

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

Научная статья
УДК 624.138.232
doi: 10.28983/asj.y2024i9pp155-161

Интеллектуальная система определения прочности фиброцементогрунта

Сергей Александрович Чудинов, Ирина Андреевна Карабутова

Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru

Аннотация. В статье рассмотрена методика разработки интеллектуальной системы на базе адаптивной нейронечеткой сети, позволяющей со средней абсолютной ошибкой MAPE = 0,632 % производить расчет предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с учетом содержания добавки портландцемента от 4 до 8 % и базальтового фиброволокна от 0 до 4 % с длиной волокон от 5 до 45 мм. Выявлено снижение прочности фиброцементогрунта при содержании в его составе 4 % портландцемента и базальтового фиброволокна со средней длиной волокон до 10 мм вследствие нарушения однородности и недостаточной прочности цементогрунтовой матрицы для удержания волокон. Для достижения максимальной прочности фиброцементогрунта установлено оптимальное содержание добавки базальтового фиброволокна от 2,0 до 2,5 % при средней длине волокон 25 мм.

Ключевые слова: интеллектуальная система; нейронечеткая сеть; прочность; фиброцементогрунт; лесовозная автомобильная дорога

Для цитирования: Чудинов С. А., Карабутова И. А. Интеллектуальная система определения прочности фиброцементогрунта // Аграрный научный журнал. 2024, № 9. С. 155–161. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp155-161>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Intelligent system for determining the strength of fiber cement soil

Sergey A. Chudinov, Irina A. Karabutova

Ural State Forestry University, Ekaterinburg, Russia
e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru

Abstract. The article discusses the methodology for developing an intelligent system based on an adaptive neuro-fuzzy network, which allows, with an average absolute error MAPE = 0.632 %, to calculate the compressive strength of fiber cement soil, taking into account the content of the additive Portland cement from 4 to 8 % and basalt fiber from 0 up to 4 % with fiber lengths from 5 to 45 mm. A decrease in the strength of fiber cement soil was revealed when it contained 4 % Portland cement and basalt fiber with an average fiber length of up to 10 mm, due to a violation of the homogeneity and insufficient strength of the cement soil matrix to retain the fibers. To achieve maximum strength of fiber cement soil, the optimal content of basalt fiber additive has been established from 2.0 to 2.5 % with an average fiber length of 25 mm.

Keywords: intelligent system; neuro-fuzzy network; strength; fiber cement soil; logging road

For citation: Chudinov S. A., Karabutova I. A., Intelligent system for determining the strength of fiber cement soil. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(9):155–161. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp155-161>.

Введение. Эффективность функционирования и развития лесозаготовительной отрасли в значительной степени зависит от качества транспортной инфраструктуры, главным элементом которой являются лесовозные автомобильные дороги. Лесовозные автомобильные дороги эксплуатируются в сложных природных условиях при высоких транспортных нагрузках. При этом они должны отвечать нормативным транспортно-эксплуатационным показателям в течение всего срока службы при минимальной стоимости строительно-монтажных работ [5]. Поэтому при проектировании дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог должны применяться наиболее эффективные строительные материалы, отличающиеся высокой прочностью, долговечностью и минимальной стоимостью. Устройство конструкций лесовозных дорог из укрепленных грунтов позволяет в значительной степени достичь указанных эффектов [1, 6, 7].





Однако одним из перспективных направлений развития данной технологии является устройство дорожных одежд из фиброцементогрунта [9, 10].

Фиброцементогрунт – это композиционный материал, получаемый при смешивании местного грунта с портландцементом, фиброволокном и водой до оптимальной влажности смеси. В качестве фиброволокна могут применяться базальтовые, стеклянные, полипропиленовые или углеродные волокна [8]. В связи с тем, что основным компонентом фиброцементогрунтовых смесей является местный грунт, а количество вносимых добавок незначительно (до 10 % от массы сухого грунта), устройство дорожных одежд из данного материала экономически эффективно, в особенности в районах с недостатком традиционно используемых каменных материалов.

Фиброволокно, удерживаясь в цементогрунтовой матрице, воспринимает внешние нагрузки за счет своего осевого растяжения и увеличивает прочностные показатели, морозостойкость и трещиностойкость фиброцементогрунта. Благодаря дисперсному армированию цементогрунтовой матрицы волокнами, фиброцементогрунт эффективно применять в конструкциях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог в условиях слабых оснований и высоких нагрузок от лесотранспорта.

Проведенные исследования [11–14] позволили установить, что на физико-механические показатели фиброцементогрунта влияют не только содержание компонентов, но и длина фиброволокна. Поскольку фиброволокно воспринимает внешние нагрузки за счет своего осевого растяжения, его длина непосредственно влияет на прочностные показатели фиброцементогрунта.

Таким образом, определение оптимального содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси с учетом длины фиброволокна, при котором достигаются максимальные показатели прочности материала, требует большого числа лабораторных экспериментов. Это и обосновало актуальность разработки интеллектуальной системы определения прочности фиброцементогрунта по основному показателю предела прочности при сжатии в зависимости от содержания добавок портландцемента, фиброволокна с заданной длиной волокон.

Целью исследования является разработка интеллектуальной системы на основе нейронечеткой сети для определения предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с учетом различного содержания добавок портландцемента и фиброволокна с заданной длиной волокон.

Материалы и методы. Разработка интеллектуальной системы производилась в следующей последовательности:

1. Проведение лабораторных исследований предела прочности при сжатии фиброцементогрунтов различного состава в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 [4]. Приготовление фиброцементогрунтовых смесей осуществлялось на основе природного грунта – суглинка тяжелого пылеватого, взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Алапаевское лесничество» в Свердловской области. В составах фиброцементогрунтовых смесей использован портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [2], вода по ГОСТ 51232-98 [3] и базальтовое фиброволокно на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области.

Для проведения испытания на предел прочности при сжатии были изготовлены 26 серий из трех образцов составов фиброцементогрунта, представленных в таблице. Для достижения оптимальной влажности приведенных фиброцементогрунтовых смесей количество воды составило 20 % от массы сухого грунта.

2. Обоснование типа интеллектуальной системы. Учитывая функционал и преимущества интеллектуальных систем различных типов, для проведения исследований была создана адаптивная нейронечеткая сеть ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference System), в которой специфика задачи заключается в некоторой неопределенности входных и выходных параметров [15]. Поэтому адаптивная нейронечеткая сеть ANFIS в большей степени подходит для решения задачи определения предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с учетом различного содержания добавок портландцемента и базальтового фиброволокна с заданной длиной волокон.

3. Назначение входных и выходной переменных для нейронечеткой сети. Для построения нейронечеткой сети выбрано три входных переменных: портландцемент (P), % от массы сухого грунта; базальтовое фиброволокно (F), % от массы сухого грунта; длина базальтового фиброволокна (L), мм.

№ серии	Содержание портландцемента, % от массы сухого грунта	Содержание базальтового фиброволокна, % от массы сухого грунта	Длина базальтового фиброволокна, мм
1	4	0	0
2	4	2	5
3	4	2	25
4	4	2	45
5	4	3	25
6	4	4	5
7	4	4	25
8	4	4	45
9	5	2	25
10	6	0	0
11	6	2	5
12	6	2	25
13	6	2	45
14	6	3	25
15	6	4	5
16	6	4	25
17	6	4	45
18	7	2	25
19	8	0	0
20	8	2	5
21	8	2	25
22	8	2	45
23	8	3	25
24	8	4	5
25	8	4	25
26	8	4	45

Выходной переменной принят предел прочности при сжатии фиброцементогрунтовых образцов $R_{сж}$.

С учетом изложенного, формально постановка задачи определения предела прочности при сжатии фиброцементогрунта запишется в виде.

$$R_{сж} = f(P, F, L).$$

При формировании входных лингвистических переменных в приведенной задаче использованы следующие терм-множества:

$$P = \{\min, M, \max\} = \{4, 6, 8\};$$

$$F = \{\min, M, \max\} = \{0, 2, 4\};$$

$$L = \{\min, M, \max\} = \{5, 25, 50\}.$$

4. Программная реализация нейронной сети в среде Neuro-Fuzzy Designer приложения Matlab. Пакет Neuro-Fuzzy Designer приложения Matlab позволяет выполнять обучение методом обратного распространения ошибки, основным назначением которого является настройка всех слоев многослойной структуры путем изменения весов промежуточных слоев гибридным методом, который представляет собой комбинацию методов наименьших квадратов и обратного распространения ошибки.

Для разработки нейронной сети использована обучающая выборка на основе результатов лабораторных исследований предела прочности при сжатии фиброцементогрунтов различного состава (см. таблицу) серий № 1–4, 6–8, 10–13, 15–17, 19–22, 24–26. На основании обучающей





выборки подготовленных данных создан файл с форматом Shatie.txt (рисунок 1, а). Данные представлены в виде матрицы, причем выходной параметр располагается в последнем столбце. Затем исходные данные загружались в приложение Neuro-Fuzzy Designer (рисунок 1, б).

После загрузки исходных данных и выбора параметров входных нечетких переменных (рисунок 1, в, г), генерации структуры сети (рисунок 1, д) задавалась методика нечеткого вывода для выходной переменной методом Сугено. Выбранные и скорректированные лингвистические переменные для входных данных определены, как показано на рисунке 1, г.

После процедуры генерации нейронной сети (рисунок 1, д) запускается обучение сети (рисунок 1, е), при этом задано 10 этапов обучения. Процесс обучения отображается в командном окне Matlab, где выводится значение среднеквадратической ошибки RMSE результата обучения. В разработанной нейронной сети значение среднеквадратической ошибки RMSE равно 0,000002, что свидетельствует о ее корректной настройке на этапе генерации.

5. Проверка адекватности нейронной сети на примерах из тестовой выборки. Важным условием является то, чтобы тестовые данные входили в диапазоны обучающих выборок. В качестве тестовых выборок приняты результаты исследований предела прочности при сжатии фиброцементогрунтов различного состава (см. таблицу) серий № 5, 9, 14, 18, 23. Проверка проводилась с использованием процедуры RuleViewer.

Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети для тестовых выборок показал точность работы 99,368 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети MAPE = 0,632 %), что свидетельствует о ее корректной настройке на итоговом этапе – проверке адекватности.

Результаты исследований. Интеллектуальная система на основе нейронечеткой сети позволяет производить расчет предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с учетом содержания добавки портландцемента от 4 до 8 % по массе сухого грунта, базальтового фиброволокна до 4 % от массы сухого грунта с длиной волокон от 5 до 45 мм со средней абсолютной ошибкой MAPE = 0,632 %. С помощью данной интеллектуальной системы возможно в кратчайшие сроки и с большой точностью производить подбор оптимального состава фиброцементогрунтовых смесей на основе базальтового фиброволокна для устройства конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

На основании полученных с помощью интеллектуальной системы данных зависимости предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с 4 % портландцемента от массы сухого грунта и различным содержанием базальтового фиброволокна (рисунок 2) установлено снижение прочности материала со средней длиной волокон до 10 мм. При средней длине волокон от 10 до 45 мм добавка базальтового фиброволокна приводит к увеличению предела прочности при сжатии фиброцементогрунта. Оптимальное содержание фиброволокна, которое приводит к максимальному приросту прочности фиброцементогрунта на 7,9 % относительно цементогрунта без фибры, составляет 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при средней длине волокон 25 мм.

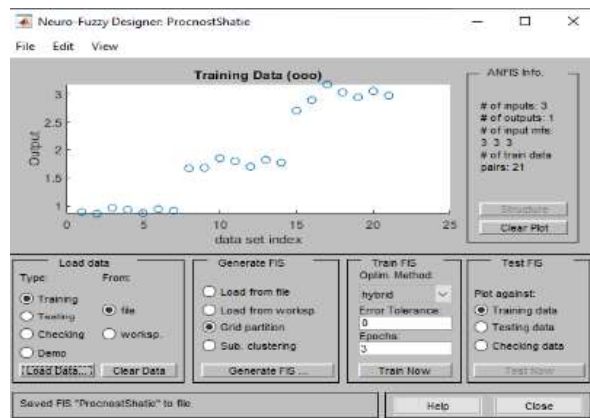
Установленное снижение прочности фиброцементогрунта с 4 % портландцемента и средней длине волокон до 10 мм возникает в результате недостаточного количества минерального вяжущего в материале и, следовательно, недостаточной прочности цементогрунтовой матрицы для удержания фиброволокон данной длины. Поэтому фиброволокна не воспринимают внешние нагрузки за счет своего осевого растяжения, а только нарушают однородность цементогрунтовой матрицы, снижая прочностные показатели фиброцементогрунта. При увеличении средней длины фиброволокон более 10 мм и содержания портландцемента более 4 % от массы сухого грунта происходит увеличение эффективности дисперсного армирования материала и повышение прочностных показателей фиброцементогрунта.

Анализ зависимости предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с 8 % портландцемента от массы сухого грунта и различным содержанием базальтового фиброволокна (рисунок 3) показал, что при средней длине волокон от 5 до 45 мм его добавка приводит к увеличению предела прочности при сжатии материала. Максимальное значение предела прочности при сжатии фиброцементогрунта 3,17 МПа при соответствующем приросте прочности на 17,4 % относительно цементогрунта без фиброволокна наблюдается при содержании фиброволокна 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм.

Таким образом, полученные на основе интеллектуальной системы данные предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с добавкой портландцемента от 4 до 8 % от массы сухо-

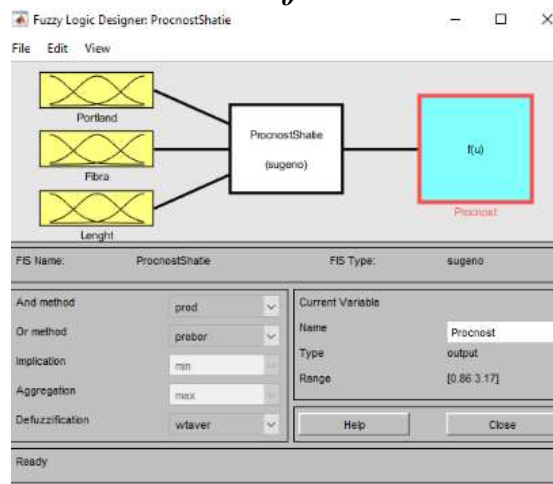
Влажн	Прочкз	Фибркт	Вид	Справка
0	0	0	0.89	
2	5	0.86		
2	25	0.96		
2	45	0.93		
4	5	0.87		
4	25	0.94		
4	45	0.91		
0	0	1.67		
2	5	1.58		
2	25	1.85		
2	45	1.80		
4	5	1.70		
4	25	1.82		
4	45	1.77		
0	0	2.70		
2	5	2.89		
2	25	1.17		
2	45	3.03		
4	5	2.34		
4	25	3.05		
4	45	2.97		

а

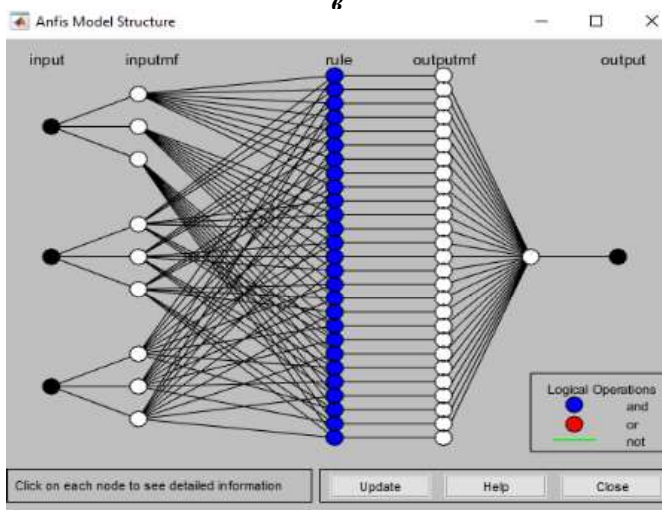


б

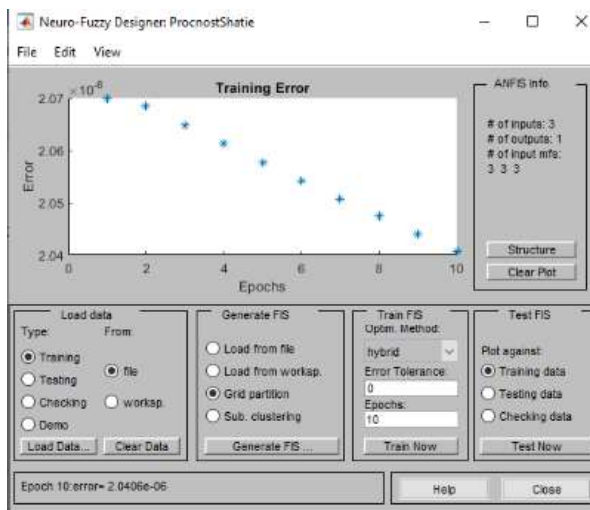
в



г



д



е

Рисунок 1 – Процедура создания нейронечеткой сети в системе Matlab
 а) обучающая выборка в формате .txt; б) загрузка данных; в) задание параметров нечеткой системы;
 г) переменные P, F, L; д) генерация нейронной сети; е) процесс обучения нейронной сети

Figure 1 – The procedure for creating a neuro-fuzzy network in the Matlab system
 а) training sample in the .txt format; б) data loading; в) setting the parameters of a fuzzy system;
 г) variables P, F, L; д) generation of a neural network; е) learning process of a neural network

го грунта свидетельствуют об оптимальном содержании добавки базальтового фиброволокна 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при средней длине волокон 25 мм.

Заключение. На основе результатов лабораторных исследований разработана интеллектуальная система на базе адаптивной нейронечеткой сети ANFIS, которая позволяет производить расчет предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с учетом содержания добавки портландцемента от 4 до 8 % по массе сухого грунта, базальтового фиброволокна от 0 до 4 %



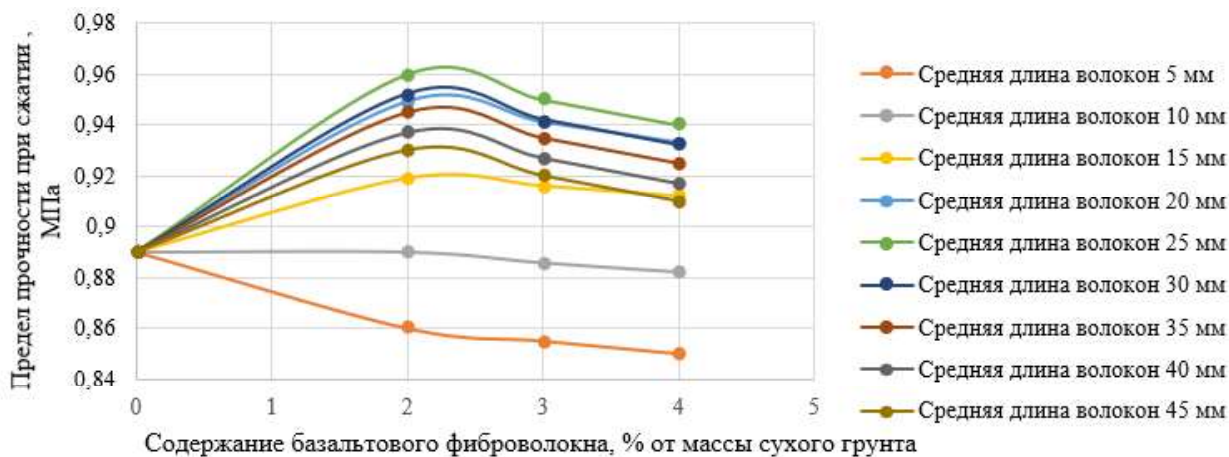


Рисунок 2 – Зависимость предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с 4 % портландцемента от массы сухого грунта и различным содержанием базальтового фиброволокна

Figure 2 – Dependence of the compression strength of fiber cement soil with 4 % of Portland cement by weight of dry soil and different content of basalt fiber

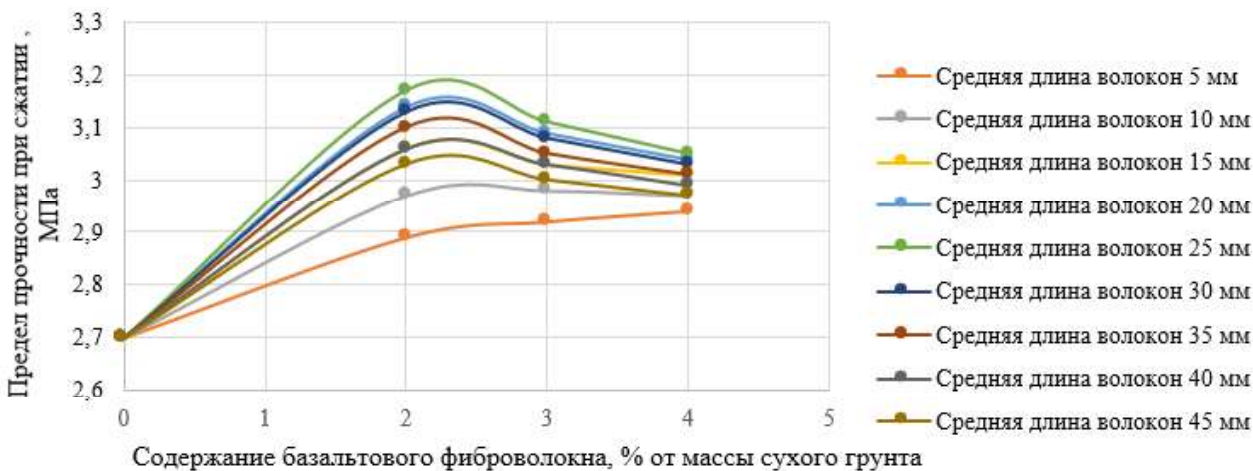


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности при сжатии фиброцементогрунта с 8 % портландцемента от массы сухого грунта и различным содержанием базальтового фиброволокна

Figure 2 – Dependence of the compression strength of fiber cement soil with 8 % of Portland cement by weight of dry soil and different content of basalt fiber

от массы сухого грунта с длиной волокон от 5 до 45 мм со средней абсолютной ошибкой $MARE = 0,632 \%$.

При содержании в составе фиброцементогрунтовой смеси 4 % портландцемента и базальтового фиброволокна со средней длиной волокон до 10 мм происходит снижение прочности материала вследствие нарушения однородности и недостаточной прочности цементогрунтовой матрицы для удержания волокон. Для достижения максимальных прочностных показателей фиброцементогрунта при содержании портландцемента от 4 до 8 % оптимальное содержание добавки базальтового фиброволокна составляет 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм.

С помощью разработанной интеллектуальной системы возможно производить оперативный и высокоточный расчет прочности фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и базальтового фиброволокна с различной длиной волокна для конструирования и расчета дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восканянц К. Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Научные исследования. 2018. № 6. С. 23–25.
2. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 30.04.2020. М: Стандартинформ. 2020. 19 с.
3. ГОСТ 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. Введ. 17.12.1998. М: Стандартинформ. 2008. 21 с.



4. ГОСТ Р 70452-2022. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия. Введ. 30.11.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 24 с.

5. Лесовозные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия / Е. В. Чернышова, А. В. Скрыпников, В. В. Самцов, М. А. Абасов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019 № 2 (368). С. 95–101.

6. Опытные-производственные исследования применения золошлаковых отходов в дорожном строительстве / С. А. Чудинов, Р. Д. Черняк, В. Н. Дмитриев, О. Н. Байц // Дороги и мосты. 2022. № 2 (48). С. 254–273.

7. Степанец В. Г., Герасимова С. А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозоустойчивости // Молодой ученый. 2020. № 22 (312). С. 148–154.

8. Фиброцементогрунтовая смесь: Патент № RU2785742C1 / С. А. Чудинов; заявл. 05.03.2022; опубл. 12.12.2022.

9. Чудинов С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.

10. Чудинов С. А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.

11. Ayeledeen M., Azzam W., Arab M. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022. No. 40 (5). P. 1873–1885.

12. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures / A. Elkhebu, A. Zainorabidin, A. Asadi [et al.] // *Soils and Foundations*. 2019. No. 59. P. 2144–2154.

13. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl / V. B. Godoy, L. F. Tomasi, M. Benetti et al. // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023. No. 41 (3). P. 1–15.

14. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers / M. Ali, M. Aziz, M. Hamza, M. F. Madni // *Geomechanics and Engineering*. 2020. No. 22 (3). P. 227–236.

15. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, 2001. 760 p.

REFERENCES

1. Voskanyants K. E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction. *Scientific Research*. 2018;(6):23–25. (In Russ.).

2. GOST 31108-2020. Cements for general construction. Specifications. Enacted 04/30/2020. Moscow, 2020. 19 p. (In Russ.).

3. GOST 51232-98. Drinking water. General requirements for organization and quality control methods. Enacted 12/17/1998. Moscow, 2008. 21 p. (In Russ.).

4. GOST R 70452-2022. Soils stabilized and strengthened with inorganic binders. General Specifications. Enacted 11/30/2022. Moscow, 2022. 24 p. (In Russ.).

5. Timber roads in the transport network of a timber industry enterprise. E. V. Chernyshova, A. V. Skrypnikov, V. V. Samtsov, M. A. Abasov. *Russian Forestry Journal*. 2019;2(368):95–101. (In Russ.).

6. Pilot research on the use of ash and slag waste in road construction. S. A. Chudinov, R. D. Chernyak, V. N. Dmitriev, O. N. Bajz. *Roads and bridges*. 2022;2(48):254–273. (In Russ.).

7. Stepanets V. G., Gerasimova S. A. Road pavement bases made of reinforced soils of increased strength and frost resistance. *Young Scientist*. 2020;22(312):148–154. (In Russ.).

8. Fiber cement soil mixture: Patent No. RU2785742C1. S. A. Chudinov. appl. 03/05/2022; publ. 12/12/2022. (In Russ.).

9. Chudinov S. A. Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex. Ekaterinburg, 2022. 164 p. (In Russ.).

10. Chudinov S. A. Reinforced soils in the construction of logging roads. Ekaterinburg, 2020. 174 p. (In Russ.).

11. Ayeledeen M., Azzam W., Arab M. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40(5):1873–1885.

12. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures / A. Elkhebu, A. Zainorabidin, A. Asadi et al. *Soils and Foundations*. 2019;(59):2144–2154.

13. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl / V. B. Godoy, L. F. Tomasi, M. Benetti et al. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023;41(3):1–15.

14. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers / M. Ali, M. Aziz, M. Hamza, M. F. Madni. *Geomechanics and Engineering*. 2020;22(3):227–236.

15. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, 2001. 760 p.

Статья поступила в редакцию 03.02.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 13.04.2024.
The article was submitted 03.02.2024; approved after reviewing 09.04.2024; accepted for publication 13.04.2024.

