

Исследование прочностных показателей фиброцементогрунта для устройства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог

С.А. Чудинов

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия
chudinovsa@m.usfeu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Статья поступила 04.03.2024, принята 15.04.2024

Эффективным направлением строительства конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог является технология дисперсного армирования цементогрунтовых композиций волокнами фибры с получением фиброцементогрунта. В целях исследования прочностных показателей проведены лабораторные испытания прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов на основе природного грунта — суглинка тяжелого песчанистого различных составов с содержанием портландцемента от 4 до 8 % по массе сухого грунта, добавки базальтового фиброволокна от 0 до 4 % от массы сухого грунта с длиной волокон от 5 до 45 мм. Установлено, что прочностные показатели фиброцементогрунта зависят от содержания не только портландцемента, но и базальтового фиброволокна и длины его волокон. Для достижения максимальных показателей прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта оптимальное содержание базальтового фиброволокна составило 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм и при содержании портландцемента от 4 до 8 % от массы сухого грунта. Добавка базальтового фиброволокна 2,0 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм позволяет увеличить прочность на растяжение при раскалывании (от 12,5 до 21,2 %) и прочность на сжатие (от 7,9 до 17,4 %) по сравнению с цементогрунтом с содержанием от 4 до 8 % портландцемента без добавки фибры. Наибольшая эффективность добавки фиброволокна проявляется в увеличении прочности на растяжение при раскалывании и, следовательно, трещиностойкости фиброцементогрунта. Кроме того, эффективность фиброволокна увеличивается при повышении содержания в составе фиброцементогрунтовой смеси портландцемента, что обеспечивает условия для формирования прочной структуры цементогрунтовой матрицы, способной устойчиво удерживать волокна.

Ключевые слова: прочность; фиброцементогрунт; лесовозная автомобильная дорога; дорожная одежда; дисперсное армирование.

Study of the strength indicators of fiber cement soil for the construction of structural layers of logging roads

S.A. Chudinov

Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

chudinovsa@m.usfeu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Received 04.03.2024, accepted 15.04.2024

An effective direction in the construction of structural layers of road pavements for logging roads is the technology of dispersed reinforcement of cement-soil compositions with fibers to produce fiber-cement soil. In order to study strength characteristics, laboratory tests are carried out on compressive strength and tensile strength when splitting fiber cement soil samples based on natural soil - heavy sandy loam of various compositions with a Portland cement content of 4% to 8% by weight of dry soil, basalt fiber additives from 0% up to 4% by weight of dry soil with fiber length from 5 mm to 45 mm. It is established that the strength properties of fiber cement soil depend on the content not only of Portland cement, but also on basalt fiber and the length of its fibers. To achieve maximum compressive strength and tensile strength when splitting fiber cement soil, the optimal content of basalt fiber is 2.0-2.5% by weight of dry soil with a fiber length of 25 mm with a Portland cement content of 4% to 8% by weight of dry soil. The addition of basalt fiber 2.5% by weight of dry soil with a fiber length of 25 mm allows increasing the tensile strength during splitting (from 12.5% to 21.2%) and compressive strength (from 7.9% to 17.4%) compared to cement soil containing from 4% to 8% Portland cement without the addition of fiber. The greatest effectiveness of the addition of fiber is manifested in an increase in the tensile strength during splitting and, consequently, the crack resistance of fiber cement soil. In addition, the effectiveness of fiber increases with augmenting content of Portland cement in the fiber cement-soil mixture, which provides conditions for the formation of a strong structure of the cement-soil matrix capable of stably holding fibers.

Keywords: strength; fiber cement soil; logging road; road pavement; dispersed reinforcement.

Введение. Функционирование и устойчивое развитие лесозаготовительной отрасли непосредственно связано с модернизацией транспортной инфраструктуры лесов, основным элементом которой являются лесовозные автомобильные дороги [1]. Лесовозные автомобильные дороги, как правило, эксплуатируются в сложных природных условиях и при высоких нагрузках от лесотранспорта. Поэтому для обеспечения нормативных транспортно-эксплуатационных показателей в течение всего срока службы требуется применение эффективных технологий по устройству дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог [2; 3].

Традиционно конструктивные слои дорожных одежд устраивают из природных каменных материалов — песка, щебня, гравия, щебеночно-песчаных и гравийно-песчаных смесей и т. п. Природные каменные материалы имеют высокие прочностные показатели и технологичны в производстве, однако значительные транспортные затраты ограничивают их применение в районах, отдаленных от мест добычи и производства данных материалов. В указанных условиях эффективным является применение технологии укрепления местных грунтов для устройства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог [4; 5].

Для укрепления грунтов используют различные минеральные вяжущие, но наиболее распространенным является портландцемент. Цементогрунт подобранного состава может обеспечивать заданные прочностные показатели и морозостойкость конструктивных слоев дорожной одежды [6–8]. Однако в сложных природных условиях лесной зоны, при наличии слабых, переувлажненных грунтов земляного полотна конструкции дорожных одежд из цементогрунта имеют ограниченный срок службы в результате процессов активного трещинообразования и разрушения при высоких нагрузках от лесотранспорта. Эффективным направлением по увеличению прочностных и деформационных показателей укрепленных грунтов является технология дисперсного армирования цементогрунтовых композиций волокнами фибры для устройства конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта [9].

Фиброцементогрунт — это композиционный материал, состоящий из смеси местного грунта с добавками портландцемента и фиброволокна, подобранных в определенных пропорциях для достижения заданных прочностных показателей в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 [10]. В сравнении с цементогрунтом, фиброцементогрунт имеет высокие физико-механические показатели и трещиностойкость, что позволяет эффективно использовать его при устройстве несущих слоев дорожной одежды в условиях лесной зоны и высоких транспортных нагрузок. Таким образом, применение технологии строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта является актуальным, в особенности в районах с недостатком природных каменных материалов.

В составе фиброцементогрунтовой смеси в качестве фиброволокна используют базальтовые, стеклянные, углеродные или пропиленовые волокна. Результаты исследований [11–14] показали, что распределенные по всему объему цементогрунтовой матрицы волокна

фибры за счет осевого растяжения воспринимают внешние нагрузки и увеличивают прочностные показатели фиброцементогрунта. При этом эффективность дисперсного армирования зависит от количества и длины вводимой добавки фиброволокна. Анализ приведенных выше научных работ показал, что данным исследованиям уделено недостаточное внимание.

Целью настоящей работы является исследование влияния количества добавок портландцемента и фиброволокна, а также длины волокон фибры на прочностные показатели фиброцементогрунта.

Задачи исследований включали:

1. Исследование характеристик природного грунта, используемого в составе фиброцементогрунта.
2. Математическое планирование эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунта с различным составом компонентов и длины волокон фибры.
3. Изготовление серий образцов фиброцементогрунта с различным составом компонентов и длины волокон фибры.
4. Проведение лабораторных испытаний по определению прочности при сжатии и прочности на растяжение при раскалывании серий образцов фиброцементогрунта с различным составом компонентов и длины волокон фибры.
5. Анализ полученных экспериментальных данных.

Объекты и методы исследования. Приготовление фиброцементогрунтовых смесей проводилось на основе местного природного грунта — суглинка тяжелого песчанистого (табл. 1), взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области, обслуживаемой ООО «ОУС Леском».

В составе фиброцементогрунтовых смесей использованы портландцемент ЦЕМ II/B-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [15] и вода по ГОСТ 51232-98 [16]. В качестве добавки фиброволокна применено базальтовое волокно, полученное из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области.

Базальтовое волокно имеет высокую прочность на растяжение — 2 100 МПа и химическую стойкость в кислотных и щелочных средах, поэтому его можно эффективно использовать в качестве добавки фиброволокна в составе фиброцементогрунта. Поскольку используемое базальтовое фиброволокно имеет однородную структуру, для проведения исследований были подготовлены образцы базальтовых волокон длиной 5, 25 и 45 мм.

Для получения математических моделей прочностных показателей фиброцементогрунта в зависимости от содержания компонентов и длины фиброволокна использовано математическое планирование эксперимента (ДОЕ). Для описания поверхностей отклика: прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании полиномом 2-го порядка был принят полный факторный план 3^3 . Матрица плана в безразмерных координированных величинах приведена в табл. 2. Координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования представлены в табл. 3.

Таблица 1. Характеристики грунта, используемого для приготовления фиброцементогрунтовых смесей

Суглинок тяжелый песчаный	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8
---------------------------	------	----	----	----	----	-----	-----

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Кодированные значения факторов		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Таблица 3. Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			0		+1	-1
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта)	%	X ₁	6	2	8	4
Содержание фиброволокна базальтового (от массы сухого грунта)	%	X ₂	2	2	4	0
Длина базальтового фиброволокна	мм	X ₃	25	20	45	5

Приготовление и лабораторные испытания фиброцементогрунтовых образцов производились в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 [10]. Срок набора прочности фиброцементогрунтовых образцов перед испытаниями составил 28 суток твердения во влажных условиях в эксикаторе.

На основании матрицы планирования эксперимента для испытаний были изготовлены серии фиброцементогрунтовых образцов различных составов. Приготовление фиброцементогрунтовых смесей каждого из составов производилось в следующей последовательности:

1. Подготовка природного грунта, включающая:

– высушивание в сушильном шкафу при температуре 110±5 °С до постоянной массы и охлаждение на

воздухе до температуры 22±3 °С;

– растирание сухого грунта до размера частиц не более 16 мм в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником.

2. Перемешивание навески сухого грунта массой не менее 15 кг с портландцементом в заданных пропорциях до однородного состояния.

3. Добавление воды в смесь сухого грунта и портландцемента до оптимальной влажности. Оптимальная влажность каждого состава смеси определялась в соответствии с ГОСТ Р 70456-2022 [10]. В зависимости от количества портландцемента в цементогрунтовых смесях, показатели оптимальной влажности составили от 15,5 до 16,5 %.

4. Добавление в цементогрунтовую смесь фиброволокна в заданных пропорциях и перемешивание до однородного состояния.

Исследование прочностных показателей проводилось на аттестованном лабораторном оборудовании путем проведения испытаний каждого состава фиброцементогрунтовых смесей на трех образцах при определении прочности на сжатие и на аналогичном количестве образцов при определении прочности на растяжение при раскалывании.

Статистический анализ и визуализация прочностных показателей фиброцементогрунта различного состава производились в программном комплексе *Statistica 10* (TIBCO Software Inc., США).

Результаты и обсуждение. Поверхность отклика прочности на сжатие фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна представлена на рис. 1.

Согласно полученным экспериментальным данным, прочность на сжатие фиброцементогрунтовых образцов зависит не только от содержания минерального вяжущего — портландцемента, но и от количества базальтового фиброволокна. Оптимальное содержание фиброволокна для достижения максимальной прочности на сжатие фиброцементогрунта составляет 2,0–2,5 % от массы сухого грунта.

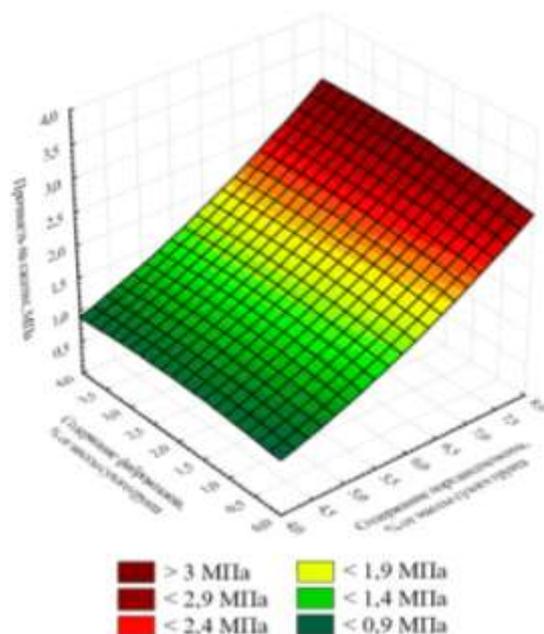


Рис. 1. Поверхность отклика прочности на сжатие фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

Прочность на сжатие фиброцементогрунта с содержанием 2,0 % базальтового фиброволокна выше на 7,9 % цементогрунта с 4 % портландцемента, на 10,8 % — цементогрунта с 6 % портландцемента и на 17,4 % — цементогрунта с 8 % портландцемента (рис. 2). Таким образом, эффективность действия базальтового фиброволокна по увеличению прочности на сжатие возрастает при увеличении содержания портландцемента в составе фиброцементогрунтовой смеси.

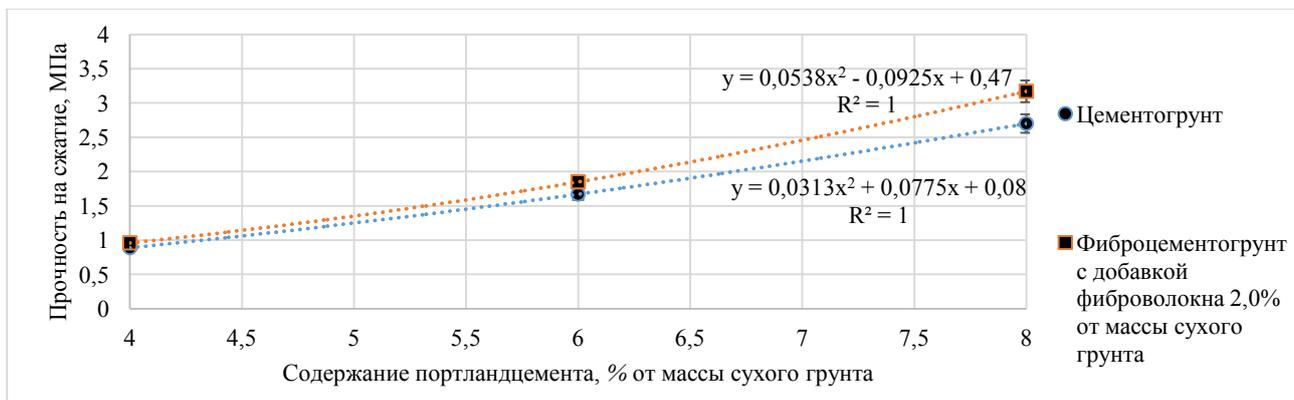


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие образцов цементогрунта и фиброцементогрунта от содержания портландцемента

Установленная зависимость объясняется тем, что при увеличении содержания минерального вяжущего в составе фиброцементогрунтовой смеси происходит более интенсивное формирование кристаллизационной структуры цементогрунтовой матрицы и эффективное удерживание в ее объеме фиброволокон. При этом чем прочнее удерживаются фиброволокна в цементогрунтовой матрице, тем большие нагрузки они способны воспринимать за счет своего осевого растяжения и тем

большую прочность обретает композиционный материал в целом.

Поверхность отклика прочности на сжатие фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и длины фиброволокна представлена на рис. 3.

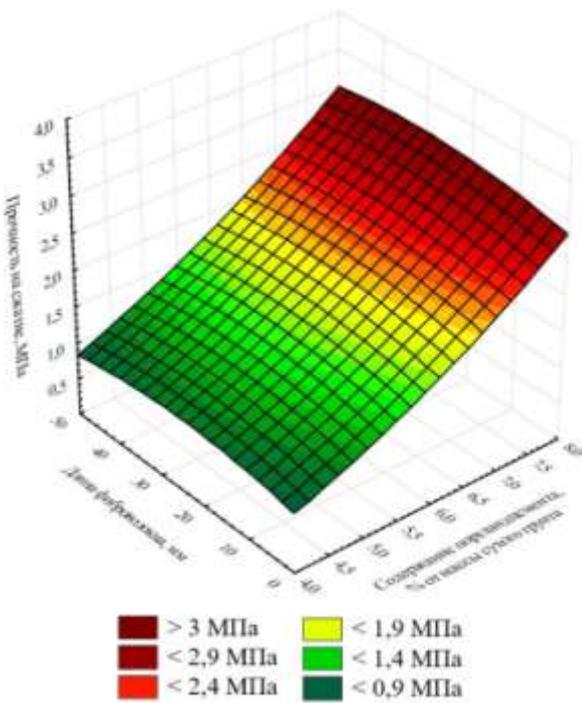


Рис. 3. Поверхность отклика прочности на сжатие фиброцементогрунта в зависимости от длины фиброволокна

На основании полученных данных, прочность на сжатие фиброцементогрунта зависит от длины фиброволокна. Оптимальная длина фиброволокна, при которой достигаются максимальные значения прочности на сжатие фиброцементогрунта, составила 25 мм.

Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта в зависимости от

содержания портландцемента и фиброволокна представлена на рис. 4.

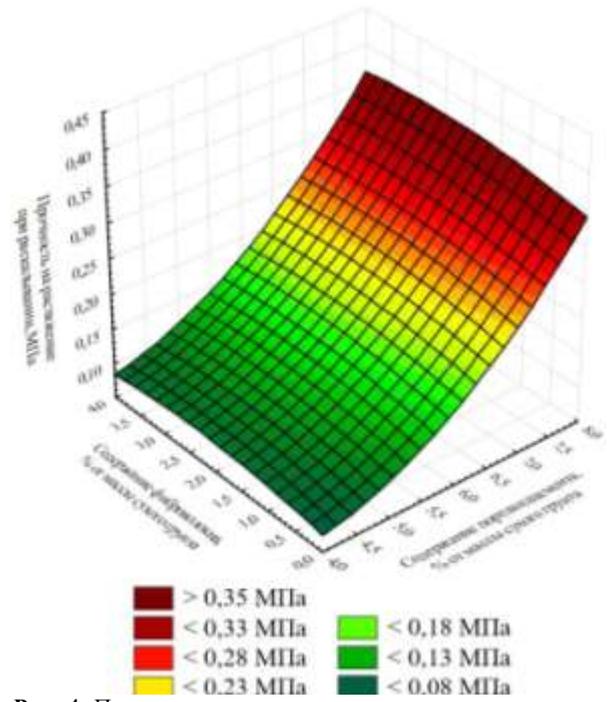


Рис. 4. Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

Результаты исследований показывают, что прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов зависит от содержания портландцемента и базальтового фиброволокна. Оптимальное содержание фиброволокна для достижения максимальной прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта составляет 2,0–2,5 % от массы сухого грунта.

Прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта с содержанием 2,0 % базальтового фиброволокна выше на 12,5 % цементогрунта с 4 % портландцемента, на 15,6 % — цементогрунта с 6 % портландцемента и на 21,2 % — цементогрунта с 8 % портландцемента (рис. 5).

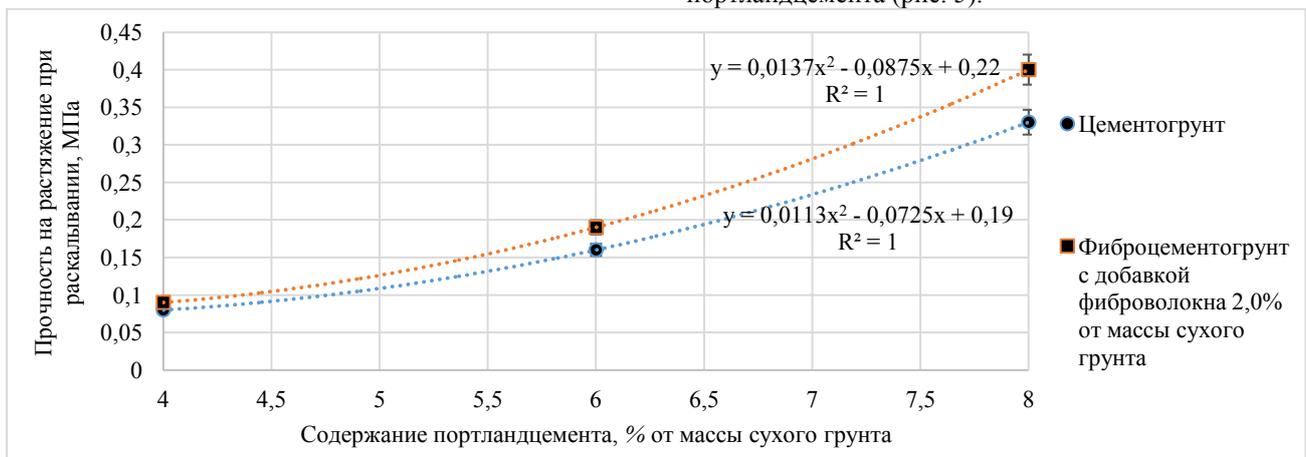


Рис. 5. Зависимость прочности на растяжение при раскалывании образцов цементогрунта и фиброцементогрунта от содержания портландцемента

Таким образом, эффективность действия базальтового фиброволокна по увеличению прочности на растяжение при раскалывании возрастает при увеличении со-

держания портландцемента в составе фиброцементогрунтовой смеси, т. е. при развитии кристаллизационной структуры материала, обеспечивающей прочное удер-

жание волокон в цементогрунтовой матрице фиброцементогрунта. Макроструктура фиброцементогрунта с изображением цементогрунтовой матрицы и распределенными в ней волокнами фиброволокна представлена на рис. 6.



Рис. 6. Макроструктура фиброцементогрунтового образца: 1 — базальтовое фиброволокно; 2 — цементогрунтовая матрица

Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и длины фиброволокна представлена на рис. 7.

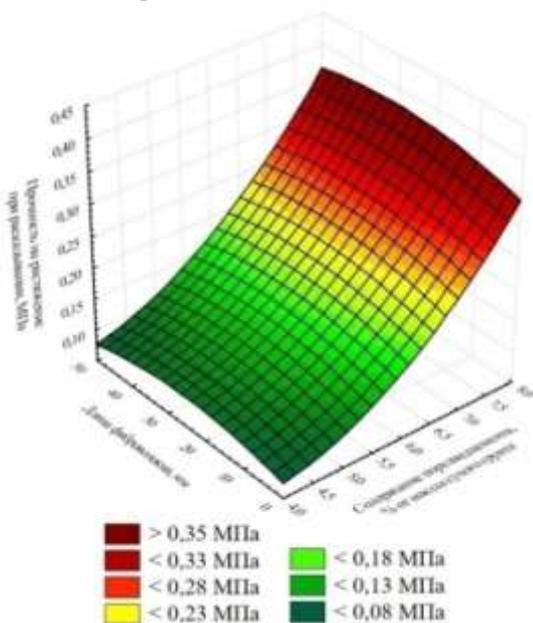


Рис. 7. Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта в зависимости от длины фиброволокна

Согласно полученным данным, прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта зависит от длины фиброволокна. Оптимальная длина фиб-

роволокна, при которой достигаются максимальные значения прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, составила 25 мм.

Полученные результаты соответствуют исследованиям [17–23] эффективности дисперсного армирования цементогрунтов фиброволокном на основе полипропиленовых волокон по увеличению прочностных показателей материала. Так, в исследовании [17] представлены данные максимального прироста предела прочности на изгиб 6450 кПа у фиброцементогрунта при оптимальном содержании фиброволокна 0,75 %. Согласно результатам испытаний укрепленных грунтов [18], зафиксировано увеличение предела прочности при сжатии на 279 % и модуля упругости на 113,6 % у грунта, армированного волокнами полипропиленовой фибры.

Выводы. На основании проведенных исследований установлено, что прочностные показатели фиброцементогрунта зависят от содержания не только минерального вяжущего — портландцемента, но и от содержания фиброволокна и длины его волокон.

Для достижения максимальных показателей прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта оптимальное содержание базальтового фиброволокна составило 2,0–2,5 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм и содержании портландцемента от 4 до 8 % от массы сухого грунта.

Добавка базальтового фиброволокна позволяет увеличить прочностные показатели грунтов, укрепленных портландцементом. При этом эффективность фиброволокна увеличивается при повышении содержания в составе фиброцементогрунтовой смеси портландцемента, т. е. при условии формирования прочной структуры цементогрунтовой матрицы, способной устойчиво удерживать волокна.

Добавка базальтового фиброволокна 2,0 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм позволяет увеличить прочность на растяжение при раскалывании от 12,5 до 21,2 % и прочность на сжатие — от 7,9 до 17,4 % по сравнению с цементогрунтом с содержанием от 4 до 8 % портландцемента без добавки фибры. Полученные зависимости прочностных показателей позволили установить, что наибольшая эффективность добавки фиброволокна проявляется в увеличении прочности на растяжение при раскалывании и, следовательно, в повышении трещиностойкости фиброцементогрунта.

Высокие прочностные показатели и трещиностойкость фиброцементогрунта позволяют использовать данный композиционный материал для строительства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог, эксплуатирующихся в сложных природных условиях, значительных транспортных нагрузках и в отдаленных районах лесосырьевых баз, без необходимости применения каменных инертных материалов.

Литература

1. Чернышова Е.В., Скрышников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 95-101.
2. Катаров В.К. Ресурсосберегающая методика расчета дорожных одежд лесовозных дорог // Resources and technology. 2020. № 1. Р. 1-13.

3. Мохирев А.П., Медведев С.О., Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. № 3 (35). С. 103-113.
4. Чудинов С.А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
5. Chudinov S. The use of ash-mineral mixtures for the construction of high-strength coatings of forest roads // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 574. P. 1-8.

6. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Науч. исследования. 2018. № 6. С. 23-25.
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. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 817. P. 1-9.
9. Чудинов С.А. Фиброцементогрунтовая смесь: пат. RU2785742C1; заявл. 03.05.2022; опубл. 12.12.2022. Бюл. № 35. 9 с.
10. ГОСТ Р 70452-2022. Грунты стабилизированные и укрепленными неорганическими вяжущими. Общие технические условия. Введ. 30.11.2022. М.: Ин-т стандартизации, 2022. 24 с.
11. Ayeldeen M., Azzam W., Arab M.G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement // Geotech Geol Eng. 2022. № 40. P. 1873-1885.
12. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl // Geotech Geol Eng. 2023. № 3. P. 1-15.
13. Mazhar S., Guha Ray A. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling // Int J Geotech Eng. 2021. № 15. P. 977-993.
14. Gong Y., He Y., Han C. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles // Adv Mater Sci Eng. 2019. № 2019. P. 10-21.
15. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 30.04.2020. М.: Стандартиформ, 2020. 19 с.
16. ГОСТ 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. Введ. 17.12.1998. М.: Стандартиформ, 2008. 21 с.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // Soils Found. 2019. № 59. P. 2144-2154.
18. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers // Geomech Eng. 2020. № 22. P. 227-236.
19. Muñoz Y.O., de Almeida J.L., Mora A.J.E.V. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application // Geotech Geol Eng. 2023. № 41. P. 2599-2628.
20. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay // Geotech Geol Eng. 2022. № 40. P. 4095-4107.
21. Nezhad M.G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay // J Rock Mech Geotech Eng. 2021. № 13. P. 626-642.
22. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirota formation // Transp Geotech. 2021. № 31. P. 100-113.
23. Yadav J.S., Tiwari S.K., Shekhwat P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres // Transp Infrastruct Geotechnol. 2018. № 5. P. 191-209.
3. Mohirev A.P., Medvedev S.O. Smolina O.N. Factors influencing the capacity of logging roads // Forestry Engineering Journal. 2019. № 3 (35). P. 103-113.
4. Chudinov S.A. Reinforced soils in the construction of logging roads: monogr. Ekaterinburg: UGLTU, 2020. 174 p.
5. Chudinov S. The use of ash-mineral mixtures for the construction of high-strength coatings of forest roads // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 574. P. 1-8.
6. Voskanyanc K.E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction // Nauch. issledovaniya. 2018. № 6. P. 23-25.
7. Stepanec V.G., Gerasimova S.A. Pavement bases from reinforced soils of increased strength and frost resistance // Young Scientist. 2020. № 22 (312). P. 148-154.
8. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 817. P. 1-9.
9. Chudinov S.A. Fiber cement soil mixture: pat. RU2785742C1; заявл. 03.05.2022; опубл. 12.12.2022. Бюл. № 35. 9 p.
10. GOST R 70452-2022. Soils stabilized and strengthened with inorganic binders. General technical conditions. Vved. 30.11.2022. M.: In-t standartizacii, 2022. 24 p.
11. Ayeldeen M., Azzam W., Arab M.G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement // Geotech Geol Eng. 2022. № 40. P. 1873-1885.
12. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl // Geotech Geol Eng. 2023. № 3. P. 1-15.
13. Mazhar S., Guha Ray A. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling // Int J Geotech Eng. 2021. № 15. P. 977-993.
14. Gong Y., He Y., Han C. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles // Adv Mater Sci Eng. 2019. № 2019. P. 10-21.
15. ГОСТ 31108-2020. General construction cements. Technical conditions. Vved. 30.04.2020. M.: Standartinform, 2020. 19 p.
16. ГОСТ 51232-98. Drinking water. General requirements for organization and methods of quality control. Vved. 17.12.1998. M.: Standartinform, 2008. 21 p.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // Soils Found. 2019. № 59. P. 2144-2154.
18. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers // Geomech Eng. 2020. № 22. P. 227-236.
19. Muñoz Y.O., de Almeida J.L., Mora A.J.E.V. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application // Geotech Geol Eng. 2023. № 41. P. 2599-2628.
20. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay // Geotech Geol Eng. 2022. № 40. P. 4095-4107.
21. Nezhad M.G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay // J Rock Mech Geotech Eng. 2021. № 13. P. 626-642.
22. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirota formation // Transp Geotech. 2021. № 31. P. 100-113.
23. Yadav J.S., Tiwari S.K., Shekhwat P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres // Transp Infrastruct Geotechnol. 2018. № 5. P. 191-209.

References

1. Chernyshova E.V., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Abasov M.A. Timber roads in the transport network of a timber industry enterprise // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 2 (368). P. 95-101.
2. Katarov V.K. Resource-saving methodology for calculating road pavements for logging roads // Resources and technology. 2020. № 1. P. 1-13.