

## Влияние степени уплотнения на прочность шлакосиликатогрунта

И.А. Викулин<sup>1a</sup>, А.В. Скрыпников<sup>1b</sup>, Ю.Ю. Володина<sup>1c</sup>, А.С. Сергеев<sup>1d</sup>,  
Ю.А. Боровлев<sup>1e</sup>, А.Ю. Жук<sup>2f</sup>

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

<sup>2</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> vikigor\_1719@mail.ru, <sup>b</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>c</sup> juliya\_volodina@mail.ru, <sup>d</sup> Zzverdvd@mail.ru,

<sup>e</sup> borovlev-yua@yandex.ru, <sup>f</sup> ftslk@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5072-6748>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2768-1937>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0008-2007-1654>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 01.04.2024, принята 15.04.2024

*В статье рассмотрены результаты опытов по уплотнению грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим при различных уплотняющих нагрузках методом стандартного уплотнения. В ходе проведенных экспериментов установлено, что при укреплении грунтов шлакосиликатным вяжущим коэффициент уплотнения должен быть не менее 1, в противном случае не будет получена расчетная прочность укрепленного грунта. Также рассмотрены необходимость измельчения при укреплении связных грунтов и влияние тонкости помола на гидравлическую активность фосфорных гранулированных шлаков, приведены результаты исследований образцов шлакосиликатогрунтов из грунтовых смесей различного агрегатного состава. Определено, что чем больше степень измельчения шлака, тем выше прочность шлакосиликатного вяжущего, а, следовательно, активность шлака. Такое изменение активности шлака в зависимости от тонкости помола происходит из-за увеличения поверхности взаимодействия шлака с жидким стеклом, вследствие чего происходит более полная гидратация шлака. При дальнейшем увеличении тонкости помола происходит агрегация частиц шлака, которая ведет к снижению поверхности взаимодействия шлака с жидким стеклом. По этим же причинам увеличение тонкости помола не только вызывает увеличение гидравлической активности шлака, но также вызывает интенсификацию процессов твердения, особенно в начальные сроки. Таким образом, сделан вывод о том, что изменение тонкости помола влечет за собой изменение гидравлической активности шлака, при этом чем выше степень измельчения шлака, тем выше его гидравлическая активность. Также установлена степень размельчения шлака для его наивысшей гидравлической активности.*

**Ключевые слова:** укрепленные грунты; шлакосиликатогрунт; прочность шлакосиликатогрунта; лесовозные автомобильные дороги.

## The influence of the compaction degree on the strength of slag silicate soil

I.A. Vikulin<sup>1a</sup>, A.V. Skrypnikov<sup>1b</sup>, Yu.Yu. Volodina<sup>1c</sup>, A.S. Sergeev<sup>1d</sup>,  
Yu.A. Borovlev<sup>1e</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>2f</sup>

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

<sup>2</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> vikigor\_1719@mail.ru, <sup>b</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>c</sup> juliya\_volodina@mail.ru, <sup>d</sup> Zzverdvd@mail.ru,

<sup>e</sup> borovlev-yua@yandex.ru, <sup>f</sup> ftslk@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5072-6748>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2768-1937>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0008-2007-1654>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Received 01.04.2024, accepted 15.04.2024

*This article discusses the results of experiments on compaction of soils strengthened with slag silicate binder under various compaction loads using the standard compaction method. During the experiments, it has been found that when strengthening soils with slag silicate binder, the compaction coefficient must be at least 1, otherwise the calculated strength of the strengthened soil will not be obtained. The need for grinding when strengthening cohesive soils and the influence of grinding fineness on the hydraulic activity of phosphorus granulated slags are also considered, and the results of studies of samples of slag silicate soils from soil mixtures of various aggregate compositions are presented. It has been determined that the greater the degree of slag grinding, the higher the strength of the slag silicate binder, and, consequently, the activity of the slag. This change in the activity of the slag depending on the fineness of grinding occurs due to an increase in the surface of interaction of the slag with liquid glass, as a result of which more complete hydration of the slag appears. With a further increase in grinding fineness, aggregation of slag particles takes place, which leads to a decrease in the surface area of interaction between the slag and liquid glass. For the same reasons, an increase in grinding fineness not only causes an increase in the hydraulic activity of the slag, but also causes an intensification of hardening processes, especially in the initial stages. Thus, it is concluded that a change in grinding fineness entails a change in the hydraulic activity of the slag, and the higher the degree of grinding of the slag, the higher its hydraulic activity. The degree of slag grinding for its highest hydraulic activity has also been established.*

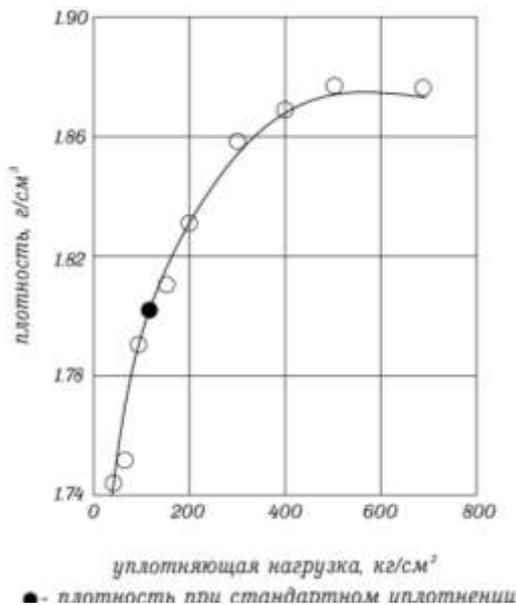
**Keywords:** strengthened soils; slag silicate soil; strength of slag silicate soil; logging roads.

**Введение.** Наилучшими условиями получения максимальной плотности шлакосилика토грунтовых смесей является уплотнение при оптимальной влажности. Отклонение от оптимальной влажности в сторону уменьшения или увеличения вызывает уменьшение плотности, в результате чего наблюдается заметное понижение прочности укрепленного грунта.

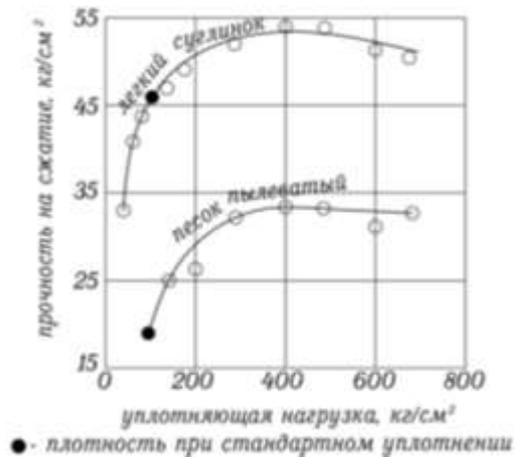
Вместе с тем ранее проведенными исследованиями [1–8; 22–25] установлено, что оптимальная влажность и максимальная плотность не являются постоянными величинами. С увеличением нагрузки или работы, затрачиваемой на уплотнение, можно повысить плотность укрепленного грунта даже при недостаточной влажности. Прочность и плотность укрепленных грунтов связаны прямой зависимостью.

В целях проверки применимости данного положения к грунтам, укрепленным шлакосиликатным вяжущим, были проведены специальные опыты по уплотнению укрепленного грунта при различных уплотняющих нагрузках (от 50 до 700 кг/см<sup>2</sup> в течение 3 мин) и методом стандартного уплотнения.

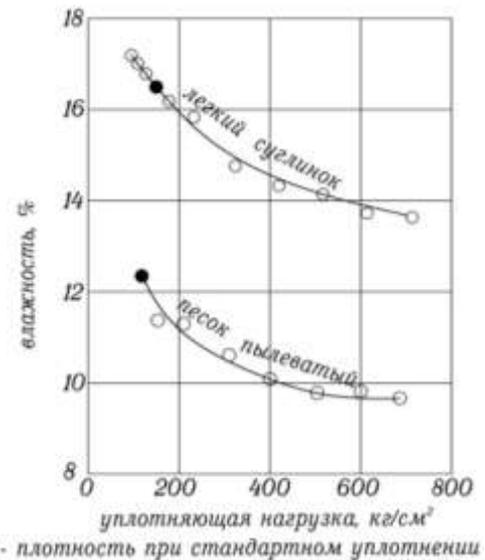
Результаты испытаний представлены на рис. 1 и 2, откуда следует, что увеличение нагрузки с 50 до 300–400 кг/см<sup>2</sup> при одинаковом времени ее приложения вызывает резкое повышение плотности и прочности шлакосиликатогрунта. Дальнейшее увеличение нагрузки (до 700 кг/см<sup>2</sup>) не вызывает какого-либо увеличения прочности образцов. С увеличением уплотняющей нагрузки за счет частичного отжатия воды, заполняющей поры, происходит снижение влажности образцов (рис. 3), что является положительным фактором, так как снижение влажности соответствует снижению расхода жидкого стекла — наиболее дорогого компонента шлакосиликатного вяжущего [9; 10].



**Рис. 1.** Изменение плотности (объемного веса скелета шлакосиликатогрунта) от величины уплотняющей нагрузки



**Рис. 2.** Изменение прочности шлакосиликатогрунта от величины уплотняющей нагрузки



**Рис. 3.** Изменение влажности шлакосиликатогрунта от величины уплотняющей нагрузки

Анализируя данные, представленные на рис. 1 и 2, можно отметить, что плотность и прочность при стандартном уплотнении соответствуют уплотняющей нагрузке, примерно 100 кг/см<sup>2</sup>. Приняв плотность при уплотнении нагрузкой в 100 кг/см<sup>2</sup> равной плотности при стандартном уплотнении, можно заметить, что при уменьшении степени уплотнения всего на 0,02 прочность снижается от 10 до 15 %. Следовательно, при укреплении грунтов шлакосиликатным вяжущим коэффициент уплотнения должен быть не менее 1; в противном случае мы не получим расчетной прочности укрепленного грунта. Для достижения такого коэффициента уплотнения необходимо применять тяжелые катки весом 40 т и более.

Необходимость измельчения возникает при укреплении связных грунтов. Связанность их обуславливается наличием глинистых частиц, которые, имея значительную удельную поверхность и, соответственно, большую поверхностную энергию, взаимодействует с жидкой фазой грунта и друг с другом и агрегируются. Совокупность связанных и «цементированных» час-

тиц образует агрегат. Грунтовые агрегаты способны выдерживать значительные механические воздействия. Величина этого воздействия зависит от величины агрегатов и влажности грунта [11; 12].

Так, модуль деформации суглинка, укрепленного 12–14 % цемента, составлял (при измельчении грунта до агрегатов 2–5 мм) 960–1800 кг/см<sup>2</sup>, а при измельчении до агрегатов 10–15 мм — 255 кг/см<sup>2</sup>.

Е.И. Путилиным показано, что размельчать глинистые грунты машинами следует до агрегатов размером не более 2 мм, так как при этом в смеси остаются в основном прочные водостойкие агрегаты [13]. Однако современные серийные машины практически не обеспечивают такой степени измельчения. Поэтому при

укреплении глинистых грунтов цементом, а также соответствующими комплексными способами, допускается содержание в грунте агрегатов размером до 10 мм (должно быть не более 25 %).

С целью оценки влияния агрегатного состава грунта на физико-механические свойства шлакосиликатогрунта были проведены исследования образцов шлакосиликатогрунта из грунтовых смесей различного агрегатного состава (см. таблицу). Для исследований применялся легкий суглинок [14].

Образцы готовились в виде цилиндров, диаметром и высотой равных 5 см, под нагрузкой 100 кг/см<sup>2</sup>, испытанных в возрасте 28 суток после водонасыщения.

Агрегатные составы грунта, используемого при лабораторных исследованиях

Номер смеси	Процентное содержание агрегатов размером, мм:							R <sub>сж</sub> , кг/см <sup>2</sup>
	0,5	0,5–1,0	1,0–2,0	2,0–5,0	5,0–10	10–15	15–20	
1	100	–	–	–	–	–	–	42
2	75	25	–	–	–	–	–	40
3	50	30	20	–	–	–	–	41
4	25	35	40	–	–	–	–	35
5	25	25	30	20	–	–	–	32
6	25	16	20	20	20	–	–	33
7	15	10	15	20	20	20	–	23
8	10	5	5	20	20	20	20	15
9	5	5	5	20	20	20	25	17

Результаты испытаний приведены на рис. 4.

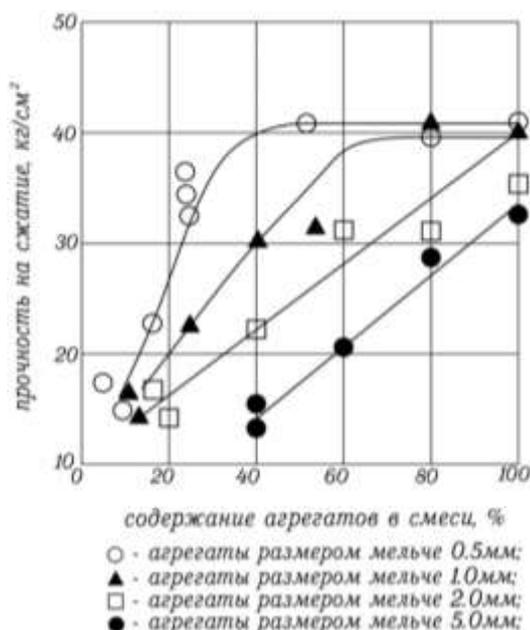


Рис. 4. Изменение прочности образцов в зависимости от содержания различных грунтовых агрегатов в смеси

Как видно на рисунке, наибольшей прочностью обладают смеси, составленные главным образом из грунтовых агрегатов размером 0,5 мм. При увеличении в смеси агрегатов мельче 0,5 мм до 40–50 % происходит непрерывное возрастание прочности водонасыщенных

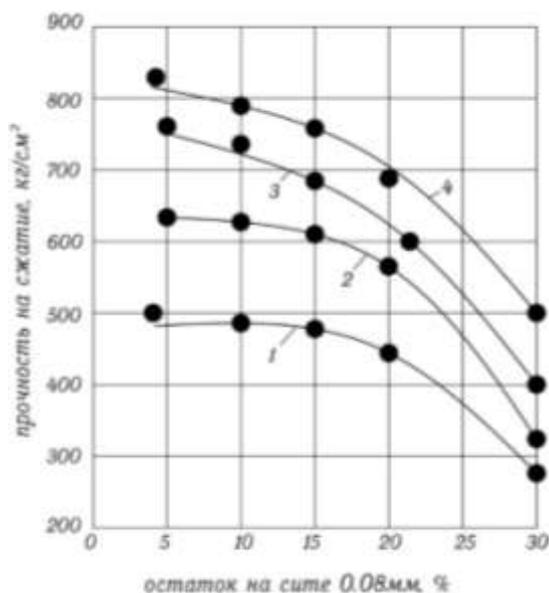
образцов; дальнейшее увеличение содержания агрегатов в смеси не вызывает какого-либо изменения прочности. Следовательно, содержание агрегатов мельче 0,5 мм может быть ограничено 40–50 %, остальная часть смеси может быть представлена более крупными агрегатами, но не крупнее 2 мм. При этом количество агрегатов 0,5–2,0 мм не должно превышать 50–60 %.

Также необходимо учитывать влияние тонкости помола на гидравлическую активность фосфорных гранулированных шлаков [15; 16].

Гидравлическая активность гранулированных шлаков определяется их химико-минералогическими свойствами, видом и количеством активизирующей добавки и степенью их измельчения. Изучая гидравлическую активность гранулированных доменных шлаков, А.В. Силенко установил, что чем тоньше измельчение шлаков, тем больше их гидравлическая активность [17]. Влияние измельчения на изменение гидравлической активности отмечалось и другими авторами [18; 19].

Для изучения влияния степени измельчения на гидравлическую активность фосфорных гранулированных шлаков было приготовлено 5 партий шлака разной тонкости помола, характеризуемой остатком на сите 0,08 мм — 4, 10, 15, 20 и 30 %. Из каждой серии шлака приготавливали шлакосиликатное вяжущее путем затворения молотого шлака раствором жидкого стекла, характеризуемого кремнезернистым модулем 1,75 и удельным весом 1,20 г/см<sup>3</sup>. После этого из шлакосиликатного вяжущего приготавливали цилиндрические образцы, диаметром и высотой равными 5 см, путем прессования под нагрузкой 100 кг/см<sup>2</sup> в течение 3 мин. Через 30, 60, 90, 180 и 270 суток влажного твердения

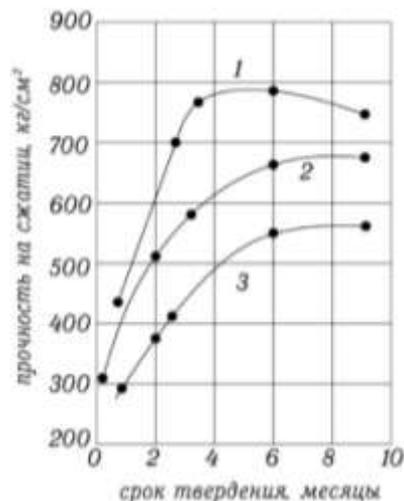
образцы испытывались на прочность при сжатии. Результаты испытаний представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Влияние степени измельчения на гидравлическую активность фосфорных гранулированных шлаков. Срок твердения: 1 — 30 суток; 2 — 60 суток; 3 — 90 суток; 4 — 180 суток

Из рис. 5 следует, что чем больше степень измельчения шлака, тем выше прочность шлакосиликатного вяжущего, т. е. тем выше активность шлака. При этом следует отметить, что увеличение прочности происходит непропорционально увеличению тонкости помола. При снижении остатка на сите 0,08 мм с 30 до 15–10 % идет резкое увеличение прочности. При дальнейшем увеличении тонкости помола до остатка на сите 0,08 мм 4 % увеличение прочности происходит незначительно.

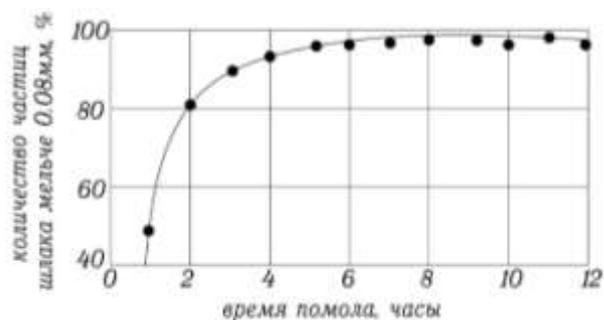
Такое изменение активности шлака в зависимости от тонкости помола происходит из-за увеличения поверхности взаимодействия шлака с жидким стеклом, вследствие чего происходит более полная гидратация шлака [20; 21]. При дальнейшем увеличении тонкости помола (до остатка на сите 0,08 мм — 4 % и меньше) происходит агрегация частиц шлака, которая ведет к снижению поверхности взаимодействия шлака с жидким стеклом. По этим же причинам увеличение тонкости помола не только вызывает увеличение гидравлической активности шлака, но также вызывает интенсификацию процессов твердения, особенно в начальные сроки. На рис. 6 показано изменение прочности шлакосиликатного вяжущего в зависимости от степени измельчения шлака и срока твердения вяжущего. Твердение шлака, характеризуемого остатком на сите 0,08 мм 10 %, происходит сравнительно быстро. Интенсивное твердение этого шлака происходит в основном в первые 3 месяца. В последующие сроки твердение замедляется и к 9 месяцам почти полностью прекращается. Интенсивность твердения шлака, характеризуемого остатком на сите 0,08 мм 30 %, ниже, чем у вышеуказанного шлака и сохраняется примерно одинаковой вплоть до 6 месяцев и заметно снижается к 9 месяцам.



**Рис. 6.** Изменение прочности шлакосиликатного вяжущего в зависимости от сроков хранения и степени измельчения шлака, характеризуемой остатком на сите 0,08 мм: 1 — 10 %; 2 — 20 %; 3 — 30 %

Таким образом, изменение тонкости помола влечет за собой изменение гидравлической активности шлака, при этом чем выше степень измельчения шлака, тем выше его гидравлическая активность. Но тогда возникает вопрос: до какой степени необходимо размельчать шлак?

Чтобы получить ответ на этот вопрос, необходимо изучить динамику изменения тонкости помола в зависимости от его продолжительности и сопоставить энергетические затраты, расходуемые на помол шлака с изменением его активности в зависимости от тонкости помола. На рис. 7 представлена зависимость изменения тонкости помола шлака от его продолжительности. На рисунке видно, что с увеличением продолжительности помола увеличивается количество частиц, прошедших через сито 0,08 мм. Но увеличение степени измельчения происходит непропорционально времени, затрачиваемого на помол шлака. В первые 2 ч помола эта зависимость сохраняется примерно пропорциональной. В последующие 2 ч увеличение степени измельчения снижается, хотя оно и остается довольно высоким. После 4 ч помола происходит резкое снижение степени измельчения, которое почти полностью затухает к 10–12 ч. Затухание степени измельчения можно объяснить агрегированием частиц шлака и их налипанием на стенки мельницы и мелющие тела.



**Рис. 7.** Изменение тонкости помола от его продолжительности

Общепризнанных теоретических объяснений процессов налипания и агрегирования еще нет. Рассматривая вопросы измельчения цемента, С.М. Рояк и Г.С. Рояк указывали, что дисперсные зерна цемента приобретают заряд статического электричества в результате механического воздействия мелющих тел и взаимного трения цемента. Поэтому они агрегируются и налипают на мелющие тела. В пользу электростатической теории свидетельствует возможность локализации этих явлений небольшой добавкой углерода (добавка каменного угля), уменьшающего электростатический заряд поверхности зерен цемента и этим самым повышающего тонкость помола.

Другие исследователи предполагают, что в процессе помола цемента происходит заполнение его мелкими частицами неровностей на поверхности мелющих тел. По мнению Б. Беке и Л.О. Опоцки, налипание частиц цемента является следствием действия поверхностных сил притяжения. Процессы же агрегирования отличаются от этих явлений тем, что вследствие развивающейся высокой температуры при концентрации энергии на поверхности цементного зерна в точках приложения механической силы удара шара происходит изменение структуры клинкерных фаз. В итоге в указанных местах вследствие пластических деформаций

происходят процессы «сваривания» аналогично тому, как это бывает в металлах, однако в последующем возможно разрушение агломератов и дальнейшее их измельчение.

Таким образом, при достижении определенной тонкости помола материала начинает происходить его агрегация, и дальнейший помол уже не приведет к увеличению степени измельчения.

В нашем случае уже после 4 ч работы мельницы мы не получили сколько-нибудь заметного увеличения тонкости помола, а, значит, и заметного увеличения активности шлака, независимо от затрачиваемой энергии. Следовательно, увеличение времени помола свыше 3–5 ч нецелесообразно, а это соответствует тонкости помола шлака, характеризующейся остатком на сите 0,08 мм 8–12 % (рис. 7).

Таким образом, помол шлака следует производить до тонкости, характеризующейся остатком на сите 0,08 мм 8–12 %. Более высокая тонкость помола связана со значительным увеличением затрат электроэнергии и машинного времени, не окупающихся сравнительно небольшим повышением активности, а более грубый помол (с остатком на сите 0,08 мм более 12 %) вызывает резкое снижение активности шлака.

#### Литература

1. Корочкин А.В. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: МАДИ, 2005. 130 с.
2. Макарова Ю.А., Мануковский А.Ю. Исследование воздействия водного потока на разрушение земляного полотна лесовозной автомобильной дороги // Леся России: политика, промышленность, наука, образование: материалы науч.-технической конф. (13-15 апр. 2016 г.). СПб.: СПбГЛТУ, 2016. С. 23-26.
3. Дорохин С.В., Смирнов М.Ю. Оценка опасности условий движения, состояния и уровня содержания лесовозных автомобильных дорог при неблагоприятных метеорологических условиях // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 96-104.
4. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. Введ. 01.01.2008. М.: Стандартинформ, 2008. 38 с.
5. Мануковский А.Ю., Макарова Ю.А., Азарных Ю.С. Исследование сопротивления грунта земляного полотна воздействию паводковых вод // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 10 (36). С. 346-349.
6. Курьянов В.К., Афоничев Д.Н., Скрыпников А.В. Автомобильные дороги. Воронеж: Воронежская гос. лесотехническая акад., 2007. 284 с.
7. Тихомиров П.В., Викулин И.А., Володина Ю.Ю. Информационно-интеллектуальные системы определения геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог // Моделирование систем и процессов. 2022. Т. 15, № 2. С. 83-93.
8. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Транспорт, 1976. 270 с.
9. Мацнев М.В., Берестовой А.А. Анализ внедрения методики расчёта строительных заделов при строительстве лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2021. № 8. С. 49-56.
10. Тихомиров П.В., Торощев В.В., Викулин И.А. Анализ существующих методов геодезических работ при реконструкции лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2022. № 3. С. 34-37.
11. Васильев А.П., Анестин В.К., Розов Ю.Н. Краткий справочник техника-дорожника. М.: Транспорт, 1992. 176 с.
12. Линцер А.В. Основы индустриального применения укрепленных грунтов в дорожном строительстве: дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень, 1983. 361 с.
13. Путилин Е.И. Исследование влияния агрегатного состава глин при укреплении их вяжущими материалами и пути улучшения размельчения глинистых грунтов: автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Балашиха, 1970. 29 с.
14. Ломакин Д.В., Логойда В.С. Исследование отходов промышленности для укрепления грунтов // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-1. С. 102-106.
15. Викулин И.А. Использование фосфорных гранулированных шлаков для приготовления вяжущих веществ при строительстве лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 192-195.
16. Кириллов Ф.А. Разработка метода расчета дренающего слоя дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 161 с.
17. Силенко А.В. Укрепление слабых грунтов основания доменными шлаками: автореферат дис. ... на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. М., 1954. 22 с.
18. Вишневецкий А.В. Разработка технологии ремонта поверхностного слоя цементобетонных покрытий автомобильных дорог в условиях сурового климата: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Чита, 2001. 130 с.
19. Боровлев А.О., Денисенко В.В., Тверитнев О.Н. Математическая модель центральных проекций трассы лесовозной автомобильной дороги // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (8-9 июня 2021 г.). Воронеж: Воронежский ГАУ, 2021. С. 235-248.
20. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 279 с.
21. Опоцки Л., Юхас З. Механохимические процессы на поверхности клинкерных минералов. М., 1974. 8 с.
22. Nikitin V.V. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69, № 12. P. 175-178.
23. Logoida V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 8, № 5. P. 2178-2183.
24. Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12, № 2. P. 511-515.
25. Бурмистров Д.В. Исследование вероятностных связей и зависимостей, определяющих оптимальные методы организации и планирования ритмичного строительства лесовозных автомобиль-

ных дорог // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 1. С. 70-76.

#### References

- Korochkin A.V. Designing non-rigid road clothes. M.: MADI, 2005. 130 p.
- Makarova Yu.A., Manukovskij A.Yu. Investigation of the impact of a water flow on the destruction of the roadbed of a logging highway // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauch.-tekhnicheskoy konf. (13-15 apr. 2016 g.). SPb.: SPbGLTU, 2016. P. 23-26.
- Dorohin S.V., Smirnov M.Yu. Assessment of the danger of traffic conditions, condition and level of maintenance of logging roads under adverse meteorological conditions // Modern problems of science and education. 2015. № 1-1. P. 96-104.
- GOST R 52748-2007. Public roads "Normative loads, calculated loading schemes and approximation dimensions". Vved. 01.01.2008. M.: Standartinform, 2008. 38 p.
- Manukovskij A.Yu., Makarova Yu.A., Azarnyh Yu.S. Investigation of the resistance of the soil of the roadbed to the effects of flood waters // Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice. 2017. V. 5, № 10 (36). P. 346-349.
- Kur'yanov V.K., Afonichev D.N., Skrypnikov A.V. Highways. Voronezh: Voronezhskaya gos. lesotekhnicheskaya akad., 2007. 284 p.
- Tihomirov P.V., Vikulin I.A., Volodina Yu.Yu. Information and intelligent systems for determining geometric elements of logging roads // Modeling of systems and processes. 2022. V. 15, № 2. P. 83-93.
- Evgen'ev I.E., Kazarnovskij V.D. The roadbed of highways on weak soils. M.: Transport, 1976. 270 p.
- Macnev M.V., Berestovoj A.A. Analysis of the implementation of the methodology for calculating building blocks in the construction of logging roads // Construction and Road Building Machinery. 2021. № 8. P. 49-56.
- Tihomirov P.V., Toropcev V.V., Vikulin I.A. Analysis of existing methods of geodetic works in the reconstruction of logging roads // Construction and Road Building Machinery. 2022. № 3. P. 34-37.
- Vasil'ev A.P., Anestin V.K., Rozov Yu.N. Short reference book of a road technician. M.: Transport, 1992. 176 p.
- Lincer A.V. Fundamentals of industrial application of reinforced soils in road construction: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Tyumen', 1983. 361 p.
- Putilin E.I. Investigation of the influence of the aggregate composition of clays when strengthening them with astringent materials and ways to improve the crushing of clay soils: avtoref. dis. ... na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk. Balashiha, 1970. 29 p.
- Lomakin D.V., Logojda V.S. Research of industrial waste for soil strengthening // Fundamental research. 2016. № 12-1. P. 102-106.
- Vikulin I.A. The use of phosphorous granular slags for the preparation of binders in the construction of logging roads // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 192-195.
- Kirillov F.A. Development of a method for calculating the drainage layer of road coverings of logging highways: dis. ... kand. tekhn. nauk. Voronezh, 2009. 161 p.
- Silenko A.V. Strengthening of weak foundation soils with blast furnace slag: avtoreferat dis. ... na soisk. uchen. step. d-ra tekhn. nauk. M., 1954. 22 p.
- Vishnevskij A.V. Development of technology for repairing the surface layer of cement-concrete road coverings in a harsh climate: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11. Chita, 2001. 130 p.
- Borovlev A.O., Denisenko V.V., Tveritnev O.N. Mathematical model of the central projections of the logging highway route // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennoy proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (8-9 iyunya 2021 g.). Voronezh: Voronezhskij GAU, 2021. P. 235-248.
- Royak S.M., Royak G.S. Special cements. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1983. 279 p.
- Opocki L., Yuhaz Z. Mechanochemical processes on the surface of clinker minerals. M., 1974. 8 p.
- Nikitin V.V. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69, № 12. P. 175-178.
- Logojda V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 8, № 5. P. 2178-2183.
- Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARP Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12, № 2. P. 511-515.
- Burmistrov D.V. Study of probabilistic relationships and dependencies that determine the optimal methods for organizing and planning the rhythmic construction of logging roads // Forestry Bulletin. 2019. V. 23, № 1. P. 70-76.