



Научная статья

УДК 624.138.232

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-118-127

Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

С.А. Чудинов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188),

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

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; chudinovsa@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 10.08.23 / Одобрена после рецензирования 28.10.23 / Принята к печати 01.11.23

Аннотация. Важнейшим фактором увеличения эффективности освоения лесосырьевых баз является развитие и повышение транспортно-эксплуатационного состояния сети лесовозных автомобильных дорог. Инертные дорожно-строительные материалы: песок, щебень, щебеночно- и гравийно-песчаные смеси – традиционно применяются для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Однако в районах с дефицитом данных материалов стоимость строительства дорог существенно возрастает. Альтернативной технологией, позволяющей существенно сократить либо полностью исключить применение инертных дорожно-строительных материалов, является укрепление местных грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд. Технология укрепления грунтов заключается в их перемешивании с вяжущими веществами и уплотнении при оптимальной влажности смеси, при этом полученный материал приобретает заданные прочность и морозостойкость. Наиболее эффективным и распространенным вяжущим веществом для укрепления грунтов является портландцемент. Однако наряду с высокими прочностными показателями и морозостойкостью цементогрунты в силу кристаллической структуры имеют низкую трещиностойкость, что ухудшает транспортно-эксплуатационные показатели и сокращает срок службы дорожных одежд. В число рациональных решений по повышению надежности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд автомобильных дорог входит устройство фиброцементогрунтовых слоев. Предмет исследования – фиброцементогрунт для строительства конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Цель – улучшение физико-механических показателей и морозостойкости грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой фибры на основе базальтового волокна. Проведены лабораторные испытания прочности на сжатие и на растяжение при раскалывании, а также морозостойкости фиброцементогрунтов различных составов в соответствии с ГОСТ Р 70452–2022. Согласно полученным данным, фиброцементогрунт имеет более высокие прочность и морозостойкость по сравнению с цементогрунтом. Волокна фибры, распределенные в объеме цементогрунтовой матрицы, эффективно воспринимают внешние нагрузки, обеспечивая высокие физико-механические показатели, следовательно, и трещиностойкость, а также морозостойкость материала. При-



менение фиброцементогрунта для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог позволит увеличить долговечность и надежность функционирования таких дорог, снизить издержки на строительство и эксплуатацию дорожно-транспортной инфраструктуры лесосырьевых баз.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги, дорожная одежда, фиброцементогрунт, цементогрунт, укрепленный грунт, трещиностойкость, армирование

Для цитирования: Чудинов С.А. Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 118–127. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-118-127>

Original article

Fiber Cement Soil in the Construction of Pavements for Logging Roads

Sergey A. Chudinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; chudinovsa@m.usfeu.ru

Received on August 10, 2023 / Approved after reviewing on October 28, 2023 / Accepted on November 1, 2023

Abstract. The most important factor in increasing the efficiency of the development of forest tracts is the development and improvement of the transport and operational condition of the network of logging roads. Inert road construction materials, such as sand, crushed stone, crushed stone-sand mixture or gravel-sand mixture, are traditionally used for the construction of pavements for logging roads. However, in the areas with a shortage of these materials, the cost of road construction increases significantly. An alternative technology that can significantly reduce or completely eliminate the use of inert road construction materials is the stabilization of local soils for the construction of pavement structural layers. The soil stabilization technology consists in mixing them with binders and compacting them at the optimal moisture content of the mixture. In doing so, the resulting material acquires the desired strength and frost resistance. The most effective and common binder for soil stabilization is Portland cement. However, along with high strength properties and frost resistance, cement soils, due to their crystalline structure, have low crack resistance, which worsens transport and operational performance and shortens the service life of road pavements. One of the rational solutions for increasing the security of soil stabilization for the construction of road pavements is the installation of fiber cement soil layers. The object of this research is fiber cement soil for the construction of structural layers of road pavements for logging roads. The aim is to improve the physical and mechanical properties and frost resistance of soils stabilized with Portland cement with the addition of the material based on basalt fiber. Laboratory tests of compressive and tensile strength during splitting, as well as frost resistance of fiber cement soils of various compositions were carried out in accordance with GOST R 70452–2022. According to the data obtained, fiber cement soil has higher strength and frost resistance compared to cement soil. The fibers distributed throughout the cement-soil matrix effectively perceive external loads, providing high physical and mechanical indicators, and therefore crack and frost resistance of the material. The use of fiber cement soil for the construction of pavements for logging roads will increase the durability and reliability of

their operation, as well as reduce the costs of construction and operation of road transport infrastructure of forest tracts.

Keywords: logging automobile roads, road pavement, fiber cement soil, cement soil, stabilized soil, crack resistance, reinforcement

For citation: Chudinov S.A. Fiber Cement Soil in the Construction of Pavements for Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 118–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-118-127>

Введение

На территории Российской Федерации функционирует около 1,8 млн км лесовозных автомобильных дорог, 49,6 % которых – постоянного действия. Устойчивое развитие транспортной инфраструктуры служит одним из ключевых факторов эффективного освоения лесосырьевых баз. Для этого лесовозные автомобильные дороги постоянного действия с твердым покрытием должны обеспечивать нормативные транспортно-эксплуатационные показатели покрытия и заданный срок службы дорожной одежды при минимальных затратах на строительство и эксплуатацию [9, 13].

Наиболее распространенными дорожно-строительными материалами для устройства дорожных одежд автомобильных дорог являются инертные материалы, такие как щебень, песок, щебеночно- и гравийно-песчаные смеси. Преимущество данных материалов – их технологичность, требующая применения стандартного набора дорожно-строительной техники. Однако территории лесосырьевых баз, как правило, значительно удалены от мест производства и добычи инертных материалов, что приводит к увеличению дальности и удорожанию их транспортировки [6, 15]. В описанных условиях стоимость строительства лесовозных автомобильных дорог из инертных материалов оказывается значительной, что приводит к сокращению протяженности объектов строительства или полному отказу от устройства твердых покрытий и дальнейшей эксплуатации грунтовых дорог [1, 4]. В связи с этим важен поиск технологий, позволяющих строить лесовозные автомобильные дороги с твердым покрытием при минимальных объемах инертных материалов либо без их применения.

Одной из таких технологий является строительство дорожных одежд из местных грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами. Технология заключается в перемешивании грунтов с вяжущими материалами и уплотнении смеси при оптимальной влажности. При этом приготовление смеси может осуществляться на месте выполнения дорожно-строительных работ с помощью горизонтальных смесителей или на стационарных смесительных установках [7, 12, 17].

В качестве наиболее распространенного неорганического вяжущего вещества, используемого для укрепления грунтов, выступает портландцемент. Он позволяет создавать прочную кристаллическую структуру цементогрунта, обеспечивающую при оптимальном составе смеси заданные ГОСТ Р 70452–2022 прочность и морозостойкость. Однако в силу кристаллической структуры цементогрунтовой матрицы конструктивные слои дорожных одежд из данного материала имеют низкую трещиностойкость, что проявляется в виде

поперечных и продольных трещин [10, 11, 19, 20]. Трещины на покрытии не только снижают транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных автомобильных дорог, но и сокращают срок службы дорожной одежды в целом, становясь очагами образования на покрытии повреждений (выбоин) и других дефектов. В связи с этим актуальным является совершенствование составов цементогрунтовых смесей для обеспечения не только высоких прочности и морозостойкости цементогрунтов, но и хорошей трещиностойкости [2, 3, 5, 14, 16, 18, 21–25].

Одно из эффективных решений проблемы повышения трещиностойкости цементогрунтов – технология дисперсного армирования цементогрунтовых смесей добавками фибры и получения таким образом фиброцементогрунтовых смесей [8].

Для укрепления цементогрунтовой смеси возможно применять базальтовые волокна (побочный продукт производства базальтовых теплоизоляционных плит), обладающие повышенными прочностью, морозо- и трещиностойкостью.

Цель исследования – разработка оптимальных составов фиброцементогрунтовых смесей на основе базальтовых волокон для применения при устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Объекты и методы исследования

Фиброцементогрунт – это искусственный строительный композиционный материал, полученный в результате приготовления и уплотнения подобранной в необходимых соотношениях специальной смеси цемента, фиброволокон, грунта и воды (фиброцементогрунтовой смеси).

Благодаря распределенным по всему объему фиброволокнам происходит дисперсное армирование фиброцементогрунтовой смеси. В процессе кристаллообразования цемента фиброволокна прочно удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы и воспринимают за счет осевого растяжения внешние нагрузки, воздействующие на фиброцементогрунт. Тем самым значительно увеличиваются прочность фиброцементогрунта на сжатие и в особенности на растяжение при раскалывании, как следствие – возрастает трещиностойкость материала, что улучшает транспортно-эксплуатационные показатели фиброцементогрунтовых дорожных одежд и существенно повышает срок службы лесовозных автомобильных дорог.

Для проведения исследования использовались базальтовые волокна – отходы производства базальтовых теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области. Исходным сырьем для производства базальтовых теплоизоляционных плит являются горные породы базальтовой группы. Технологический процесс получения теплоизоляционных плит заключается в расплавлении сырья, извлечении базальтовых волокон, формовании минераловатного ковра, термообработке, резке и упаковке продукции. На различных стадиях изготовления теплоизоляционных плит образуются отходы в виде базальтовых волокон, которые можно применять в качестве добавки для производства фиброцементогрунта.

Базальтовые волокна являются биологически неактивными, имеют высокую прочность на растяжение – 2100 МПа, химическую стойкость в кислотно-щелочных средах, устойчивы к высоким температурам и огню. За счет этих свойств базальтовые волокна можно эффективно использовать при получении фиброцементогрунтовых смесей.

В состав фиброцементогрунтовых смесей также входили портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108–2020, вода по ГОСТ 51232–98 и грунт – суглинок тяжелый песчанистый, имеющий следующие характеристики:

| | |
|--|------|
| Удельный вес, т/м ³ | 1,48 |
| Влажность на границе текучести, % по массе..... | 26 |
| Влажность на границе раскатывания, % по массе..... | 13 |
| Число пластичности..... | 13 |
| Оптимальная влажность, % по массе..... | 15 |
| pH..... | 6,5 |
| Содержание гумусовых веществ, % по массе..... | 1,8 |

Для исследования были приготовлены серии образцов фиброцементогрунтовой смеси различных составов (см. таблицу).

Составы фиброцементогрунтовых смесей
The compositions of fiber cement soil mixtures

| Компонент состава | Доля компонента в составе смеси (% от массы сухого грунта) для серии образцов | | | | | | |
|--------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| ЦЕМ II/В-И 32,5Б | 8 | | | | | | |
| Базальтовое фиброволокно | 0 | 0,1 | 0,5 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |
| Вода | 15 | | | | | | |

Изготовление образцов для проведения испытаний и лабораторные исследования прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и морозостойкости фиброцементогрунтов различных составов выполнены в соответствии с ГОСТ Р 70452–2022 при сроке набора прочности 28 сут. и полном водонасыщении. Коэффициент морозостойкости определялся при 25 циклах замораживания–оттаивания.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании результатов оценки прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в зависимости от содержания фиброволокна (рис. 1), оптимальное содержание базальтовых волокон составило 3,5 % от массы сухого грунта. Прочность на сжатие фиброцементогрунтовых образцов с добавкой 3,5 % фиброволокон от массы сухого грунта возросла на 15,6 % по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки.

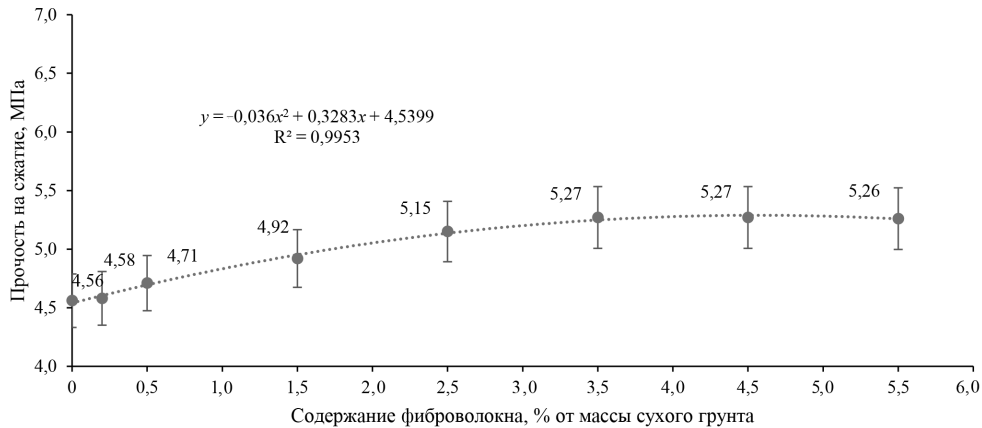


Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 1. The dependence of the compressive strength of fiber cement soil samples on the fiber content

Исследование прочности на растяжение при раскалывании также показало, что оптимальное содержание базальтовых волокон – 3,5 % от массы сухого грунта (рис. 2). Прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов с добавкой такого количества фиброволокна возросла на 18,9 % по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки.

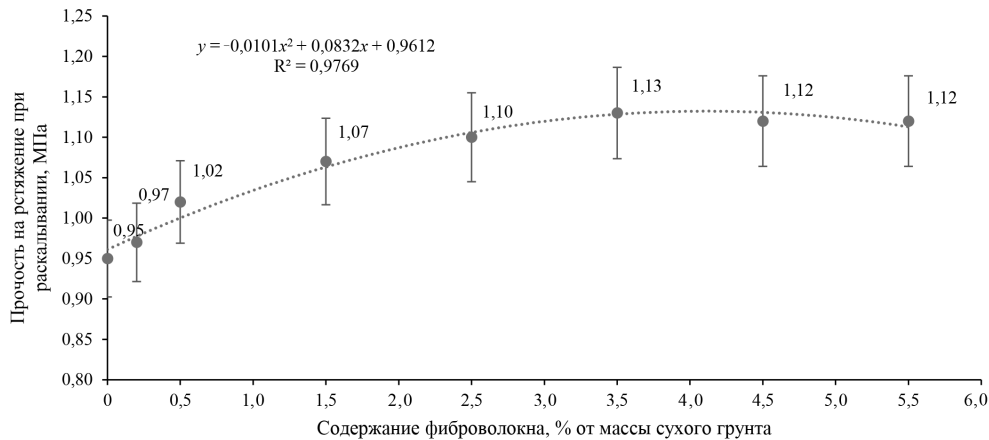


Рис. 2. Зависимость прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 2. The dependence of the tensile strength during splitting of fiber cement soil samples on the fiber content

На основании результатов изучения морозостойкости фиброцементогрунтовых образцов в зависимости от содержания фиброволокна (рис. 3), нормативное значение коэффициента морозостойкости (не менее 0,8) наблюдается при содержании фиброволокна не менее 3,5 % от массы сухого грунта. Максимальное значение коэффициента морозостойкости 0,81 заре-

гистрировано при содержании фиброволокна 3,5 % от массы сухого грунта, и оно на 20,9 % выше по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки фиброволокна.

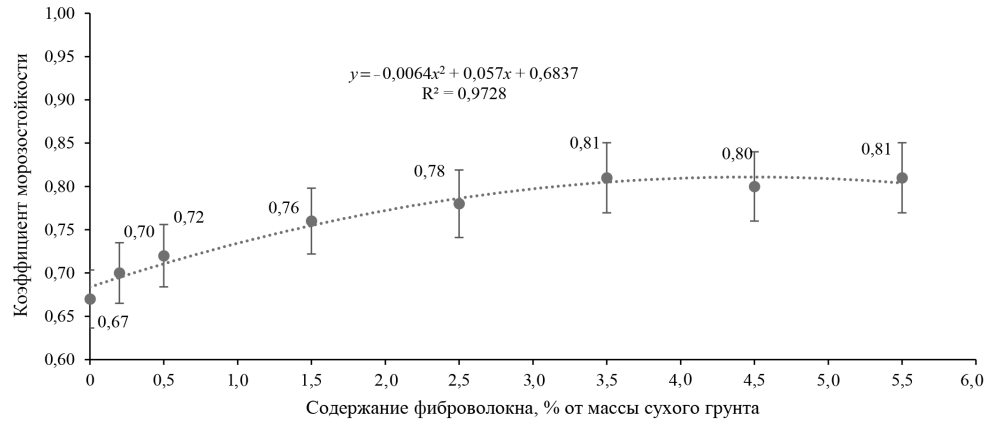


Рис. 3. Зависимость коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 3. The dependence of the frost resistance coefficient of fiber cement soil samples on the fiber content

Данные, полученные в ходе исследования прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и морозостойкости фиброцементогрунта, подтверждают эффективность использования добавки фибры на основе базальтовых волокон для дисперсного армирования цементогрунта. Волокна фибры, удерживаясь в объеме цементогрунтовой матрицы, воспринимают воздействующие на материал нагрузки и значительно увеличивают его прочность и морозостойкость. Высокая прочность на растяжение при раскалывании свидетельствует о возросшей трещиностойкости фиброцементогрунтов.

Для достижения максимальных прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунта оптимальным содержанием добавки фибры на основе базальтовых волокон является 3,5 % от массы сухого грунта.

На основании прочностных показателей цементогрунт без добавки фибры можно отнести к марке М40 А, однако коэффициент морозостойкости – ниже норматива. При этом фиброцементогрунт на основе базальтовых волокон аналогичного состава, имея ту же марку, характеризуется нормативным значением коэффициента морозостойкости – 0,81 и может применяться в верхних слоях основания дорожных одежд капитального типа в условиях II дорожно-климатической зоны.

Выводы

1. Волокна фибры в составе фиброцементогрунта выполняют функцию дисперсного армирования и способствуют значительному росту прочности, морозо- и трещиностойкости материала, что позволяет увеличить срок службы и транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных дорог, расположенных в сложных природных условиях и характеризующихся высокими транспортными нагрузками.

2. Фиброцементогрунт с добавкой фибры на основе базальтовых волокон имеет более высокие прочность на сжатие – на 15,6 %, прочность на растяжение при раскалывании – на 18,9 % и коэффициент морозостойкости – на 20,9 %, чем аналогичный по составу цементогрунт без добавки фибры.

3. Оптимальное содержание фибры на основе базальтовых волокон в фиброцементогрунтовой смеси, позволяющее достичь максимальных прочности и морозостойкости фиброцементогрунтов, составляет 3,5 % от массы сухого грунта.

4. Фиброцементогрунт на основе тяжелого песчанистого суглинка с добавкой 8 % портландцемента и 3,5 % базальтового волокна имеет марку М40 А и коэффициент морозостойкости, соответствующий нормативному значению, и может применяться в верхних слоях основания дорожных одежд капитального типа в условиях II дорожно-климатической зоны. Это позволит осуществлять строительство лесовозных автомобильных дорог в отдаленных районах лесосырьевых баз без использования инертных материалов, что даст возможность снизить издержки на строительство и эксплуатацию лесовозной дорожно-транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бавбель Е.И., Игнатенко В.В., Науменко А.И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2016. № 2(184). С. 58–60.

Bavbel J.I., Ignatenko V.V., Naumenko A.I. The Design and Method of Calculation of Pavement of Reinforced Soil. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2016, no. 2(184), pp. 58–60. (In Russ.).

2. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Исследование долговечности модифицированного цементогрунта дорожного назначения // Пром. и гражд. стр-во. 2014. № 11. С. 76–79.

Vdovin E.A., Mavliev L.F. Research in Durability of Modified Soil Cement of Road Purpose. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2014, no. 11, pp. 76–79. (In Russ.).

3. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Науч. исслед. 2018. № 6(26). С. 23–25.

Voskanyants K.E. Development of the Compositions and Technologies of the Soils Strengthening and Stabilization for Road Construction. *Nauchnye issledovaniya = Scientific Research*, 2018, no. 6(26), pp. 23–25. (In Russ.).

4. Голубева Е.А., Плахотный А.Б. Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе «Амур» // Техника и технологии стр-ва. 2017. № 3(11). С. 45–49.

Golubeva E.A., Plakhotny A.B. Practice of the Use of Road Polymer Cement Soil on the Federal Highway “Amur”. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2017, no. 3(11), pp. 45–49. (In Russ.).

5. Коновалова Н.А., Дабижжа О.Н., Панков П.П., Руш Е.А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов // Экология и пром-сть России. 2019. Т. 23, № 11. С. 32–37.

Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P., Rush E.A. Utilization of Hidrolysis Lignin in Compositions Soil-Cements. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 11, pp. 32–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-32-37>

6. Лыщик П.А., Плышевский С.В., Науменко А.И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2013. № 2(158). С. 39–42.

Lyshchik P.A., Plyshevskiy S.V., Naumenko A.I. The Use of a Complex Binder to Strengthen the Soils of Forest Road Subgrades. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2013, no. 2(158), pp. 39–42. (In Russ.).

7. Ольховиков В.М. Строительство дорожных одежд низкой стоимости с основаниями из укрепленных грунтов и тонкослойными покрытиями. М.: Информавтдор, 2003. 84 с.

Olkhovikov V.M. *Construction of Low-Cost Road Pavements with Reinforced Soil Bases and Thin-Layer Pavements*. Moscow, Informavtodor Publ., 2003. 84 p. (In Russ.).

8. Патент 2785742 С1 РФ, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20. Фиброцементогрунтовая смесь: № 2022105876: заявл. 05.03.2022: опубл. 12.12.2022 / С.А. Чудинов.

Chudinov S.A. *Fiber Cement Soil Mixture*. Patent RF, no. RU 2785742 C1, 2022. (In Russ.).

9. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Исследование отходов промышленности для укрепления грунтов // Фундам. исслед. 2016. № 12-1. С. 102–106.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Logoyda V.S. Study of Waste Industry for Strengthening Soil. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2016, iss. 12-1, pp. 102–106. (In Russ.).

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

Stepanets V.G., Gerasimova S.A. Road Pavement Bases Made of Reinforced Soils of Increased Strength and Frost Resistance. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*, 2020, no. 22(312), pp. 148–154. (In Russ.).

11. Федькин А.С. Экспериментальные лабораторные исследования композиционного материала на основе грунта и минерального вяжущего для укрепления грунтов лесных дорог // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2012. № 2. С. 89–92.

Fed'kin A.S. Experimental Laboratory Studies of a Composite Material Based on Soil and Mineral Binder for Strengthening the Soils of Forest Roads. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2012, no. 2, pp. 89–92. (In Russ.).

12. Чудинов С.А. Производственные испытания грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита // Изв. вузов. Лесн. журн. 2011. № 6. С. 58–61.

Chudinov S.A. In-Process Testing of the Grounds Reinforced with Portland Cement Containing Polyelectrolyte Additive. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2011, no. 6, pp. 58–61. (In Russ.).

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

Chudinov S.A. *Reinforced Soils in the Construction of Logging Roads*: Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 174 p. (In Russ.).

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

Chudinov S.A. *Improving the Technology of Soil Stabilization in the Construction of Roads of the Forestry Complex*: Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.).

15. Чудинов С.А., Булдаков С.И. Теоретические исследования процессов структурообразования глинистых грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 5. С. 82–88.

Chudinov S.A., Buldakov S.I. Theoretical Research of Structure Formation Processes of Clay Soils Stabilized by Portland Cement with Polyelectrolyte Additive. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 5, pp. 82–88. (In Russ.).

16. Beeghly J., Schröck M. Dredge Material Stabilization Using the Pozzolanic or Sulfo-Pozzolanic Reaction of Lime By-Products to Make an Engineered Structural Fill. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, vol. 3, iss. 1, art. no. 6. Available at: <https://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss1/6/> (accessed: 21.03.24).

17. Brockenbrough R.L. *Highway Engineering Handbook*. New-York, McGraw-Hill, 2009. 885 p.

18. Jones C. Soil Consolidation and Strengthening Using Electrokinetic Geosynthetics – Concepts and Analysis. *Geosynthetics*, 2006, pp. 411–414.

19. Khan M.A., Usmani A., Shah S.S., Abbas H. A Study of Multilayer Soil-Fly Ash Layered System under Cyclic Loading. *International Journal of Civil Engineering*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 73–89.

20. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes. *ZKG: Zement-Kalk-Gips International*, 2016, no. 9(69), pp. 49–54.

21. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soil. *Construction and Building Materials*, 2004, vol. 18, pp. 263–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003>

22. Sabri I.L.M. Study on the Impact of Moisture Content on Subgrade Strength. *5th International Symposium 2015 – IntSym 2015, SEUSL*. Sri Lanka, SEUSL Publ., 2015, pp. 71–76.

23. Salour F., Erlingsson S. Permanent Deformation Characteristics of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, vol. 18, iss. 3, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1065991>

24. Vijayan D.S. Effect of Solid Waste Based Stabilizing Material for Strengthening of Expansive Soil – A Review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, vol. 20, art. no. 101108. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>

25. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of Moisture Content of Cohesive Subgrade Soil. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 195, art. no. 03010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest