

Регенерация цементогрунтовых слоев конструкций рекультивируемых 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

Эффективность освоения лесосырьевых баз зависит от развития и транспортно-эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог. Одной из главных проблем строительства автомобильных дорог в лесной зоне является недостаток основных дорожно-строительных инертных материалов — песка, щебеночно-песчаных смесей, щебня, что значительно удорожает стоимость и увеличивает сроки работ. В данных условиях применение технологии строительства дорожных одежд из местных укрепленных грунтов позволяет частично или полностью избавиться от необходимости использования инертных дорожно-строительных материалов и таким образом существенно снизить стоимость и увеличить скорость строительно-монтажных работ. После освоения лесных участков временные лесовозные дороги подлежат рекультивации. При этом цементогрунтовые слои дорожных одежд целесообразно повторно использовать в качестве дорожно-строительного материала. В статье представлен способ повторного использования цементогрунтовых слоев рекультивируемых конструкций дорожных одежд для устройства новых лесовозных автомобильных дорог. Проведено исследование физико-механических свойств регенерируемой грунтовой смеси на основе гранулята, полученного после фрезерования цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных автомобильных дорог. На основании результатов лабораторных испытаний прочности на сжатие, прочности на растяжение при раскалывании и коэффициента морозостойкости регенерируемой грунтовой смеси различных составов доказана возможность использования и получены оптимальные составы смеси цементогрунтового гранулята совместно с добавками портландцемента, золы-уноса ГРЭС, местных грунтов и воды для устройства слоев оснований и покрытий дорожных одежд. В целях повышения трещиностойкости регенерируемой грунтовой смеси предложено использование добавок фибры. Установлено увеличение физико-механических показателей регенерируемой грунтовой смеси с добавкой фибры на основе базальтового волокна и золы-уноса ГРЭС. Доказана эффективность применения добавок фибры и золы-уноса ГРЭС в составе регенерируемой грунтовой смеси для устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога; рекультивация; регенерируемая грунтовая смесь; цементогрунт; фиброцементогрунт.

Regeneration of cement-ground layers of structures of recultivated 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

The efficiency of the development of forest resource bases depends on the development and transport and operational condition of logging roads. One of the main problems of highway construction in the forest zone is the lack of basic road construction inert materials such as sand, crushed stone-sand mixtures, crushed stone, which significantly increases the cost and increases the time of work. Under these conditions, the use of technology for the construction of road coverings from local reinforced soils makes it possible to partially or completely eliminate the need to use inert road construction materials, and, thus, significantly reduce the cost and increase the speed of construction and installation work. After the development of forest areas, temporary logging roads are subject to reclamation. At the same time, it is advisable to reuse cement-based layers of road clothes as a road-building material. The article presents a method for the reuse of cement-based layers of recultivated pavement structures for the construction of new logging roads. A study of the physico-mechanical properties of a regenerated soil mixture based on a granulate obtained after milling cement-based layers of structures of logging roads has been carried out. Based on the results of laboratory tests of compressive strength, tensile strength during splitting and the coefficient of frost resistance of the regenerated soil mixture of various compositions, the possibility of using and optimal compositions of a mixture of cement-ground granulate together with additives of Portland cement, fly ash from state district power stations, local soils and water for the device of layers of bases and pavement coverings are proved. In order to increase the crack resistance of the regenerated soil mixture, the use of fiber additives is proposed. An increase in the physico-mechanical parameters of the regenerated soil mixture with the addition of fiber based on basalt fiber and fly ash from state district power stations has been established. The effectiveness of the use of fiber and fly ash additives from state district

power stations as part of a regenerated soil mixture for the construction of road coverings of logging roads has been proven.

Keywords: logging road; reclamation; regenerated soil mixture; cement grunt; fiber cement grunt.

Введение. Уровень развития транспортной инфраструктуры предопределяет эффективное освоение лесосырьевых баз. В связи с этим в настоящее время в многолесных районах России требуется значительное увеличение протяженности и улучшение транспортно-эксплуатационного состояния сети лесовозных автомобильных дорог. Строительство лесовозных автомобильных дорог производится, как правило, в условиях удаления от поставщиков традиционно используемых инертных материалов — песка, щебеночно-песчаных смесей, щебня, что приводит к повышению стоимости, увеличению сроков работ и сдерживает развитие транспортной инфраструктуры лесозаготовительной отрасли в целом [1; 2].

Одним из эффективных решений для снижения стоимости и увеличения скорости строительства лесовозных автомобильных дорог является технология укрепления местных грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд [3–7]. Данная технология позволяет использовать местные грунты в качестве дорожно-строительного материала путем их смешения с минеральными вяжущими веществами, как правило, с портландцементом, для устройства слоев оснований и покрытий автомобильных дорог. Это дает возможность частично или полностью избавиться от необходимости применения инертных дорожно-строительных материалов [8–13].

После освоения лесных участков лесосырьевых баз временные лесовозные дороги подлежат рекультивации. В целях эффективного использования дорожно-строительных ресурсов в данных условиях целесообразным является повторное использование цементогрунта в слоях дорожной одежды для строительства лесовозных автомобильных дорог на новых лесных участках. Регенерация цементогрунтовых слоев конструкций рекультивируемых лесовозных автомобильных дорог позволит сократить затраты на строительство не только за счет отсутствия необходимости в применении инертных дорожно-строительных материалов, но и за счет сокращения количества применяемого портландцемента [14]. Кроме того, полное снятие и вывоз конструкции дорожной одежды из цементогрунта для ее последующей регенерации обеспечит благоприятные условия для биологической рекультивации лесовозных дорог на освоенных лесных участках.

Целью настоящей работы является разработка оптимальных составов регенерированных грунтовых смесей на основе гранулята, полученного после фрезерования цементогрунтовых слоев конструкций рекультивируемых лесовозных автомобильных дорог, для применения при устройстве новых дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Объекты и методы исследования. Регенерация цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных автомобильных дорог — это технология переработки старого цементогрунтового материала путем его из-

мельчения и внесения вяжущих компонентов в целях восстановления и улучшения его характеристик для повторного использования в конструкции новой дорожной одежды.

В качестве цементогрунтового гранулята используют измельченные старые слои дорожной одежды из грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами в соответствии с ГОСТ 23558-94 и ГОСТ Р 70452-2022 [15; 16].

Технология измельчения старых цементогрунтовых слоев должна обеспечивать содержание в цементогрунтовой грануляте не более 25 % по массе частиц размером более 5 мм и не более 10 % по массе частиц размером более 10 мм. Для этой цели могут применяться ресайклеры, в том числе имеющие технологическую возможность внесения воды и перемешивания цементогрунтового гранулята с вяжущими компонентами.

В качестве вяжущего компонента для регенерации цементогрунтовых слоев целесообразно использовать портландцемент по ГОСТ 31108-2020 [17], например, ЦЕМ I 42,5 Н; ЦЕМ 0 52,5Н; ЦЕМ I 42,5Б; ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н; ЦЕМ II/А-И 32,5Н; ЦЕМ II/В-К(Ш-3-И) 32,5Б; ЦЕМ III/А 42,5Н и иных аналогичных типов и классов.

В целях улучшения условий структурообразования портландцемента эффективно в состав регенерируемой цементогрунтовой смеси вводить добавку золы-уноса ГРЭС, представляющую собой сухой тонкодисперсный материал, образуемый в результате сжигания твердого топлива и улавливаемый электрофильтрами [18–21]. Гранулометрический состав и диапазоны оптимальных характеристик золы-уноса ГРЭС для использования в регенерируемых цементогрунтовых смесях представлены в табл. 1 и 2. Зола-унос ГРЭС проявляет, как правило, слабую вяжущую способность, но благодаря наличию в составе оксида кальция в процессе взаимодействия с глинистыми частицами грунтов зола-унос способна насыщать их обменный комплекс и создавать благоприятные условия для гидратации и гидролиза портландцемента [22; 23]. В связи с этим формирование кристаллической структуры портландцемента протекает максимально эффективно, что позволяет получать высокие прочностные показатели и морозостойкость цементогрунтов, снижать необходимое количество минерального вяжущего [24].

Таблица 1. Гранулометрический состав золы-уноса ГРЭС, используемой в составе регенерируемой цементогрунтовой смеси

Гранулометрический состав, % (частные остатки на ситах)			
Всего более 2 мм	Фракции песка 0.05–2.0 мм	Фракции пыли 0.002–0.05 мм	Фракция глины менее 0.002 мм
Не более 0,0	38,4–51,9	40,9–55,4	5,6–7,6

Таблица 2. Диапазоны оптимальных характеристик золы-уноса ГРЭС, используемой в составе регенерируемой цементогрунтовой смеси

Характеристика	Значение
Влажность, %	не более 0,15
Потеря массы при прокаливании, %	не более 2,65
Насыпная плотность, г/см^3	0,65–0,85
Истинная плотность, г/см^3	1,8–2,3
Содержание оксида кальция, %	не менее 2,5

Одним из эффективных решений для увеличения объемов регенерируемой цементогрунтовой смеси для устройства новых слоев дорожных одежд является добавка в их состав местных природных грунтов. Для этого могут быть использованы дисперсные и связные грунты — пески и глинистые грунты (супеси, суглинки, глины с числом пластичности до 17) в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [25].

Вода в составе регенерируемой цементогрунтовой смеси должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-2011 [26].

Максимально допустимое содержание растворимых солей в воде не должно превышать $10\,000\text{ мг/дм}^3$, в том числе ионов SO_4 — $2\,700\text{ мг/дм}^3$, Cl — $3\,500\text{ мг/дм}^3$. Допустимо применение воды по ГОСТ 51232-98 [27].

Введение в состав регенерируемой цементогрунтовой смеси указанных компонентов позволяет создавать материал с прочной кристаллической структурой, со-

Таблица 3. Характеристика грунта

Наименование грунта	Удельный вес грунта, т/м^3	Влажность на границе текучести, % по массе	Влажность на границе раскатывания, % по массе	Число пластичности	Оптимальная влажность, % по массе	pH грунта	Содержание гумусовых веществ, %
Суглинок тяжелый песчаный	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8

Исходный цементогрунт был высушен до воздушно-сухого состояния при температуре $105\text{ }^\circ\text{C}$ и измельчен с показателем содержания в получившемся цементогрунтовой грануляте частиц размером более 5 мм — $15,4\%$ по массе и частиц размером более 10 мм — $5,5\%$ по массе.

Для изготовления образцов в составе регенерированной цементогрунтовой смеси использовались следующие компоненты: портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [17]; вода по ГОСТ 51232-

Таблица 4. Составы регенерированных цементогрунтовых смесей

Компоненты состава, % от массы сухого цементогрунтового гранулята	Серии образцов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Грунт (суглинок тяжелый песчаный)	0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б	0	0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Зола-унос ГРЭС	0	0	0	4,0	8,0	16,0	0	4,0	8,0	16,0	8,0
Фиброволокно базальтовое (отход производства базальтовых теплоизоляционных плит)	0	0	3,5	3,5	3,5	3,5	7,0	7,0	7,0	7,0	0
Вода	9,0	9,5	9,5	10,0	10,5	11,5	9,5	10,0	10,5	11,5	10,5

ответствующей, при оптимальном составе смеси, заданным ГОСТ Р 70452-2022 прочностным показателям и морозостойкости [16; 28]. Однако в связи с кристаллической структурой цементогрунтовой матрицы конструктивные слои дорожных одежд из данного материала на слабых основаниях имеют низкую трещиностойкость, проявляющуюся на поверхности покрытия в виде продольных и поперечных трещин [29; 30]. Данные дефекты существенно снижают транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных автомобильных дорог, являясь очагами образования локальных разрушений дорожной одежды и сокращая срок ее службы в целом [31]. В данных условиях эффективным является применение в составах регенерируемой цементогрунтовой смеси добавки фиброволокон.

Фиброволокна, равномерно распределяясь по всему объему регенерируемой цементогрунтовой смеси, воспринимают за счет осевого растяжения внешние нагрузки и значительно увеличивают прочностные показатели материала на сжатие и в особенности на растяжение при раскатывании, благодаря чему возрастает трещиностойкость, а значит и долговечность дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Для проведения исследований использовался цементогрунт марки М40 А с коэффициентом морозостойкости 0,80 при 25 циклах замораживания – оттаивания. Цементогрунт был изготовлен на основе грунта, суглинка тяжелого песчаного (табл. 3), портландцемента ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [17] и воды по ГОСТ 51232-98 [27].

98 [27]; грунт — суглинок тяжелый песчаный (см. табл. 2), зола-унос Рефтинской ГРЭС с характеристиками, соответствующими табл. 1, и базальтовые волокна, являющиеся отходом производства базальтовых теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области.

На основе указанных компонентов были изготовлены серии образцов различных составов регенерированных цементогрунтовых смесей (табл. 4).

Лабораторные исследования физико-механических характеристик — прочности на сжатие и растяжение при раскалывании и коэффициента морозостойкости регенерированных цементогрунтов проводились в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 [16] при сроке набора прочности 28 суток и полном водонасыщении. Коэффициент морозостойкости определялся при 25 циклах замораживания – оттаивания.

Результаты и обсуждение. На основании полученных результатов исследований прочности на сжатие регенерированных цементогрунтов в зависимости от содержания компонентов (рис. 1) оптимальное содер-

жание золы-уноса ГРЭС составило 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята. Прочность на сжатие регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята золы-уноса ГРЭС и 3,5 % фиброволокна возросла на 10,0 % по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС. Прочность на сжатие регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята золы-уноса ГРЭС и добавкой 7,0 % фиброволокна возросла на 10,8 % по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС.



Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания золы-уноса ГРЭС

Оптимальное содержание фиброволокна составило 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята (рис. 2). Прочность на сжатие регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой фиброволокна 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята воз-

росла на 12,8 % по сравнению с образцами без данной добавки.

На основании полученных результатов на рис. 3 представлена поверхность отклика для прочности на сжатие в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна в регенерированном цементогрунте.

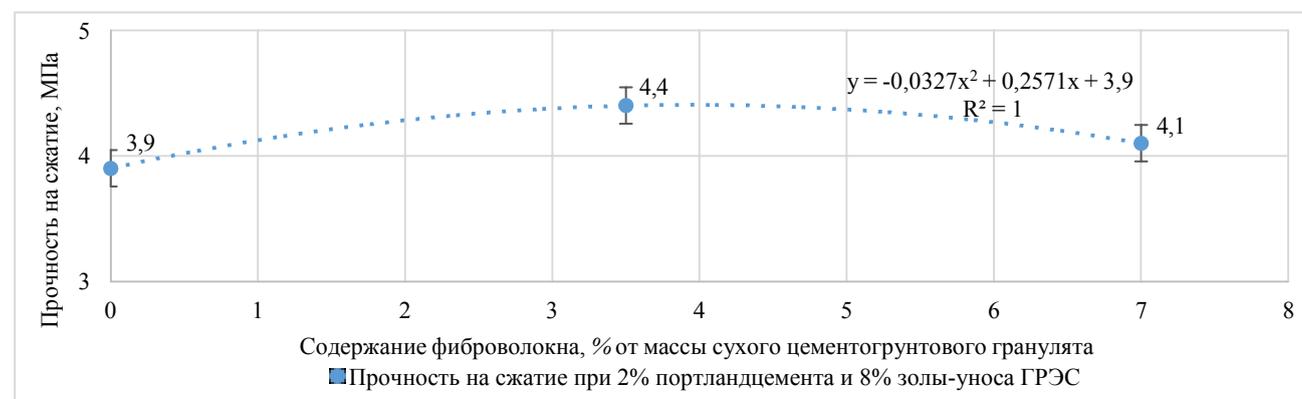


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания фиброволокна

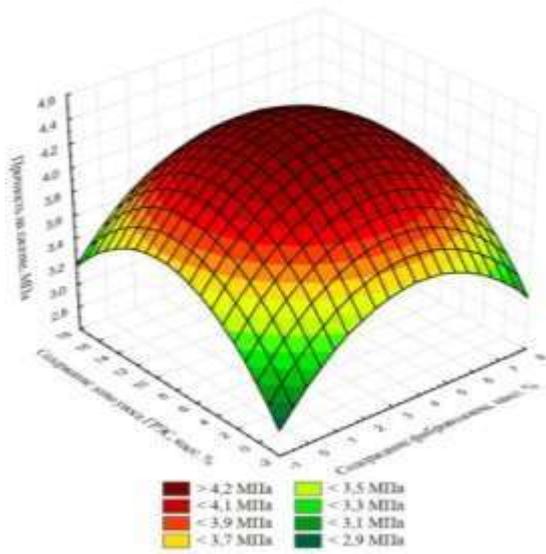


Рис. 3. Поверхность отклика прочности на сжатие регенерированного цементогрунта в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна

Результаты исследования прочности образцов регенерированных цементогрунтов на растяжение при рас-

калывании также показали оптимальное содержание золы-уноса ГРЭС 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята (рис. 4). Прочность на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов с добавкой 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята золы-уноса ГРЭС и 3,5 % фиброволокна возросла на 8,3 % по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС. Прочность на растяжение при раскалывании регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята золы-уноса ГРЭС и 7,0 % фиброволокна возросла на 9,1 % по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС.

Оптимальное содержание фиброволокна в результате исследований составило 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята (рис. 5). Прочность на растяжение при раскалывании регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой фиброволокна 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята возросла на 18,2 % по сравнению с образцами без данной добавки.

На основании полученных результатов на рис. 6 представлена поверхность отклика для прочности на растяжении при раскалывании в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна в регенерированном цементогрунте.

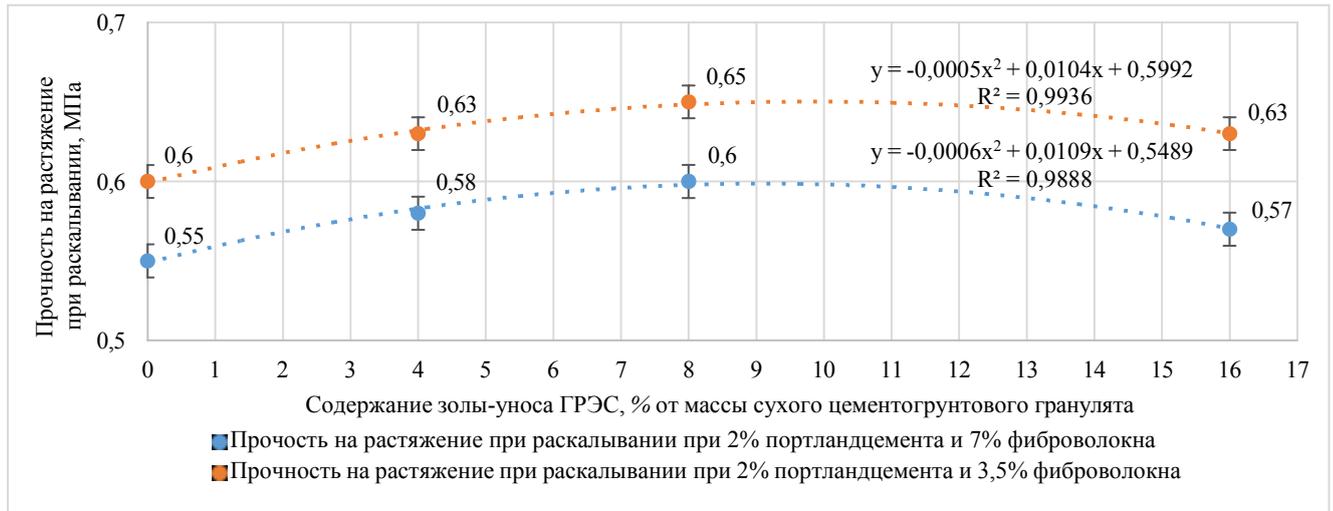


Рис. 4. Зависимость прочности на растяжение при раскалывании регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания золы-уноса ГРЭС

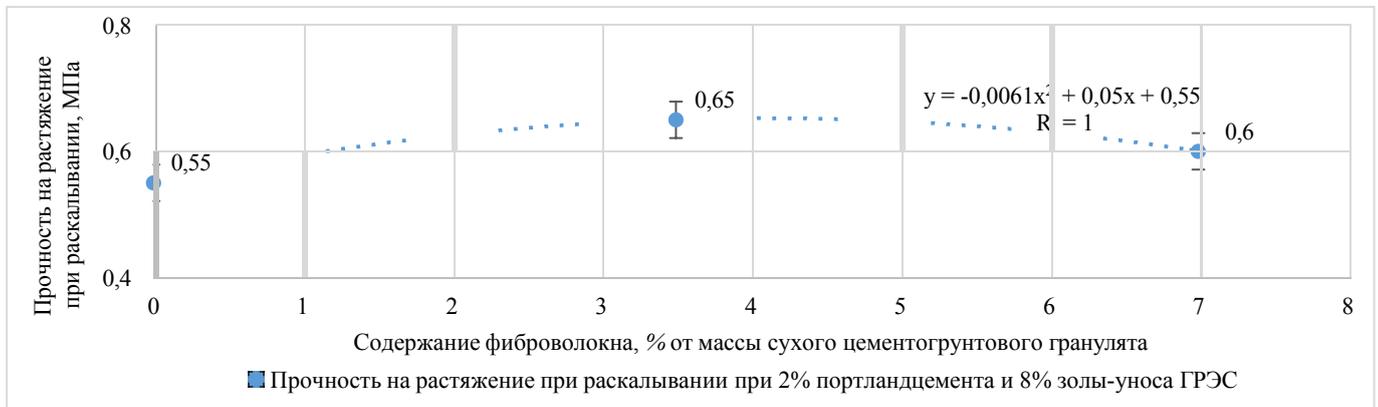


Рис. 5. Зависимость прочности на растяжение при раскалывании регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания фиброволокна

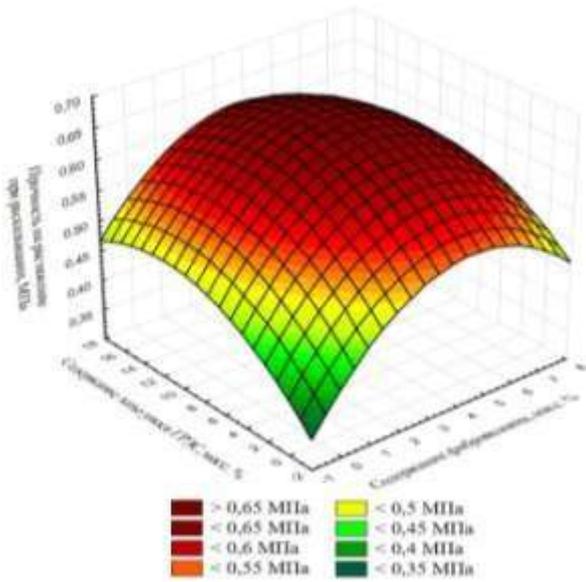


Рис. 6. Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании регенерированного цементогрунта в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна

На основании результатов проведенных исследований коэффициента морозостойкости регенерированных цементогрунтовых образцов в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС (рис. 7) нормативное значение

морозостойкости (не менее 0,8) наблюдается при содержании золы-уноса ГРЭС 8 % от массы сухого цементогрунтового гранулята. Максимальное значение коэффициента морозостойкости (0,83) зарегистрировано при содержании золы-уноса ГРЭС 8 % и 3,5 % фиброволокна от массы сухого цементогрунтового гранулята, что на 10,6 % выше по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС. При содержании золы-уноса ГРЭС 8 % и фиброволокна 7,0 % от массы сухого цементогрунтового гранулята максимальное значение коэффициента морозостойкости составило 0,80, что на 12,7 % выше по сравнению с образцами без добавки золы-уноса ГРЭС.

Оптимальное значение фиброволокна в результате исследований составило 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята (рис. 8). Коэффициент морозостойкости регенерированных цементогрунтовых образцов с добавкой фиброволокна 3,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята возрос на 18,6 % по сравнению с образцами без данной добавки.

На основании полученных результатов на рис. 9 представлена поверхность отклика для коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна в регенерированном цементогрунте.

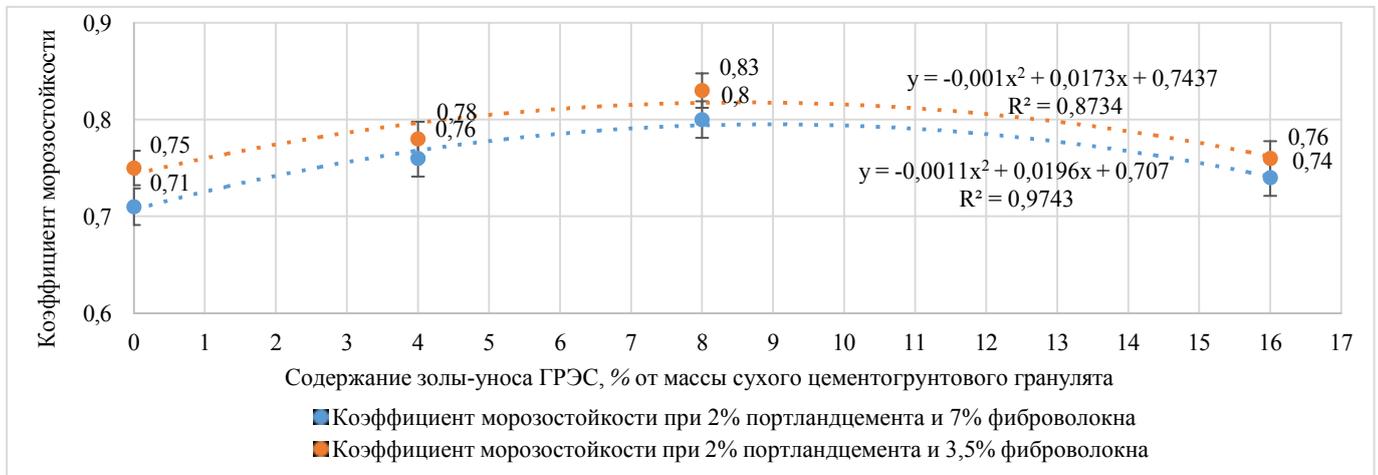


Рис. 7. Зависимость коэффициента морозостойкости регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания золы-уноса ГРЭС

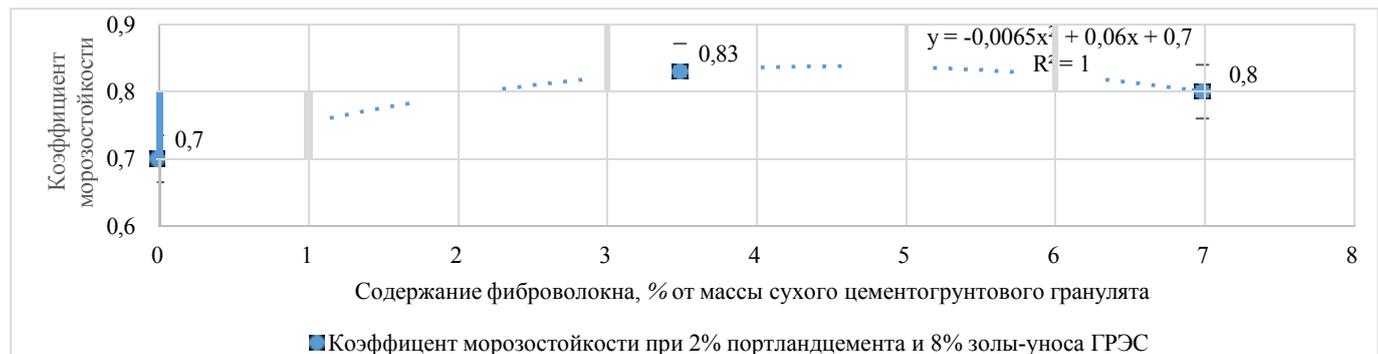


Рис. 8. Зависимость коэффициента морозостойкости регенерированной цементогрунтовой смеси от содержания фиброволокна

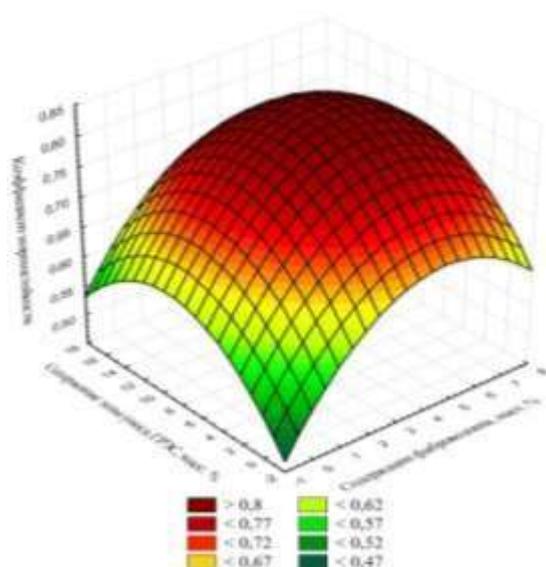


Рис. 9. Поверхность отклика коэффициента морозостойкости регенерированного цементогрунта в зависимости от содержания золы-уноса ГРЭС и фиброволокна

Таким образом, на основании полученных результатов исследований, для достижения прочностных показателей — марки М40 А и коэффициента морозостойкости — 0,83 регенерированных цементогрунтовых образцов, аналогичных показателям исходного цементогрунта, требуется оптимальное содержание вводимых в смесь добавок: грунт (суглинок тяжелый песчаный) — 12 %, портландцемент — 2 %, зола-унос ГРЭС — 8 %, фиброволокно — 3,5 %, вода — 10,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята. При этом, по результатам исследований, регенерированные цементогрунтовые образцы серии 1 и 2, без добавок и с добавкой одного лишь грунта, соответственно получили нулевые значения прочности и морозостойкости.

В связи с этим для получения регенерируемым цементогрунтом требуемых физико-механических показателей и коэффициента морозостойкости, удовлетворяющих нормативно-техническим требованиям по условиям применения и минимальной стоимости устраиваемых конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из данного материала, необходим лабораторный подбор оптимального состава всех указанных компонентов регенерируемых цементогрунтовых смесей.

Результаты исследований свидетельствуют об эффективности использования компонентов регенерируемых цементогрунтовых смесей. Добавка золы-уноса ГРЭС существенно улучшает условия структурообразования портландцемента, а волокна фибры, распределенные в объеме цементогрунтовой матрицы, эффективно воспринимают воздействующие внешние нагрузки.

1. Лыщик П.А., Плышевский С.В., Науменко А.И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2013. № 2 (158). С. 39-42.
2. Ольховиков В.М. Строительство дорожных одежд низкой стоимости с основаниями из укрепленных грунтов и тонкослойными покрытиями. М.: Информавтор, 2003. 84 с.

грузки, что значительно увеличивает прочностные показатели и морозостойкость регенерированных цементогрунтов. Высокие показатели прочности на растяжение при раскалывании свидетельствуют о повышенной трещиностойкости регенерированных цементогрунтов, что значительно увеличивает срок службы и транспортно-эксплуатационные характеристики дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Выводы

1. Оптимальное содержание компонентов регенерированной цементогрунтовой смеси, содержащей следующие добавки: грунт (суглинок тяжелый песчаный) — 12 %, портландцемент — 2 %, зола-унос ГРЭС — 8 %, фиброволокно — 3,5 %, вода — 10,5 % от массы сухого цементогрунтового гранулята, обеспечивает материалу марку по прочности М40 А и коэффициент морозостойкости 0,83, что соответствует данным характеристикам исходного цементогрунта до регенерации.

2. Зола-унос ГРЭС в составе регенерированной цементогрунтовой смеси создает благоприятные условия для гидратации и гидролиза портландцемента и позволяет эффективно формировать кристаллическую структуру минерального вяжущего, что способствует увеличению прочности на сжатие на 10,0 %, прочности на растяжение при раскалывании на 8,3 % и коэффициента морозостойкости на 10,6 % по сравнению с образцами оптимального состава без данной добавки.

3. Волокна фибры в составе регенерированной цементогрунтовой смеси дисперсно-армируют материал, воспринимая за счет осевого растяжения внешние нагрузки, что способствует увеличению прочности на сжатие на 12,8 %, прочности на растяжение при раскалывании на 18,2 % и коэффициента морозостойкости на 18,6 % по сравнению с образцами оптимального состава без данной добавки.

4. Регенерация цементогрунтов позволяет не только полностью восстанавливать прочностные характеристики и морозостойкость исходного материала, но и, благодаря добавкам золы-уноса ГРЭС и волокон фибры, создавать прочную дисперсно-армированную цементогрунтовую матрицу материала, обладающую высокой трещиностойкостью при незначительном количестве минерального вяжущего — портландцемента. Это дает возможность с высокой экономической и экологической эффективностью проводить рекультивацию лесовозных дорог на освоенных лесных участках, используя в полном объеме цементогрунтовой гранулят для строительства новых дорог без применения инертных дорожно-строительных материалов с минимальной стоимостью строительно-монтажных работ лесовозной дорожно-транспортной инфраструктуры.

3. Бавбель Е.И., Игнатенко В.В., Науменко А.И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2016. № 2 (184). С. 58-60.
4. Голубева Е.А., Плахотный А.Б. Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе «Амур» // Техника и технологии строительства. 2017. № 3 (11). С. 45-49.
5. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics - concepts and analysis. Geosynthetics,

2006. P. 411-414.
6. 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. № 9 (69). P. 49-54.
 7. Salour F., Erlingsson S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests // International Journal of Pavement Engineering. 2017. V. 18 (3). P. 236-246.
 8. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Исследование долговечности модифицированного цементогрунта дорожного назначения // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С.76-79.
 9. Коновалова Н.А., Дабижа 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.
 10. 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.
 11. Roger L.B., Brockenbrough P.E. Highway Engineering Handbook N-Y.: McGraw-Hill, 2009. 885 p.
 12. Sabri I.L. Study on the impact of moisture content on subgrade strength. Proc. 5th International Symposium. Sri Lanka, 2015. P. 71-76.
 13. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. Matec Web of Conferences (195). Article Number 03010. 2018. P. 1-7.
 14. Чудинов С.А. Регенируемая грунтовая смесь: пат. RU2792506C1 Рос. Федерация, МПК E01C 7/36; заявл. 27.09.2022; опубл. 22.03.2023, Бюл. № 9.
 15. ГОСТ 23558-94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия. Введ. 01.01.1995. М.: Стандартинформ, 2005. 12 с.
 16. ГОСТ Р 70452-2022. Грунты стабилизированные и укрепленными неорганическими вяжущими. Общие технические условия. Введ. 30.11.2022. М.: Ин-т стандартизации, 2022. 24 с.
 17. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 30.04.2020. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
 18. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Науч. исследования. 2018. № 6 (26). С. 23-25.
 19. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Исследование отходов промышленности для укрепления грунтов // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-1. С. 102-106.
 20. 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. V. 6, № 2. P. 73-89.
 21. Vijayan D.S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil - A review. Environmental Technology & Innovation. 2020. № 20. P. 54-61.
 22. 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. № 3 (11). P. 1-21.
 23. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soil. Construction and Building Materials. 2004. V. 18. P. 263-267.
 24. Ayseldeen 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.
 25. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Введ. 01.01.2021. М.: Стандартинформ, 2021. 44 с.
 26. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Введ. 01.10.2012. М.: Стандартинформ, 2019. 18 с.
 27. ГОСТ 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. Введ. 17.12.1998. М.: Стандартинформ, 2008. 21 с.
 28. Чудинов С.А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
 29. Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
 30. 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.
 31. Чудинов С.А. Производственные испытания грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2011. № 6/324. С. 58-61.

References

1. Lyshchik P.A., Plyshevskij S.V., Naumenko A.I. The use of a complex binder to strengthen the subgrade soils of forest roads // Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2013. № 2 (158). P. 39-42.
2. Ol'hovikov V.M. Construction of low-cost pavements with reinforced soil bases and thin-layer pavements. М.: Informavtodor, 2003. 84 p.
3. Bavbel' E.I., Ignatenko V.V., Naumenko A.I. Design and calculation methods for pavements from reinforced soils // Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2016. № 2 (184). P. 58-60.
4. Golubeva E.A., Plahotnij A.B. The practice of using road polymer cement soil on the federal highway "Amur" // Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva. 2017. № 3 (11). P. 45-49.
5. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics - concepts and analysis. Geosynthetics, 2006. P. 411-414.
6. 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. № 9 (69). P. 49-54.
7. Salour F., Erlingsson S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests // International Journal of Pavement Engineering. 2017. V. 18 (3). P. 236-246.
8. Vdovin E.A., Mavliev L.F. Investigation of the durability of modified cement soil for road purposes // Industrial and Civil Engineering («PGS»). 2014. № 11. P.76-79.
9. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P., Rush E.A. Utilization of hydrolytic lignin in the composition of cement soils // Ekologia i promyshlennost Rossii (Ecology and Industry of Russia). 2019. P. 23, № 11. P. 32-37.
10. 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.
11. Roger L.B., Brockenbrough P.E. Highway Engineering Handbook N-Y.: McGraw-Hill, 2009. 885 p.
12. Sabri I.L. Study on the impact of moisture content on subgrade strength. Proc. 5th International Symposium. Sri Lanka, 2015. P. 71-76.
13. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. Matec Web of Conferences (195). Article Number 03010. 2018. P. 1-7.
14. Chudinov S.A. Regenerated soil mixture: pat. RU2792506C1 Ros. Federaciya, MPK E01C 7/36; zayavl. 27.09.2022; opubl. 22.03.2023, Byul. № 9.

15. GOST 23558-94. Mixtures of crushed stone-gravel-sand and soils treated with inorganic binders for road and airfield construction. Technical conditions. Vved. 01.01.1995. M.: Standartinform, 2005. 12 p.
16. 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.
17. GOST 31108-2020. General construction cements. Technical conditions. Vved. 30.04.2020. M.: Standartinform, 2020. 19 p.
18. Voskanyanc K.E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction // Nauch. issledovaniya. 2018. № 6 (26). P. 23-25.
19. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Logojda V.S. Investigation of industrial waste for soil stabilization // Fundamental research. 2016. № 12-1. P. 102-106.
20. 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. V. 6, № 2. P. 73-89.
21. Vijayan D.S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil - A review. Environmental Technology & Innovation. 2020. № 20. P. 54-61.
22. Beeghly J., Schröck M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfopozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. № 3 (11). P. 1-21.
23. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soil. Construction and Building Materials. 2004. V. 18. P. 263-267.
24. 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.
25. GOST 25100-2020. Soils. Classification. Introduction. Vved. 01.01.2021. M.: Standartinform, 2021. 44 p.
26. GOST 23732-2011. Water for concrete and mortars. Technical conditions. Vved. 01.10.2012. M.: Standartinform, 2019. 18 p.
27. GOST 51232-98. Drinking water. General requirements for the organization and methods of quality control. Vved. 17.12.1998. M.: Standartinform, 2008. 21 p.
28. Chudinov S.A. Reinforced soils in the construction of logging roads: monogr. Ekaterinburg: UGLTU, 2020. 174 p.
29. Chudinov S.A. Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex: monogr. Ekaterinburg: UGLTU, 2022. 164 p.
30. 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.
31. Chudinov S.A. Production tests of soils reinforced with Portland cement with the addition of polyelectrolyte // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2011. № 6/324. P. 58-61.