. agrarnyj un-t im. Imp. Petra I, 2021. P. 168-175.
14. Prokopec V.S., Skrypnikov A.A., Kozlov D.G., Tikhomirov 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.
15. Korneev V.I., Danilov V.V. Liquid and soluble glass. SPb.: Strojizdat, 1996. 216 p.
16. Ivashchenko Yu.G., Fomina N.N. Binders in construction. Saratov: SGTU, 2015. 156 p.
17. Timofeev V.A., Kozlov D.G., Levushkin D.M., Skrypnikov A.A. Uniformity of indicators of fortified soils in the development of technology for the construction of logging roads // Construction and Road Building Machinery. 2023. № 7. P. 48-51.
18. Kozlov D.G., Sapelkin R.S., Skrypnikov A.V., Zelikov V.A., Mikova E.Yu., Kazachek M.N. Methodological foundations of regulation of the water-thermal regime of logging roads: monogr. Voronezh: Voronezhskij gos. agrarnyj un-t im. Imp. Petra I, 2023. 110 p.
19. Timofeev V.A., Skrypnikov A.V., Bavykina E.G., Karpov A.S., Bezruk A.S., Romanov P.O., Zhuk A.Yu. Experience in the use of reinforced soils in the construction of logging roads // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 2 (58). P. 181-190.
20. Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Pilyushina G.A., Kazachek M.N., Vikulin I.A., Kleveko V.I. Developing an intelligent information system to solve the tasks of heat and mass transfer processes in soils in the design of logging roads // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2023. V. 101, № 8. P. 2946-2959.
21. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Zernograd, Rostov Region (27-28 aug. 2020 year.). Zernograd, Rostov Region, 2021. P. 012011.
22. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.

References

1. Sokolovich V.E. Chemical fixation of soils: a scientific publication. M.: Strojizdat, 1980. 119 p.
2. Antunes A., Seco A., Pinto N. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing, 2003. V. 18. P. 224-240.
3. Borisov G.A., Kukin V.D., Kuzina V.I. Methods of searching for the most advantageous variant of a network of logging roads // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2001. № 3. P. 64-70.
4. Gerasimov Yu.Yu., Davydkov G.A., Kil'pelyajnen S.A., Sokolov A.P., Syunyov B.C. Prospects for the application of new information technologies in the forest complex // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2003. № 5. P. 122-128.
5. Pituhin A.B., Petrov A.N. Calculation of road structures of logging highways // Transport business of Russia. 2011. № 1 (86). P. 120-123.
6. Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu. Optimal decision-making in the forest complex. Joensuu: Izd-vo un-ta Joensuu, 1999. 200 p.
7. Shegel'man I.R. Forest industry and forestry: slovar'. 4-e izd., pererab. i dop. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2008. 278 p.
8. Bryuhoveckij A.N. System of finite difference equations for determining thermal characteristics of soils of logging roads // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (1 marta - 28 apr. 2023 g.). Voronezh, 2023. P. 92-101.
9. Bryuhoveckij A.N. A comprehensive method for measuring the thermal and moisture properties of the soil of the roadbed