

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7703

УДК 624.138.232

Статья

Исследование деформационных характеристик фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных автомобильных дорог

Чудинов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), chudinovsa@m.usfeu.ru

Васильев Евгений Геннадьевич

аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), geomera@list.ru

Ладейщиков Николай Васильевич

аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), uralberg@yandex.ru

Ладейщиков Константин Васильевич

аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), k1272@mail.ru

Получена: 10 февраля 2024 / Принята: 23 июля 2024 / Опубликовано: 5 августа 2024

Аннотация: Эффективность функционирования лесозаготовительной отрасли зависит от развития и качества транспортной инфраструктуры лесосырьевых баз. Лесовозные автомобильные дороги должны обеспечивать нормативные транспортно-эксплуатационные показатели в течение всего срока их службы. Поэтому при строительстве лесовозных автомобильных дорог требуется применение обоснованных конструктивных решений дорожных одежд с использованием прочных и долговечных дорожно-строительных материалов. Устройство дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из каменных материалов является одной из распространённых технологий в районах, имеющих данную ресурсную базу. На территориях с дефицитом каменных материалов целесообразно применять альтернативные технологии дорожного строительства, одной из которых является устройство конструктивных слоёв дорожных одежд из укрепленных грунтов. Цементогрунтовые слои дорожных одежд имеют высокую прочность, морозостойкость, долговечность и хорошо себя

зареккомендовали в дорожном строительстве. Однако в сложных природных условиях лесной зоны, где преобладают слабые, переувлажнённые грунты, и при высоких транспортных нагрузках цементогрунтовые слои имеют низкую трещиностойкость, что приводит к образованию дефектов на покрытии и быстрому разрушению конструкции дорожной одежды. Эффективным решением данной проблемы является технология дисперсного армирования волокнами фибры цементогрунтовых смесей. Получаемый в результате фиброцементогрунт обладает повышенными прочностными показателями, морозостойкостью и трещиностойкостью по сравнению с цементогрунтом, поскольку распределённые и прочно удерживаемые в цементогрунтовой матрице волокна фибры воспринимают внешние нагрузки за счёт своего осевого растяжения и увеличивают физико-механические показатели данного композиционного материала. В связи с изложенным актуальным является исследование деформационных характеристик дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунтовых слоёв в сравнении с аналогичными показателями равнопрочных конструкций из цементогрунта и каменных материалов. Исследование деформационных характеристик дорожной одежды выполнено с использованием программного комплекса геотехнических расчётов PLAXIS 2D по методу конечных элементов при различных деформационных характеристиках грунта земляного полотна автомобильной дороги. Для моделирования принималась нагрузка от колеса гружёного лесовоза 55 кН/м^2 . Показатели структурных прочностных характеристик цементогрунта и фиброцементогрунта (модуль деформации; угол внутреннего трения; удельное сцепление) получены в лабораторных условиях. По результатам моделирования получены зависимости деформаций дорожных одежд различных типов конструкций (цементогрунт, фиброцементогрунт и щебень) от консистенции грунта основания — суглинка лёгкого пылеватого (текучепластичной, твёрдой и мягкопластичной), а также эпюры главных напряжений в конструктивных слоях под действием транспортной нагрузки. Установлено, что конструкция дорожной одежды из щебня на 12,5—22,3 %, в зависимости от консистенции грунта основания, менее подвержена деформациям по сравнению с конструкцией из укрепленных грунтов. Применение фиброцементогрунта в конструкции дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог по сравнению с цементогрунтом без добавки фиброволокна позволяет уменьшить вертикальные (на 7,2—12,0 %) и горизонтальные (на 9,5—12,7 %) деформации в зависимости от консистенции грунта основания, причём эффективность возрастает с увеличением прочностных и деформационных характеристик грунта основания.

Ключевые слова: фиброцементогрунт; лесовозная дорога; деформация; осадка; боковое смещение; эпюра главных напряжений

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7703

Article

Study of Deformation Characteristics of Fiber Cement-Soil Structures of Logging Road

Sergey Chudinov

Ph. D. in engineering, associate professor, Head of Department of Highways, Bridges and Tunnels Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), chudinovsa@m.usfeu.ru

Evgeniy Vasiliev

Ph. D. student, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), geomera@list.ru

Nikolay Ladeishchikov

Ph. D. student, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), uralberg@yandex.ru

Konstantin Ladeishchikov

Ph. D. student, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), k1272@mail.ru

Received: 10 February 2024 / Accepted: 23 July 2024/ Published: 5 August 2024

Abstract: The efficiency of the logging industry depends on the development and quality of the transport infrastructure of timber resource bases. Logging roads must ensure standard transport and operational performance throughout their entire service life. Therefore, the construction of logging roads requires the use of sound design solutions for road pavements using strong and durable road building materials. The construction of road pavements for logging roads from stone materials is one of the most common technologies in areas with this resource base. In areas with a shortage of stone materials, it is advisable to use alternative road construction technologies, one of which is the construction of structural layers of road pavements from reinforced soils. Cement-soil layers of road pavements are highly appreciated in road construction because of their high strength, frost resistance, and durability. However, in the difficult natural conditions of the forest zone with weak waterlogged soils predominance and high traffic loads, cement-soil layers have low crack resistance, which leads to the formation of defects in the pavement and rapid destruction of the road pavement

structure. An effective solution to this problem is the technology of dispersed fiber reinforcement of cement-soil mixtures. The resulting fiber cement soil has increased strength properties, frost resistance and crack resistance compared to cement soil, since fibers distributed and firmly held in the cement soil matrix perceive external loads due to their axial stretching and increase the physical and mechanical properties of this composite material. Therefore, it is relevant to study the deformation characteristics of road pavements for logging roads made of fiber-cement soil layers in comparison with similar indicators of equal-strength structures made of cement soil and stone materials. The study of the deformation characteristics of the road pavement was carried out using the PLAXIS 2D geotechnical calculation software package according to the finite element method for various deformation characteristics of the road subgrade soil. For modeling, the load from the wheel of a loaded timber truck was assumed to be 55 kN/m². Indicators of the structural strength characteristics of fiber cement soil and cement soil (deformation modulus; angle of internal friction; specific adhesion) were obtained in laboratory conditions. Based on the modeling results, the authors obtained the dependences of the deformations of road pavements with various types of structures (cement soil, fiber cement soil and crushed stone) on the consistency of the foundation soil (of high plasticity, soft and hard), as well as diagrams of the main stresses in structural layers under the influence of transport load. It has been established that the structure of road pavement made of crushed stone is 12.5—22.3 % less susceptible to deformation, depending on the consistency of the foundation soil, compared to the structure made of reinforced soils. The use of fiber cement soil in the construction of pavement for logging roads in comparison with cement soil without the addition of fiber allows reducing vertical deformations by 7.2—12.0 % and horizontal deformations by 9.5—12.7 % depending on the consistency of the foundation soil. The efficiency increases with an increase in the strength and deformation characteristics of the foundation soil.

Keywords: fiber cement soil; logging road; deformation; settlement; lateral displacement; principal stress diagram

1. Введение

Лесовозные автомобильные дороги эксплуатируются в сложных природных условиях лесной зоны и при интенсивных транспортных нагрузках. Поэтому конструкция дорожной одежды и строительные материалы должны обеспечивать требуемые транспортно-эксплуатационные показатели проезжей части в течение всего срока службы лесовозной автомобильной дороги.

В районах, обладающих в достаточном объёме ресурсами инертных материалов, дорожные одежды лесовозных автомобильных дорог устраивают преимущественно из каменных материалов. Каменные материалы обладают высокими физико-механическими характеристиками и технологичны при устройстве конструктивных слоёв дорожной одежды. В районах с недостатком инертных материалов используются альтернативные технологии дорожного строительства, одной из которых является устройство конструктивных слоёв из укрепленных местных грунтов [1].

Укрепление грунтов производится путём смешения местного грунта с вяжущими материалами, как правило, с портландцементом, добавлением воды до оптимальной влажности смеси, последующего уплотнения и ухода за уложенным слоем [2], [3]. Получаемый в результате цементогрунт обладает высокими прочностными показателями и морозостойкостью. Однако в условиях слабых оснований, распространённых в лесной зоне, цементогрунты имеют недостаточную трещиностойкость, что является причиной образования дефектов и ускоренного разрушения покрытия проезжей части [4], [5].

Для повышения трещиностойкости и физико-механических показателей укрепленных грунтов эффективным является введение в их состав добавки фиброволокна. В качестве фиброволокна может использоваться базальтовая, стеклянная, полипропиленовая или углеродная фибра. Распределённые и прочно удерживаемые в цементогрунтовой матрице волокна фибры воспринимают за счёт своего осевого растяжения внешние нагрузки и повышают прочность и трещиностойкость получаемого композиционного материала — фиброцементогрунта [6]. В работах [7—10] приведены результаты лабораторных исследований фиброцементогрунтов на основе различных видов фиброволокна. Установлено, что фиброцементогрунты имеют более высокие показатели прочности, морозостойкости и низкое водонасыщение, чем аналогичные образцы цементогрунтов без добавки фиброволокна. Кроме того, исследованиями [11—14] отмечено, что дисперсное армирование волокнами фибры позволяет увеличить структурную прочность фиброцементогрунтов, что обеспечивает дорожной одежде автомобильных дорог высокие показатели модуля упругости.

В целях конструирования дорожных одежд из фиброцементогрунта, обеспечивающих заданный срок службы в условиях лесной зоны на слабых основаниях и под действием высоких нагрузок от лесотранспорта, требуется проведение расчётного моделирования

деформационных характеристик. Анализ приведённых выше научных работ показал, что данным исследованиям уделено недостаточное внимание.

Целью настоящей работы является исследование деформационных характеристик фиброцементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог на слабых основаниях и под действием нагрузок от лесотранспорта, а также сравнение данных показателей с аналогичными конструкциями дорожных одежд из цементогрунта без добавки фиброволокна и из каменных материалов.

2. Материалы и методы

Исследование деформационных характеристик дорожной одежды выполнено с использованием программного комплекса геотехнических расчётов PLAXIS 2D по методу конечных элементов. Моделирование по методу конечных элементов позволяет одновременно выполнять расчёты деформаций и напряжений исследуемых конструкций в плоскости расчётной модели и выявить их вертикальные (осадку) и горизонтальные (боковое смещение) составляющие.

Моделирование проводилось в следующей последовательности:

- Создание расчётных моделей конструкций дорожных одежд.
- Расчёт деформаций конструкций дорожных одежд под действием транспортной нагрузки.
- Анализ результатов расчёта моделей конструкций дорожных одежд.

Для расчётного моделирования деформаций использовались равнопрочные конструкции дорожных одежд из различных материалов: цементогрунт (тип 1); фиброцементогрунт (тип 2) и щебень (тип 3). Для приведения конструкций дорожных одежд к единым прочностным показателям произведён расчёт в программном комплексе «КРЕДО РАДОН 4.2» (Кредо-Диалог СП ООО, Беларусь) в соответствии с методикой ПНСТ 542-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежёсткие дорожные одежды. Правила проектирования» для условий Свердловской области. Параметры исходных данных представлены в таблице 1.

Полученные в ходе расчёта характеристики равнопрочных вариантов конструкций дорожных одежд лесовозной автомобильной дороги представлены в таблицах 2 и 3.

Подбор оптимального состава фиброцементогрунтовой и цементогрунтовой смесей, соответствующих марке М60 А, производился в лабораторных условиях на аттестованном испытательном оборудовании по методике ГОСТ 70452-2022 «Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия» на основе природного грунта — суглинка лёгкого пылеватого, взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Алапаевское лесничество» в Свердловской области. Составы фиброцементогрунтовой и цементогрунтовой смесей

подобраны в следующем соотношении компонентов: портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» — 7,0 % от массы сухого грунта; вода по ГОСТ 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества» для получения оптимальной влажности смеси — 16 % от массы сухого грунта. Для приготовления фиброцементогрунтовой смеси использовалась фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области, в количестве 1,5 % от массы сухого грунта.

Для получения структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта и цементогрунта подобранных составов проведены лабораторные испытания по изучению показателей угла внутреннего трения и удельного сцепления в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1. По полученным показателям сопротивления срезу образцов на каждой из ступени нормального давления (0,1 МПа; 0,2 МПа; 0,3 МПа) рассчитаны показатели угла внутреннего трения и удельного сцепления укрепленных грунтов (таблица 4).

Таблица 1. Исходные данные для конструирования и расчёта дорожных одежд

Table 1. Initial data for the design and calculation of road pavements

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя
1	Дорожно-климатическая зона	2
2	Схема увлажнения рабочего слоя	2
3	Количество расчётных дней в году	140
4	Глубина промерзания, см	200
5	Категория дороги	III-л
6	Количество полос движения	1
7	Тип конструкции дорожной одежды	Переходный
8	Срок службы покрытия, лет	5
9	Межремонтный срок покрытия, лет	3
10	Коэффициент надёжности	0,82
11	Ширина проезжей части, м	5,5
12	Грунт рабочего слоя	Суглинок лёгкий
13	Расчётная влажность грунта, доли ед.	0,710
14	Нормативная статистическая нагрузка на ось, кН	117,70
15	Давление в шинах, МПа	0,60
16	Диаметр штампа, см	40,29
17	Расчётное число приложений на полосу приведённой нагрузки на последний год службы, ед./сут.	398,92

Таблица 2. Характеристика конструкции дорожной одежды из цементогрунта (тип 1) и фиброцементогрунта (тип 2)

Table 2. Characteristics of the construction of road pavement made of cement soil (type 1) and fiber cement soil (type 2)

№ слоя	Характеристика материала слоя	Толщина слоя, см
1	Цементогрунт (фиброцементогрунт), марка М60 А, ГОСТ 70452-2022	63,0
Суммарная толщина конструкции дорожной одежды		63,0

Таблица 3. Характеристика конструкции дорожной одежды из щебня (тип 3)

Table 3. Characteristics of crushed stone road pavement design (type 3)

№ слоя	Характеристика материала слоя	Толщина слоя, см
1	Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5—63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклиной фракционным щебнем	26,0
2	Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5—63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклиной фракционным щебнем	30,0
3	Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 5 %-й по ГОСТ 32824-2014	20,0
Суммарная толщина конструкции дорожной одежды		76,0

Таблица 4. Показатели структурных прочностных характеристик укрепленных грунтов

Table 4. Indicators of structural strength characteristics of reinforced soils

Показатель	Фиброцементогрунт	Цементогрунт
Модуль деформации (E), МПа	55	47
Удельное сцепление (C), кПа	866,0	607,3
Угол внутреннего трения (φ), град.	27	25

Полученные в ходе лабораторных исследований показатели модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунта и цементогрунта использовались в расчётных моделях конструкций дорожных одежд. Аналогичные показатели щебня ($E = 100$ МПа, $\varphi = 45^\circ$) и песка ($E = 30$ МПа, $\varphi = 30^\circ$) были приняты согласно СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*».

Для моделирования деформационных характеристик конструкций дорожных одежд принималась стандартная нагрузка от колеса грузёного лесовоза 55 кН/м^2 .

Расчётные схемы конструкций дорожных одежд лесовозной автомобильной дороги, использованные в моделях, представлены на рисунках 1 и 2.

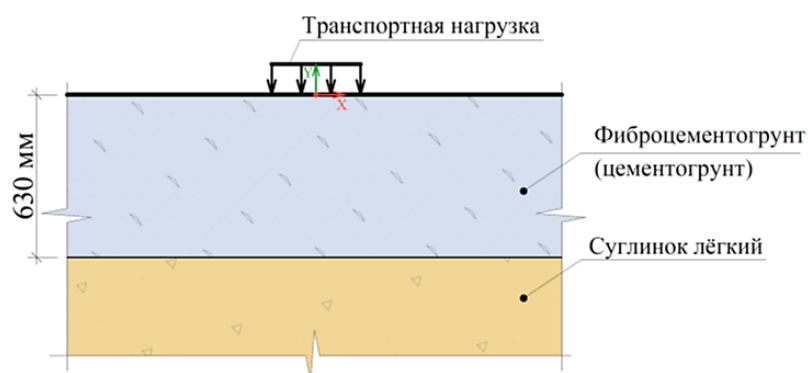


Рисунок 1. Расчётная схема конструкции дорожной одежды по типу 1 и 2

Figure 1. Calculation diagram of road pavement design for types 1 and 2

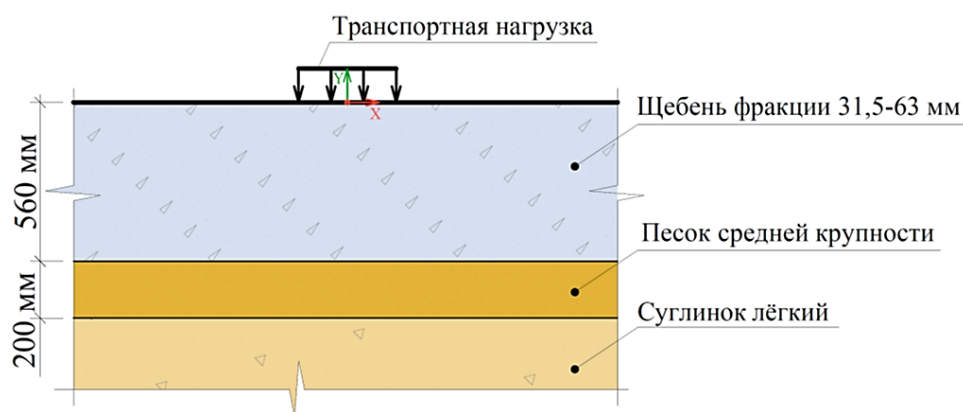


Рисунок 2. Расчётная схема конструкции дорожной одежды по типу 3

Figure 2. Calculation diagram of road pavement design for type 3

Расчётное моделирование деформационных характеристик конструкций дорожных одежд производилось при различной консистенции связного грунта основания земляного полотна (суглинка лёгкого пылеватого): текучепластичной, мягкопластичной и твёрдой. За основу были приняты прочностные и деформационные характеристики грунта согласно СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» (таблица 5).

Таблица 5. Прочностные и деформационные характеристики грунта земляного полотна — суглинка лёгкого пылеватого

Table 5. Strength and deformation characteristics of the subgrade soil — light silty loam

Показатель	Консистенции грунта земляного полотна		
	текучепластичная	мягкопластичная	твёрдая
Модуль деформации (E), МПа	5	20	40
Удельное сцепление (C), кПа	12	14	60
Угол внутреннего трения (φ), град.	8	18	30

Статистический анализ и визуализация полученных результатов деформационных характеристик конструкций дорожных одежд производился в программном комплексе Statistica 10 (TIBCO Software Inc., США).

3. Результаты

На основании результатов проведённых исследований получены зависимости деформаций дорожных одежд от типа конструкции и консистенции грунта основания (таблица 6), а также эпюры главных напряжений под действием транспортной нагрузки в конструктивных слоях на основании из суглинка лёгкого пылеватого тягучепластичной консистенции (рисунки 3—5).

Таблица 6. Зависимость величины деформаций дорожных одежд от типа конструкции и консистенции грунта основания

Table 6. Dependence of the magnitude of deformations of road pavements on the type of structure and consistency of the foundation soil

Показатель	Грунт основания, E/C/φ (кПа/кПа/°)	Типы покрытия дорожной одежды		
		Цементогрунт (тип 1)	Фиброцементогрунт (тип 2)	Щебень (тип 3)
Вертикальные деформации (осадка), мм	5/12/8	1,107	1,027	0,7982
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1854	0,1678	0,146
Вертикальные деформации (осадка), мм	20/14/18	0,6513	0,5818	0,4884
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1233	0,1085	0,09377
Вертикальные деформации (осадка), мм	40/60/30	0,5595	0,4923	0,4305
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1112	0,09703	0,08124

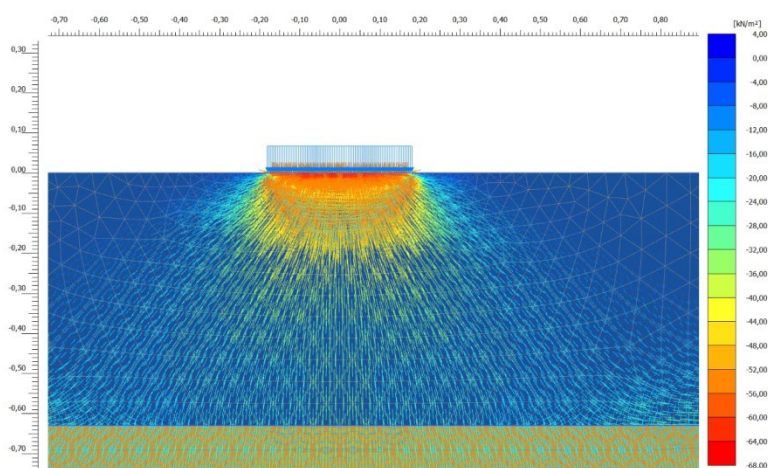


Рисунок 3. Эпюра главных напряжений в конструктивных слоях дорожной одежды по типу 1 от транспортной нагрузки на основании из суглинка лёгкого пылеватого тягучепластичной консистенции

Figure 3. Diagram of the main stresses in the structural layers of road pavement according to type 1 from the transport load on a base of light silty loam of a ductile-plastic consistency

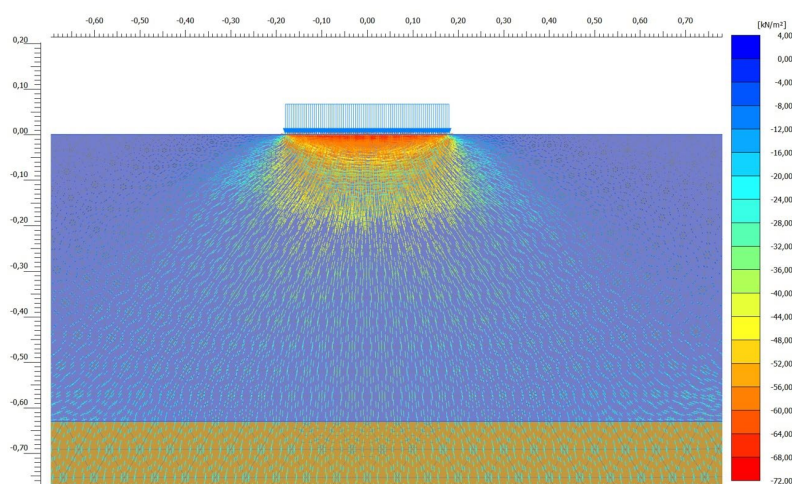


Рисунок 4. Эпюра главных напряжений в конструктивных слоях дорожной одежды по типу 2 от транспортной нагрузки на основании из суглинка лёгкого пылеватого тягучепластичной консистенции

Figure 4. Diagram of the main stresses in the structural layers of road pavement according to type 2 from the transport load on a base of light silty loam of a ductile-plastic consistency

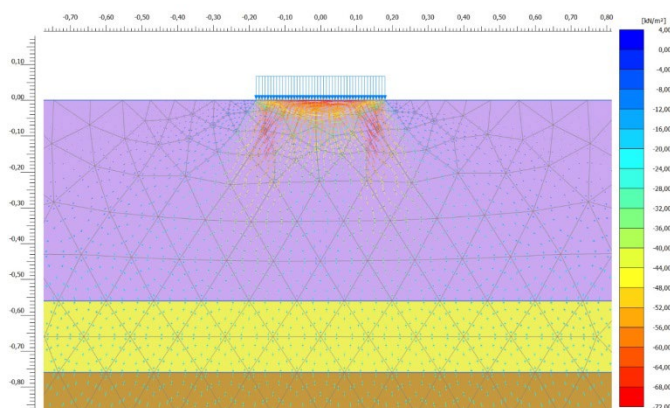


Рисунок 5. Эпюра главных напряжений в конструктивных слоях дорожной одежды по типу 3 от транспортной нагрузки на основании из суглинка лёгкого пылеватого тягучепластичной консистенции

Figure 5. Diagram of the main stresses in the structural layers of road pavement according to type 3 from the transport load on a base of light silty loam of a ductile-plastic consistency

На основании полученных зависимостей величины деформаций дорожных одежд от типа конструкции и консистенции грунта основания построены поверхности отклика вертикальных деформаций (осадки) (рисунок 6) и горизонтальных деформаций (боковое смещение) (рисунок 7).

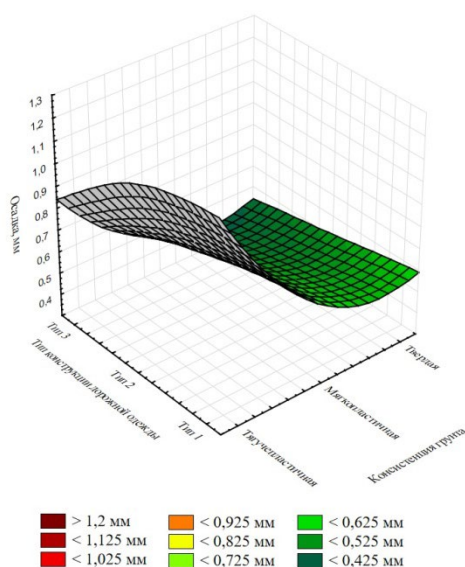


Рисунок 6. Поверхность отклика вертикальных деформаций (осадки) от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

Figure 6. Surface of the response of vertical deformations (precipitation) from the consistency of the foundation soil and the type of construction of the pavement

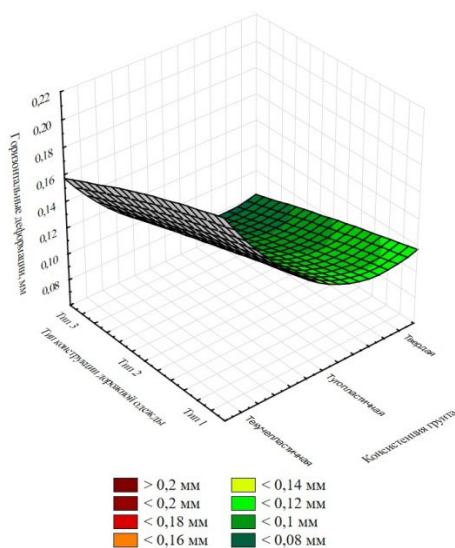


Рисунок 7. Поверхность отклика горизонтальных деформаций (боковое смещение) от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

Figure 7. Surface of the response of horizontal deformations from the consistency of the foundation soil and the type of construction of the pavement

4. Обсуждение и заключение

Анализ результатов проведённых исследований деформаций дорожных одежд для различных типов конструкций и консистенции грунта основания показывает, что фиброцементогрунт имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с цементогрунтом без добавки фиброволокна. Благодаря этому в дорожной одежде из фиброцементогрунта на слабом основании из суглинка лёгкого пылеватого тягучепластичной консистенции возникают напряжения на 5 % больше, чем у цементогрунта, в связи с чем повышается сопротивление конструкции сжимающим напряжениям, что способствует уменьшению деформаций дорожной одежды от нагрузки лесотранспорта. Так, показатели осадки дорожной одежды из фиброцементогрунта меньше по сравнению с цементогрунтом на 12,0 % на грунте твёрдой консистенции, меньше на 10,6 % на грунте магнепластичной консистенции и меньше на 7,2 % на грунте тягучепластичной консистенции. Показатели горизонтальных деформаций дорожной одежды из фиброцементогрунта также меньше по сравнению с цементогрунтом на 12,7 % на грунте твёрдой консистенции, меньше на 12,0 % на грунте магнепластичной консистенции и меньше на 9,5 % на грунте тягучепластичной консистенции.

На основании построенных эпюр главных напряжений максимальное напряжение в дорожной одежде из щебня выше, чем у фиброцементогрунта на 7 %, что свидетельствует о лучшем сопротивлении данной конструкции сжимающим напряжениям. Показатели осадки дорожной одежды из щебня меньше по сравнению с фиброцементогрунтом

на 12,5 % на грунте твёрдой консистенции, меньше на 16,0 % на грунте магнезиальной консистенции и меньше на 22,3 % на грунте тягучепластичной консистенции. Показатели горизонтальных деформаций дорожной одежды из щебня также меньше по сравнению с фиброцементогрунтом на 16,3 % на грунте твёрдой консистенции, меньше на 13,6 % на грунте магнезиальной консистенции и меньше на 13,0 % на грунте тягучепластичной консистенции. На основании изложенного эффективность применения щебня в конструкции дорожной одежды в сравнении с фиброцементогрунтом повышается на слабых основаниях по критерию осадки, но уменьшается по критерию горизонтальных деформаций.

Таким образом, результаты исследований позволили установить, что конструкция дорожной одежды из щебня менее подвержена деформациям по сравнению с конструкцией из укрепленных грунтов. Данная зависимость объясняется тем, что при равных прочностных характеристиках дорожная одежда из щебня, включая нижний слой из песка, имеет большую толщину, чем из укрепленного грунта. При этом в районах с недостатком каменных материалов применение данных конструкций дорожных одежд из инертных материалов экономически менее эффективно, чем использование укрепленных грунтов.

Применение фиброцементогрунта в конструкции дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог в сравнении с цементогрунтом без добавки фиброволокна позволяет уменьшить вертикальные и горизонтальные деформации, причём эффективность возрастает с увеличением прочностных и деформационных характеристик грунта основания. Снижение деформаций в конструкции дорожной одежды при действии транспортных нагрузок позволяет обеспечить нормативные транспортно-эксплуатационные показатели в условиях слабых оснований и увеличить срок службы покрытия лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

1. Чудинов С. А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
2. Восканянц К. Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Научные исследования. 2018. № 6. С. 23—25.
3. 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 промышленность. 2013. № 2 (158). С. 39—42.
4. 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. Vol. 817. P. 1—9. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Чудинов С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
6. 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.
7. 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. No. 40. P. 1873—1885. URL: <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>. Text. Image: electronic.

8. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. No. 20. P. 54—61.
9. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures / A. Elkhebu, A. Zainorabidin, A. Asadi [et al.] // *Soils Found*. 2019. No. 59. P. 2144—2154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>. Text. Image: electronic.
10. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl / V. B. Godoy, L. F. Tomasi, M. Benetti [et al.] // *Geotech. Geol. Eng.* 2023. No. 3. P. 1—15. URL: <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>. Text. Image: electronic.
11. 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. No. 5. P. 191—209. URL: <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>. Text. Image: electronic.
12. 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. No. 10. P. 6724. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>. Text. Image: electronic.
13. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age / D. Shen, X. Liu, X. Zeng [et al.] // *Constr. Build. Mater.* 2020. No. 244. P. 117874. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>. Text. Image: electronic.
14. Nezhad M. G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay // *Journal Rock. Mech. Geotech. Eng.* 2021. No. 13. P. 626—642. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>. Text. Image: electronic.

References

1. Chudinov S. A. *Reinforced soils in the construction of logging roads*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 174 p. (In Russ.).
2. Voskanyants K. E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction. *Scientific research*, 2018, no. 6, pp. 23—25. (In Russ.).
3. Lyshchik P. A., Plyshevsky S. V., Naumenko A. I. The use of a complex binder to strengthen the subgrade soils of forest roads. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2013, no. 2 (158), pp. 39—42 (In Russ.).
4. 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, vol. 817, pp. 1—9. doi: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Chudinov S. A. *Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.).
6. Chudinov S. A. Fiber cement soil mixture. Patent R. F., no. RU 2 785 742 C1, 2022. (In Russ.).
7. 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, no. 40, pp. 1873—1885. Available at: <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>. Text. Image: electronic.
8. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, no. 20, pp. 54—61.
9. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. [et al.]. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. *Soils Found*, 2019, no. 59,

- pp. 2144—2154. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>. Text. Image: electronic.
10. 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, no. 3, pp. 1—15. Available at: <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>. Text. Image: electronic.
 11. 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, no. 5, pp. 191—209. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>. Text. Image: electronic.
 12. 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, no. 10, pp. 6724. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>. Text. Image: electronic.
 13. 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, no. 244, pp. 117874. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>. Text. Image: electronic.
 14. Nezhad M. G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay. *Journal Rock. Mech. Geotech. Eng.*, 2021, no. 13, pp. 626—642. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>. Text. Image: electronic.