

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>

УДК 624.138.232



Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области

Сергей А. Чудинов , chudinovsa@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37,
г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

Решением задачи повышения эффективности технологии укрепления грунтов конструкций лесовозных автомобильных дорог может быть дисперсное армирование цементогрунтовой матрицы волокнами фибры. Получаемый при этом композиционный материал – фиброцементогрунт в условиях лесной зоны обладает повышенными прочностными показателями и трещиностойкостью. В целях исследования структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта: угла внутреннего трения и удельного коэффициента сцепления, проведены лабораторные исследования на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1. Образцы фиброцементогрунта изготовлены на основе природного грунта из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги в Свердловской области с содержанием 2 %, 4 %, 6 % портландцемента и 0 %, 0,75 %, 1,5 % фиброволокна на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит. Определены структурные прочностные характеристики и установлено, что добавка базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунта влияет при уровне значимости $p = 0,000026$ на угол внутреннего трения и при $p = 0,000016$ на удельный коэффициент сцепления в зависимости от содержания портландцемента. При содержании 2 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна снижает удельный коэффициент сцепления на 8 % (10 кПа) и угол внутреннего трения на 1° , в силу недостаточного развития цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунта. При содержании 6 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна увеличивает коэффициент сцепления на 43 % (258,7 кПа) и угол внутреннего трения на 2° , в связи с удержанием в цементогрунтовой матрице и восприятием внешних нагрузок фиброволокном за счет осевого растяжения. Полученные показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения целесообразно использовать для моделирования и расчета конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта методом конечных элементов с учетом нагрузок от лесотранспорта и сложных природных условий лесной зоны.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога, фиброцементогрунт, укрепление грунта, дорожная одежда, угол внутреннего трения, удельный коэффициент сцепления, дисперсное армирование

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чудинов, С. А. Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области / С. А. Чудинов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 116–133. – Библиогр.: с. 128–132 (34 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>.

Поступила 27.12.2023. Пересмотрена 30.01.2024. Принята 12.02.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024.

Article

Structural strength characteristics of fiber cement soil in road pavement of timber roads in the Sverdlovsk region

Sergey A. Chudinov ✉, chudinovsa@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Ural State Forestry Engineering University, st. Siberian Tract, 37, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

Abstract

The solution to the problem of increasing the efficiency of the technology for strengthening soils of logging highway structures can be dispersed reinforcement of the cement-soil matrix with fiber. The resulting composite material, fiber cement soil, in the forest zone has increased strength properties and crack resistance. In order to study the structural strength characteristics of fiber cement soil: the angle of internal friction and the specific coefficient of adhesion, laboratory studies were carried out using a single-plane cutting unit GT 0.2.1. Samples of fiber cement soil were made on the basis of natural soil from the subgrade of a logging road in the Sverdlovsk region containing 2 %, 4 %, 6 % Portland cement and 0 %, 0.75 %, 1.5 % fiber based on waste from the production of basalt thermal insulation boards. Structural strength characteristics were determined and it was found that the addition of basalt fiber in the composition of fiber cement soil affects the angle of internal friction at a significance level of $p = 0.000026$ and at $p = 0.000016$ the specific coefficient of adhesion depending on the content of Portland cement. With a content of 2 % Portland cement, the addition of 1.5 % basalt fiber reduces the specific coefficient of adhesion by 8 % (10 kPa) and the angle of internal friction by 1° , due to the insufficient development of the cement-soil matrix of the fiber-cement soil. With a content of 6% Portland cement, the addition of 1.5 % basalt fiber increases the adhesion coefficient by 43 % (258.7 kPa) and the angle of internal friction by 2° , due to retention in the cement-soil matrix and the perception of external loads by the fiber due to axial tension. It is advisable to use the obtained indicators of specific adhesion and angle of internal friction for modeling and calculating road pavement structures for logging roads made of fiber cement soil using the finite element method, taking into account loads from timber transport and difficult natural conditions of the forest zone.

Keywords: logging road, fiber cement soil, soil strengthening, road pavement, angle of internal friction, specific coefficient of adhesion, dispersed reinforcement

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Chudinov S. A. (2024). Structural strength characteristics of fiber cement soil in road pavement of logging roads in the Sverdlovsk region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 116-133 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>.

Received 27.12.2023. *Revised* 30.01.2024. *Accepted* 12.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

Введение

Надежность функционирования лесовозных автомобильных дорог в смешанных лесах Свердловской области определяет эффективность транспортного освоения лесосырьевых баз, а значит и разви-

тие лесопромышленной отрасли в целом. Лесовозные автомобильные дороги должны обеспечивать транспортировку лесоматериалов в соответствии с нормативными показателями грузооборота при требуемых прочностных и транспортно-эксплуатационных показателях покрытия дорожной одежды.

В данном случае будет обеспечиваться бесперебойная транспортировка лесоматериалов с максимальной скоростью и минимальными транспортными затратами [4, 6].

Инертные материалы: песок, щебень, щебеночно-песчаные смеси, гравийно-песчаные смеси, являются традиционными и активно используемыми дорожно-строительными материалами для устройства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог. Их применение обусловлено высокой производственной и эксплуатационной технологичностью, при отсутствии необходимости в использовании специфичных видов дорожно-строительной техники и оборудования.

Однако, как правило, в районах освоения лесосырьевых баз отсутствуют поставщики дорожно-строительных инертных материалов. Это вызывает необходимость осуществлять доставку данных материалов на длительные расстояния и приводит в конечном итоге к значительному удорожанию сметной стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог [2].

Одной из эффективных технологий строительства лесовозных автомобильных дорог, обеспечивающей высокие прочностные и транспортно-эксплуатационные показатели, является устройство конструктивных слоев дорожных одежд из местных укрепленных грунтов [1, 10, 18]. При укреплении грунтов в качестве основного компонента используется местный грунт, при этом в конструкции дорожной одежды инертные материалы не используются, либо используются в незначительном количестве. В связи с этим, применение технологии укрепления грунтов для строительства лесовозных автомобильных дорог является актуальным, обеспечивающее низкую стоимость строительства, в особенности в районах с недостатком природных каменных материалов [14, 22, 34].

Для укрепления грунтов конструкций лесовозных автомобильных дорог используют различные минеральные вяжущие и отходы промышленного производства [3, 13, 31]. Наиболее распространенным минеральным вяжущим, используемым для укрепления грунтов, является портландцемент. Цементогрунты подобранных составов с добавками активных компонентов, повышающих эффективность

структурообразования материала, обеспечивают требуемые прочностные показатели и морозостойкость [5, 15, 33]. Однако в сложных природных условиях лесной зоны, характеризующихся распространением слабых, переувлажненных грунтов в основании лесовозных автомобильных дорог, цементогрунты обладают низкой трещиностойкостью [16, 30]. Низкая трещиностойкость цементогрунтовых слоев проявляется в виде сетки продольных и поперечных трещин, снижая срок службы дорожной одежды в результате попадания в трещины влаги и накопления остаточных деформаций от воздействия грузового транспорта, осуществляющего транспортировку древесных материалов.

Таким образом, актуальным является разработка технологических решений по улучшению эффективности укрепления грунтов портландцементом для достижения высоких прочностных показателей и трещиностойкости слоев конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Одной из перспективных является технология дисперсного армирования волокнами фибры цементогрунтовых смесей [26, 29, 32]. Получаемый таким образом композиционный материал – фиброцементогрунт обладает повышенными физико-механическими показателями и трещиностойкостью по сравнению с цементогрунтом, в особенности для его применения в условиях лесной зоны и значительных нагрузок от лесотранспортных машин на дорожное полотно [20, 27].

Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей возможно использовать базальтовые, стеклянные, углеродные или пропиленовые волокна [25]. Распределенные по всему объему фиброцементогрунтовой смеси волокна фибры, в процессе твердения портландцемента, удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы, и дисперсно армируют материал, воспринимая посредством своего осевого растяжения воздействие внешних нагрузок и увеличивая таким образом прочностные и деформационные показатели данного композиционного материала [21, 23, 28].

В работах [11, 12, 17] приведены составы, а также результаты лабораторных исследований фиброцементогрунтовой смеси с различными видами фибры по показателям: водонасыщения, предела

прочности при сжатии, предела прочности при изгибе, предела прочности при раскалывании и морозостойкости. Согласно полученным данным, фиброцементогрунты имеют более высокие прочностные показатели и морозостойкость, а также низкое водонасыщение, по сравнению с аналогичными образцами из цементогрунта без добавки фибры.

В целях моделирования, конструирования и расчета конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунтовых слоев для условий лесной зоны и транспортных нагрузок от лесотранспортных машин, требуются показатели основных характеристик структурной прочности материала, а именно: угол внутреннего трения и удельное сцепление. Анализ приведенных выше научных работ показал, что данным исследованиям уделено не достаточное внимание.

Целью настоящей работы является исследование влияния добавок портландцемента и фиброволокна на структурные прочностные характеристики – угол внутреннего трения и удельное сцепление –

фиброцементогрунтов в условиях смешанных лесов Свердловской области.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объект исследования: конструктивные слои дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта.

Предмет исследования: структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта: угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Дизайн эксперимента

Для проведения лабораторных испытаний изготовлены образцы в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 «Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия». На каждый состав смеси укрепленного грунта изготовлено по 3 образца диаметром 71 мм и высотой 35 мм (рис. 1). Перед испытанием, срок набора прочности образцов составил 28 суток твердения во влажных условиях в эксикаторе.

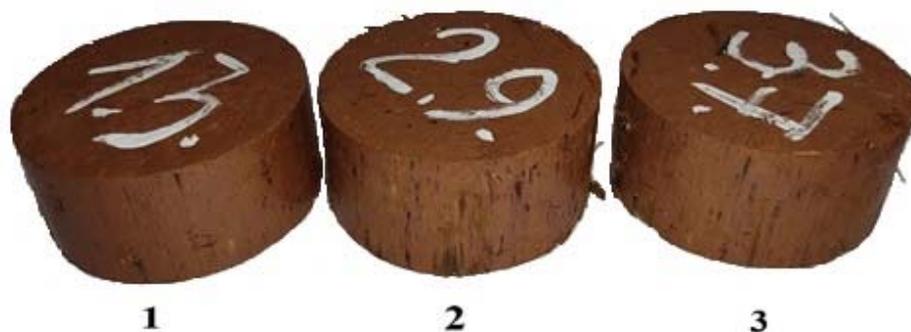


Рисунок 1. Образцы укрепленных грунтов для проведения испытаний:

- 1 (образец № 1.3) – цементогрунт с содержанием 2 % портландцемента от массы сухого грунта, без фибры;
2 (образец № 2.9) – фиброцементогрунт с содержанием 4 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна от массы сухого грунта;
3 (образец № 3.7) – фиброцементогрунт с содержанием 6 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна от массы сухого грунта

Figure 1. Samples of strengthened soils for testing:

- 1 (sample No. 1.3) – cement soil containing 2 % Portland cement by weight of dry soil, without fiber;
2 (sample No. 2.9) – fiber cement soil containing 4 % Portland cement and 1.5 % fiber fiber by weight of dry soil;
3 (sample No. 3.7) – fiber cement soil containing 6 % Portland cement and 1.5 % fiber fiber by weight of dry soil

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Приготовление фиброцементогрунтовых смесей осуществлялось на основе 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».

Таблица 1

Характеристики природного грунта для приготовления фиброцементогрунтовых смесей

Table 1

Characteristics of natural soil for the preparation of fiber cement soil mixtures

Наименование грунта Soil name	Удельный вес грунта, т/м ³ Specific gravity of soil, t/m ³	Влажность на границе текучести, % по массе Moisture at the yield point, % by weight	Влажность на границе раскатывания, % по массе Humidity at the rolling boundary, % by weight	Число пластичности Plasticity number	Оптимальная влажность, % по массе Optimal humidity, % by weight	pH грунта Soil pH	Содержание гумусовых веществ Content of humic substances
Суглинок тяжелый песчанистый Heavy sandy loam	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

В составе фиброцементогрунтовых смесей использован портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и вода по ГОСТ 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества». В качестве добавки фибры использовалось базальтовое волокно, взятое из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области. Благодаря высокой прочности на растяжение – 2100 МПа и химической стойкости в кислотно-щелочных средах, базальтовое фиброволно можно эффективно использовать в качестве дисперсно-армирующей добавки в фиброцементогрунтах [7-9].

Для испытаний были изготовлены серии образцов фиброцементогрунтов различных составов, представленных в табл. 2. На основании проведенных исследований прочностных показателей фиброцементогрунтов данных составов, оптимальное содержание фиброволокна составляет 1,5 % от массы сухого грунта. При содержании портландцемента 6 % от массы сухого грунта достигаются прочност-

ные показатели, обеспечивающие возможность использования фиброцементогрунта в слоях оснований лесовозных автомобильных дорог.

Приготовление каждого состава фиброцементогрунтовой смеси осуществлялось в следующей последовательности:

1. Высушивание грунта в сушильном шкафу при температуре $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ до постоянной массы и охлаждение на воздухе до температуры $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$.
2. Растирание сухого грунта в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Максимальный размер частиц грунта составил менее 16 мм.
3. Перемешивание навески сухого грунта массой не менее 15 кг с портландцементом в заданных пропорциях до однородного состояния.
4. Добавление в смесь сухого грунта и портландцемента воды до оптимальной влажности и перемешивание до однородного состояния. Оптимальная влажность каждого состава фиброцементогрунтовых смесей определялась в соответствии с ГОСТ Р 70456-2022 «Грунты. Определение оптимальной влажности и максимальной плотности методом Проктора». В связи с тем, что составы укрепленных

грунтов имеют различное содержание портландцемента (от 2,0 % до 6,0 % от массы сухого грунта), значения оптимальной влажности и требуемое количество воды изменялось соответственно от 15,0 % до 16,0 % от массы сухого грунта.

5. Добавление в смесь цементогрунтовой смеси фиброволокна в заданных пропорциях и перемешивание до однородного состояния.

Таблица 2

Составы фиброцементогрунтовых смесей

Table 2

Compositions of fiber cement-soil mixtures

Компоненты состава, % от массы сухого грунта Components of the composition, % by weight of dry soil	Составы фиброцементогрунта Compositions of fiber cement soil								
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б Portland cement СЕМ II/B-I 32.5B	2,0	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0
Фиброволокно базальтовое (отход производства базальтовых теплоизоляционных плит) Fiber basalt (waste from the production of basalt thermal insulation boards)	0	0,75	1,5	0	0,75	1,5	0	0,75	1,5
Вода Water	15,0	15,0	15,0	15,5	15,5	15,5	16,0	16,0	16,0

Примечание: Расчет массы добавляемых компонентов: портландцемента, фиброволокна и воды, производился относительно массы навески сухого грунта и заданного содержания добавок (% от массы сухого грунта) в зависимости от состава фиброцементогрунтовых смесей

Note: The calculation of the mass of the added components: Portland cement, fiber and water was carried out relative to the mass of a sample of dry soil and the specified content of additives (% of the mass of dry soil) depending on the composition of the fiber cement soil mixtures

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Исследования по изучению показателей угла внутреннего трения и удельного сцепления фиброцементогрунта проводились в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1. Испытания проводились по 3 образцам на каждый состав укрепленного грунта, нагруженных нормальной к плоскости среза нагрузкой (нормальное давление), увеличиваемой ступенями: 0,1 МПа; 0,2 МПа; 0,3 МПа. Путем регистрации сопротивления срезу образцов на каждой ступени нормального давления, рассчитаны показатели угла внутреннего трения и удельного сцепления составов фиброцементогрунта.

С целью разработки математических моделей структурных прочностных характеристик: угла внутреннего трения и удельного сцепления, в зависимости от количества компонентов фиброцементогрунтовой смеси: портландцемента и фиброволокна, использовано математическое планирование эксперимента (DOE). Для описания поверхностей отклика: угла внутреннего трения и удельного сцепления, полиномом второго порядка был принят полный факторный план 3^2 . Матрица плана в безразмерных кодированных величинах представлена в табл. 3.

Координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

Table 3

Experiment planning matrix

№ опыта Experience no.	Кодированные значения факторов Coded factor values	
	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Таблица 4

Уровни варьирования переменных факторов

Table 4

Levels of variation of variable factors

Факторы Factors	Размерность Dimension	Обозначение факторов Designation of factors	Основной уровень Main level	Шаг варьирования Variation step	Верхний уровень Top level	Нижний уровень Lower level
			0		+1	-1
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта) Portland cement content (based on dry soil weight)	%	X ₁	4	2	6	2
Содержание фиброволокна базальтового (от массы сухого грунта) Basalt fiber content (based on dry soil weight)	%	X ₂	0,75	0,75	1,5	0

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализ данных

Статистический анализ и визуализация полученных результатов структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта различного состава производился в программном комплексе Statistica 10 (TIBCO Software Inc., США).

Для изучения связи между переменными проведен регрессионный анализ. Исследована значимость регрессии и адекватность построенных моделей исходным данным. Для оценки степени адекват-

ности построенных моделей проведен анализ остатков модели по разности между наблюдаемыми и предсказываемыми значениями угла внутреннего трения и удельного сцепления. Кроме того, статистическая значимость уравнения регрессии эксперименту проверялась по F-критерию Фишера.

Результаты

На основании DOE получено уравнение регрессии

$$C(X) = -117,4344 + 118,3392X_1 - 121,64X_2 + 0,3792X_1^2 + 44,7833X_1X_2 + 16,9896X_2^2 \quad (1)$$

где $C(X)$ – удельное сцепление, кПа;

X_1 – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

X_2 – содержание фиброволокна базальтового, % от массы сухого грунта

адекватно (критерий адекватности Фишера = 98,40529, $p = 0,000026$) описывающее экспериментальные данные удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды (рис. 2).

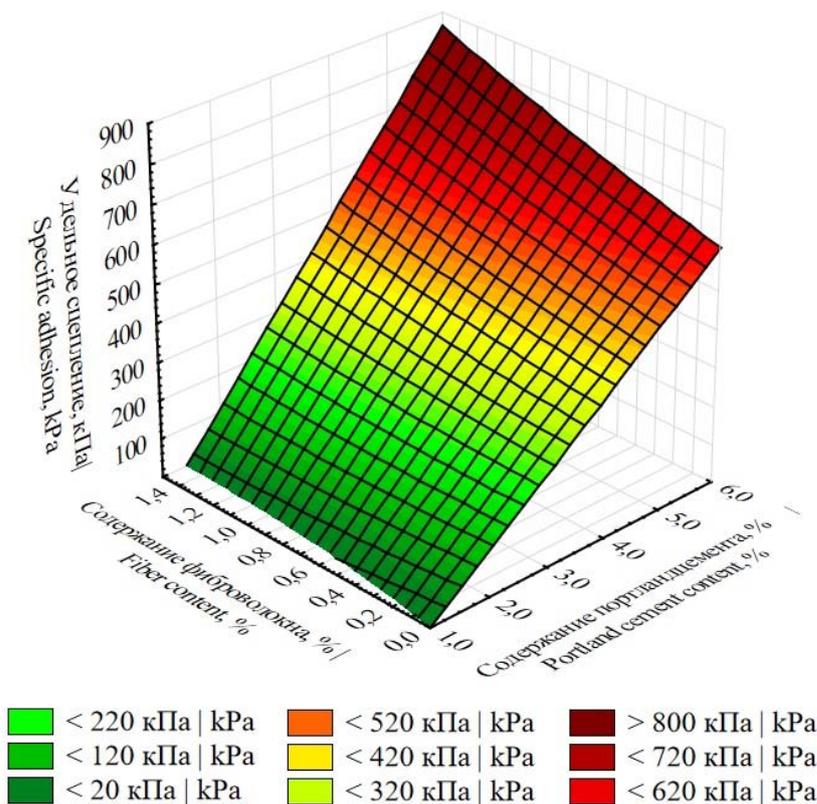


Рисунок 2. Поверхность отклика удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 2. Response surface of the specific adhesion of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Нормальный вероятностный график остатков удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды свидетельствует, что остатки достаточно хорошо ложатся на нормальную прямую (рис. 3). На диаграмме рассеяния предсказанных значений и остатков (рис. 4) нет резко выделяющихся остатков. Оценка адекват-

ности модели (1) с помощью остатков свидетельствует о том, что модель удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды адекватно описывает данные эксперимента.

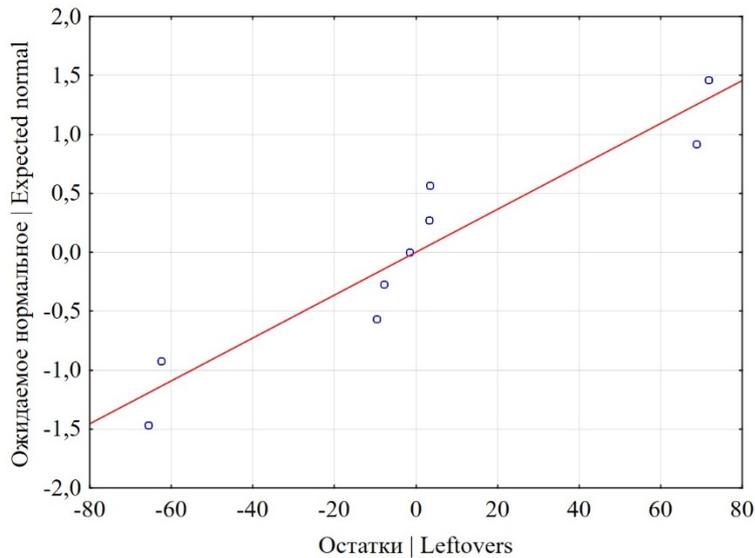


Рисунок 3. Нормальный вероятностный график остатков удельного сцепления фиброцементогрунт в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 3. Normal probability graph of the residual specific cohesion of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

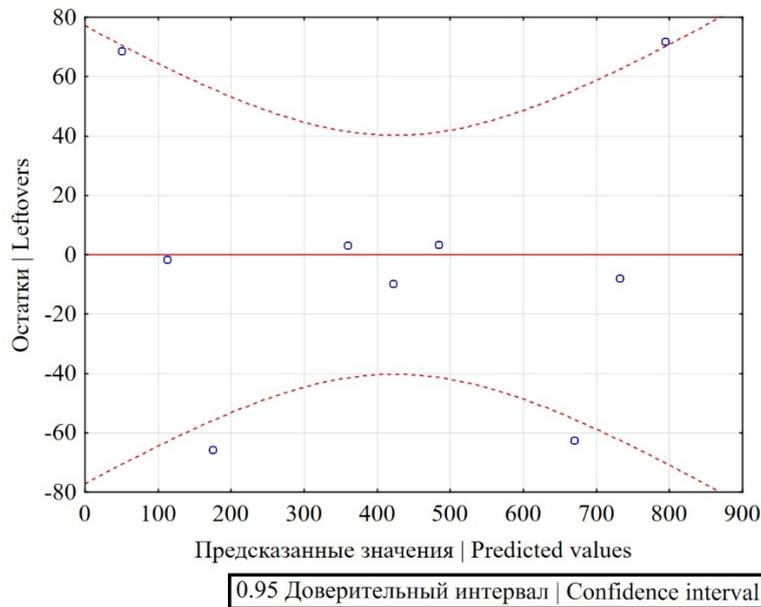


Рисунок 4. Диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 4. Scatter plot of predicted values and residuals of specific cohesion of fiber cement soil as a function of Portland cement and fiber content at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Согласно полученным экспериментальным данным, образцы с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна имеют показатель удельного сцепления 108,7 кПа, что на 8 % меньше, чем у аналогичных образцов без фиброволокна. При содержании 4 % портландцемента, показатель удельного сцепления образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 487,70 кПа, что на 34 % больше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 6 % портландцемента, показатель удельного сцепления образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 866,0 кПа, что на 43 % больше, чем у образцов без фиброволокна.

На основании DOE получено уравнение регрессии

$$\varphi(X) = 15,8735 + 2,3529X_1 - 1,6952X_2 - 0,1223X_1^2 + 0,3669X_1X_2 + 0,2986X_2^2 \quad (2)$$

где $\varphi(X)$ – угол внутреннего трения, градусы (°);

X_1 – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

X_2 – содержание фиброволокна базальтового, % от массы сухого грунта

адекватно (критерий адекватности Фишера = 107,869565, $p = 0,000016$) описывающее экспериментальные данные угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды (рис. 5).

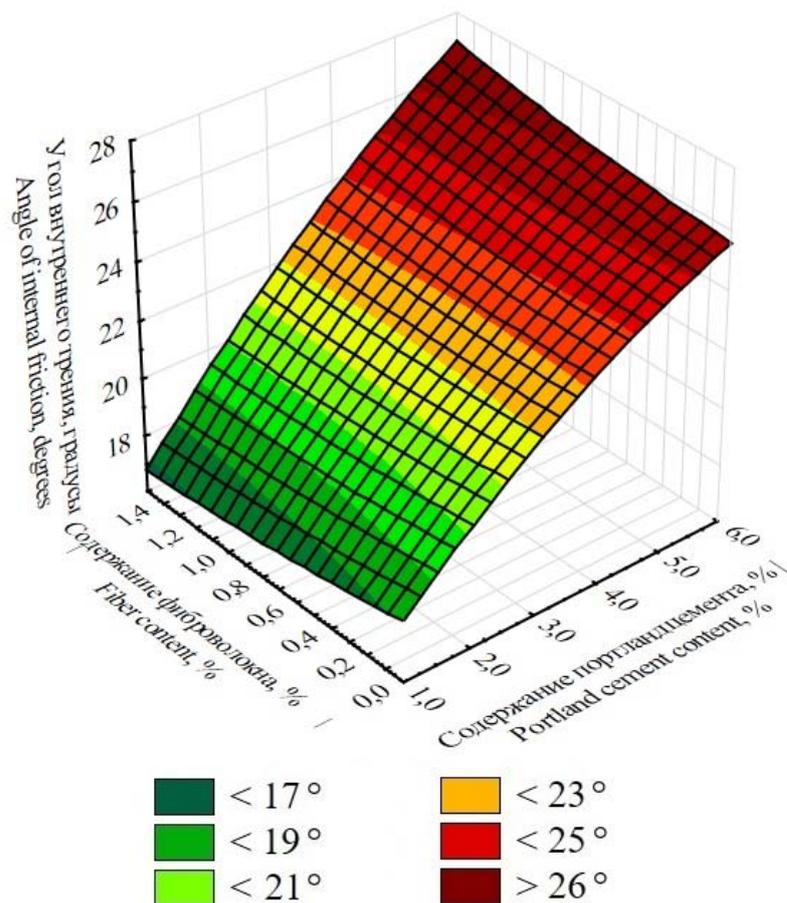


Рисунок 5. Поверхность отклика угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 5. Response surface of the angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Нормальный вероятностный график остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды свидетельствует, что остатки достаточно хорошо ложатся на нормальную прямую (рис. 6). На диаграмме рассеяния предсказанных значений и остатков (рис. 7) нет резко выделяющихся остатков.

Оценка адекватности модели (2) с помощью остатков свидетельствует о том, что модель угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды адекватно описывает данные эксперимента.

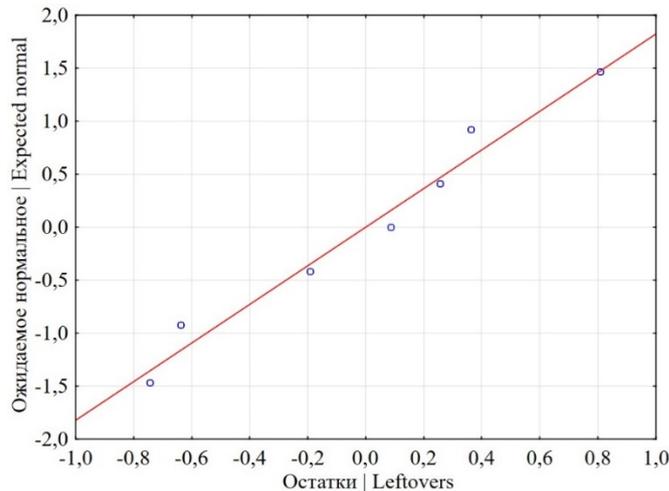


Рисунок 6. Нормальный вероятностный график остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды
Figure 6. Normal probability graph of the residual angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

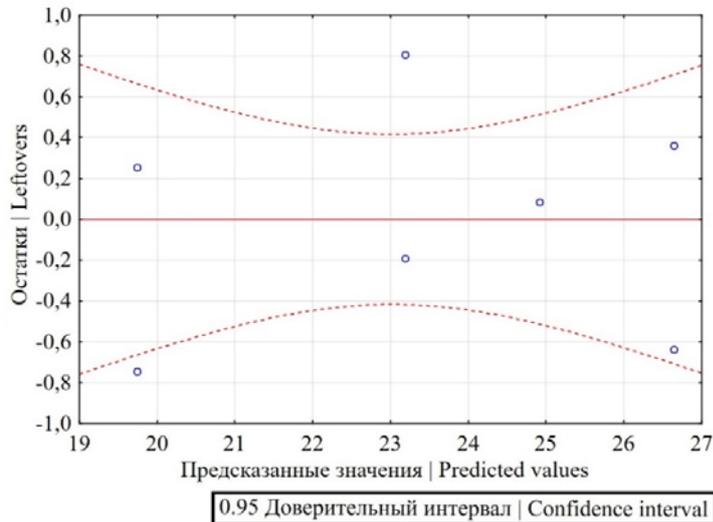


Рисунок 7. Диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 7. Scatter diagram of predicted values and residuals of the angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Согласно полученным экспериментальным данным, образцы с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна имеют показатель угла внутреннего трения 19° , что на 1° меньше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 4 % портландцемента, показатель угла внутреннего трения образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 24° , что на 1° больше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 6 % портландцемента, показатель угла внутреннего трения образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 27° , что на 2° больше, чем у образцов без фиброволокна.

Обсуждение

В результате исследований установлено, что в зависимости от содержания портландцемента добавка фибры на основе базальтовых волокон в составе фиброцементогрунта влияет на структурные прочностные характеристики: удельное сцепление и угол внутреннего трения. Полученные зависимости структурных прочностных показателей позволили установить, что увеличение от 0 % до 1,5 % добавки фиброволокна повышает значения удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтовых образцов при содержании более 2 % портландцемента.

При содержании менее 2 % портландцемента добавка фиброволокна приводит к уменьшению удельного сцепления и угла внутреннего трения. Данное обстоятельство объясняется, тем, что при незначительном содержании портландцемента происходит слабое развитие кристаллизационной структуры фиброцементогрунта. В данных условиях волокна фибры не удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы и не воспринимают внешние нагрузки за счет осевого растяжения, при этом нарушая однородность кристаллизационной структуры укрепленного грунта. Поэтому при содержании менее 2 % портландцемента, добавка волокон фибры оказывает отрицательный эффект на прочностные показатели фиброцементогрунта.

При увеличении содержания более 2 % портландцемента, эффективность добавки фиброволокна возрастает с повышением количества минерального вяжущего, поскольку фибра, удерживаясь в цементогрунтовой матрице (рис. 8), воспринимает внешние нагрузки и таким образом увеличивает

структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта.

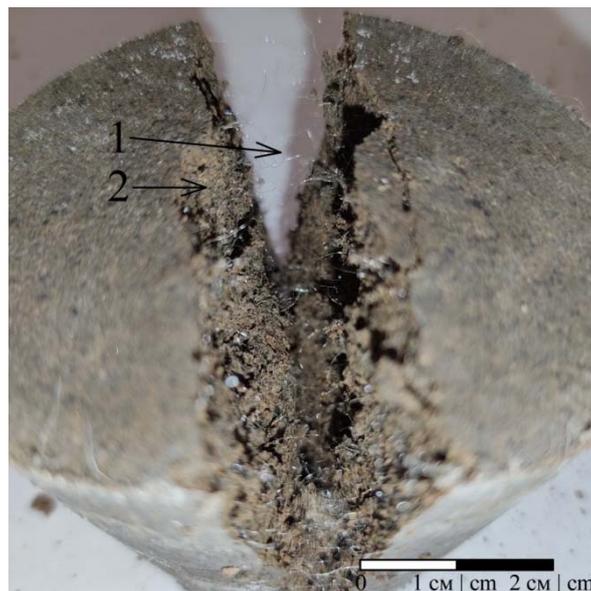


Рисунок 8. Макроструктура фиброцементогрунта с содержанием портландцемента 6 % и фиброволокна 1,5 % от массы сухого грунта:

1 – фиброволокно ; 2 – цементогрунтовая матрица

Figure 8. Macrostructure of fiber cement soil containing 6% Portland cement and 1.5% fiber by weight of dry soil: 1 – fiber; 2 – cement-soil matrix

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Полученные закономерности соответствуют результатам, представленным в исследовании [12] эффективности дисперсного армирования фибры на основе полипропиленовых волокон по показателю прочности фиброцементогрунта на сдвиг. Прочность на сдвиг фиброцементогрунтов на основе полипропиленовой фибры увеличилась до 900% относительно цементогрунтов без добавки фибры. Кроме того, прочность фиброцементогрунтов с добавкой 0,2 % полипропиленового волокна и 1 % портландцемента соответствует цементогрунту с добавкой 5 % портландцемента.

Аналогично, в исследовании [17] установлено увеличение предела прочности на изгиб у фиброцементогрунтов на основе полипропиленовой фибры по сравнению с образцами без фибры. Оптимальный прирост прочности на изгиб 6450 кПа зафиксирован при содержании фиброволокна 0,75 %. В исследовании [11] показано увеличение предела

прочности при сжатии на 279 % и модуля упругости на 113,6 % у грунта, армированного волокнами полипропиленовой фибры.

Таким образом, дисперсное армирование волокнами фибры позволяет улучшить структурную прочность и физико-механические характеристики укрепленных грунтов. При этом, вид фиброволокна (базальтовое, полипропиленовое и т.д.), а также его характеристики: длина, форма, диаметр волокон, влияют на его оптимальное содержание в фиброцементогрунтовой смеси для улучшения процессов структурообразования и характеристик структурной прочности укрепленного грунта.

Повышенные показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунта позволяют обеспечить дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог высокий модуль упругости и трещиностойкость в условиях слабых и переувлажненных оснований [19, 24]. Это способствует увеличению срока службы лесовозных автомобильных дорог, эксплуатирующихся в сложных природных условиях и при высоких транспортных нагрузках.

Показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтов являются необходимыми для моделирования и расчета прочности конструкций дорожных одежд методом конечных элементов. Поэтому, основываясь на достигнутых результатах, целесообразны дальнейшие исследования прочностных и деформационных показателей конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта с учетом

нагрузок от лесотранспорта и сложных природных условий лесной зоны.

Заключение

Проведенные исследования позволили получить фактические показатели и уравнения регрессии изменения удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтов различного состава, которые необходимы для моделирования и расчета прочностных и деформационных показателей конструкций дорожных одежд.

Определены структурные прочностные характеристики и установлено, что добавка базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунта при оптимальной влажности влияет при уровне значимости $p = 0,000026$ на угол внутреннего трения и при $p = 0,000016$ на удельный коэффициент сцепления в зависимости от содержания портландцемента.

При содержании 2 % портландцемента, добавка 1,5% базальтового фиброволокна снижает удельный коэффициент сцепления на 8 % (10 кПа) и угол внутреннего трения на 1° , в силу недостаточного развития цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунта. При содержании 6 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна увеличивает коэффициент сцепления на 43 % (258,7 кПа) и угол внутреннего трения на 2° , в связи с удержанием в цементогрунтовой матрице и восприятием внешних нагрузок за счет своего осевого растяжения.

Список литературы

1. Восканянц, К. Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства. Научные исследования. 2018; 6: 23-25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35128618>.
2. Катаров, В. К. Ресурсосберегающая методика расчета дорожных одежд лесовозных дорог. Resources and technology. 2020; 1: 1-13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42899012>.
3. Коновалова Н. А., Дабижа О. Н., Панков П. П., Руш Е. А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов. Экология и промышленность России. 2019; 11: 32-37. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41321614>.
4. Мохирев, А. П. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог / А. П. Мохирев, С. О. Медведев, О. Н. Смолина // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – № 3 (35). – С. 103–113. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40824797>.

5. Степанец В. Г., Герасимова С. А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозоустойчивости. Молодой ученый. 2020; 22 (312): 148-154. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42932994>.
6. Чернышова Е. В., Скрыпников А. В., Самцов В. В., Абасов М. А. Лесовозные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019; 2 (368): 95-101. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37320551>.
7. Чудинов, С. А. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». Фиброцементогрунтовая смесь. Патент 2785742 Российская Федерация, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20; Заявл. 05.03.2022; Опубл. 12.12.2022. – 9 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49994489>.
8. Чудинов, С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса : моногр. / С. А. Чудинов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. – 164 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53667094>.
9. Чудинов, С. А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог : моногр. / С. А. Чудинов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 174 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42927809>.
10. Чудинов С. А., Черняк Р. Д., Дмитриев В. Н., Байц О. Н. Опытнo-производственные исследования применения золошлаковых отходов в дорожном строительстве. Дороги и мосты. 2022. 2 (48): 254-273. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855844>.
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M. F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. Geomech Eng. 2020. 22: 227–236. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
12. Ayeledeen 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: 1873–1885. <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>.
13. Cho Y. K., Jung S. H., Choi Y. C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. Constr Build Mater. 2019. 204: 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.208>.
14. 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: 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012010>.
15. 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: 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012007>.
16. De Jesús Arrieta Baldovino J., Dos Santos Izzo R., Rose J. L., Avanci M. A. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization. Geotechn Geolog Eng. 2020. 38(4): 4013–4031. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. Soils Found. 2019. 59: 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>.
18. Ghanizadeh A. R., Salehi M., Jalali F. Investigating the effect of lime stabilization of subgrade on the fatigue & rutting lives of flexible pavements using the nonlinear mechanistic-empirical analysis. Geotech Geol Eng. 2022. 41: 1287-1307. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02336-x>.
19. Ghorbani A., Hasanzadehshooiili H. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. Soils Found. 2018. 58: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002>.
20. Godoy V. B., Tomasi L. F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl. Geotech Geol Eng. 2023. 3: 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>.

21. Gong Y., He Y., Han C. et al. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles. *Adv Mater Sci Eng*. 2019. 2019: 10. <https://doi.org/10.1155/2019/5725708>.
22. Liu J., Yang K., Gursaud N. Tensile strength of cement-treated champlain sea clay. *Geotech Geol Eng*. 2022. 40: 5467–5480. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02226-2>.
23. 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: 977–993. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1775358>.
24. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay. *Geotech Geol Eng*. 2022. 40: 4095–4107. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02142-5>.
25. Muñoz Y. O., de Almeida J. L., Mora A. J. E. V. et al. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application. *Geotech Geol Eng*. 2023. 41: 2599–2628. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02416-6>.
26. 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: 626–642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>.
27. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. et al. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabiro tuba formation. *Transp Geotech*. 2021. 31: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.
28. Shen D., Liu X., Zeng X. et al. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. *Constr Build Mater*. 2020. 244: 117874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>.
29. Tiwari N., Satyam N., Singh K. Effect of curing on micro-physical performance of polypropylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles. *Sci Rep*. 2020. 10: 6724. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>.
30. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil. A review. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20: 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>.
31. Wei H., Zhang Y., Cui J. et al. Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material. *Constr Build Mater* 2019. 196:204–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.060>.
32. Yadav J. S., Tiwari S. K., Shekhawat P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres. *Transp Infrastruct Geotechnol* 2018. 5:191–209. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>.
33. Zainorabidin A., Agustina D. H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *Matec Web of Conferences*. 2018. 195: 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>.
34. Zentar R., Wang H., Wang D. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. *Constr Build Mater*. 2021. 279: 122447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122447>.

References

1. Voskanyants K. E. Razrabotka sostavov i tekhnologij ukrepleniya i stabilizacii gruntov dlya avtodorozhnogo stroitel'stva [Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction]. *Nauchnye issledovaniya = Scientific research*. 2018; 6: 23-25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35128618>.
2. Katarov V. K. Resursosberegayushchaya metodika rascheta dorozhnyh odezhd lesovoznyh dorog [Resource-saving methodology for calculating road pavements for logging roads] *Resources and technology*. 2020; 1: 1-13. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42899012>.

3. Konovalova N. A., Dabizha O. N., Pankov P. P., Rush E. A. Utilizaciya gidroliznogo lignina v sostavah cementogrunтов [Utilization of hydrolytic lignin in the composition of cement soils]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2019; 11: 32-37. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41321614>.
4. Mokhirev A. P., Medvedev S. O., Smolina O. N. Faktory, vliyayushchie na propusknyuyu sposobnost' lesovoznyh dorog [Factors influencing the capacity of logging roads]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering journal. 2019; 3 (35): 103-113. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40824797>.
5. Stepanets V. G., Gerasimova S. A. Osnovaniya dorozhnyh odezhd iz ukreplennyh grunтов povyshennoj prochnosti i morozoustojchivosti [Pavement bases from reinforced soils of increased strength and frost resistance]. *Molodoy uchenyj* = Young scientist. 2020. 22 (312): 148-154. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42932994>.
6. Chernyshova E. V., Skrypnikov A. V., Samtsov V. V., Abasov M. A. Lesovoznyye dorogi v transportnoj seti lesopromyshlennogo predpriyatiya [Timber roads in the transport network of a timber industry enterprise]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal. 2019; 2 (368): 148-154. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37320551>.
7. Chudinov S. A. Fibrocementogrunтовaya smes' [Fiber cement soil mixture]. Patent RF, no. RU 2 785 742 C1, 2022. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49994489>.
8. Chudinov S. A. Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya grunтов v stroitel'stve avtomobil'nyh dorog lesnogo kompleksa [Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex]: Monografiya = Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2022: 164 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53667094>.
9. Chudinov S. A. Ukreplennyye grunты v stroitel'stve lesovoznyh avtomobil'nyh dorog [Reinforced soils in the construction of logging roads]: Monografiya = Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2020: 174 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42927809>.
10. Chudinov S. A., Chernyak R. D., Dmitriev V. N., Bajz O. N. Opytno-proizvodstvennyye issledovaniya primeneniya zoloshlakovyh othodov v dorozhnom stroitel'stve [Pilot research on the use of ash and slag waste in road construction]. *Dorogi i mosty* = Roads and bridges. 2022. 2 (48): 254-273. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855844>
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M. F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. *Geomech Eng.* 2020. 22: 227–236. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
12. 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: 1873–1885. <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>.
13. Cho Y. K., Jung S. H., Choi Y. C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Constr Build Mater.* 2019. 204: 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.208>.
14. 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: 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012010>.
15. 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: 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012007>.
16. De Jesús Arrieta Baldovino J., Dos Santos Izzo R., Rose J. L., Avanci M. A. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization. *Geotechn Geolog Eng.* 2020. 38(4): 4013–4031. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. *Soils Found.* 2019. 59: 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>.

18. Ghanizadeh A. R., Salehi M., Jalali F. Investigating the effect of lime stabilization of subgrade on the fatigue & rutting lives of flexible pavements using the nonlinear mechanistic-empirical analysis. *Geotech Geol Eng.* 2022. 41: 1287-1307. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02336-x>.
19. Ghorbani A., Hasanzadehshooili H. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. *Soils Found.* 2018. 58: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002>.
20. Godoy V. B., Tomasi L. F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl. *Geotech Geol Eng.* 2023. 3: 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>.
21. Gong Y., He Y., Han C. et al. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles. *Adv Mater Sci Eng.* 2019. 2019: 10. <https://doi.org/10.1155/2019/5725708>.
22. Liu J., Yang K., Gursaud N. Tensile strength of cement-treated champlain sea clay. *Geotech Geol Eng.* 2022. 40: 5467–5480. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02226-2>.
23. 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: 977–993. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1775358>.
24. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay. *Geotech Geol Eng.* 2022. 40: 4095–4107. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02142-5>.
25. Muñoz Y. O., de Almeida J. L., Mora A. J. E. V. et al. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application. *Geotech Geol Eng.* 2023. 41: 2599–2628. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02416-6>.
26. 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: 626–642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>.
27. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. et al. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirota formation. *Transp Geotech.* 2021. 31: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.
28. Shen D., Liu X., Zeng X. et al. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. *Constr Build Mater.* 2020. 244: 117874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>.
29. Tiwari N., Satyam N., Singh K. Effect of curing on micro-physical performance of polypropylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles. *Sci Rep.* 2020. 10: 6724 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>.
30. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil. A review. *Environmental Technology & Innovation.* 2020. 20: 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>.
31. Wei H., Zhang Y., Cui J. et al. Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material. *Constr Build Mater* 2019. 196:204–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.060>.
32. 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. 5:191–209. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>.
33. Zainorabidin A., Agustina D. H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *Matec Web of Conferences.* 2018. 195: 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>.
34. Zentar R., Wang H, Wang D. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. *Constr Build Mater.* 2021. 279: 122447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122447>.

Сведения об авторе

✉ *Чудинов Сергей Александрович* – кандидат техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru.

Information about the author

✉ *Sergey A. Chudinov* – PhD (Engineering), Head Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forestry University, Siberian Tract str., 37, Ekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author