DOI: 10.58168/Forestry2025_501-511
УДК 630;691;625

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПЕРЕХОДНОГО ТИПА С ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ НА ДОРОГАХ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ И ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГАХ

А.М. Бургонутдинов[1], В.И. Клевеко[2], А.С. Сергеев[2]

[1]д.т.н, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия
[2]к.т.н, доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Аннотация.

Основу исследования составляет методология расчета дорожных одежд переходного типа для лесовозных дорог с применением геосинтетических прослоек, основанная на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). Численное моделирование напряженно-деформированного состояния, выполненное в среде PLAXIS 2D (метод конечных элементов), позволило получить массив данных из 414 расчетных серий. Этот массив, включающий 13 входных и 2 выходных переменных, послужил базой для обучения и валидации разработанной интеллектуальной нейронной сети. С помощью нейронной сети были выявлены весовые коэффициенты влияния входных параметров на величину выходных параметров, которые показали, что наибольшее значения на величину вертикальной деформации оказывают такие факторы как, модуль упругости грунта земляного полотна, толщина покрытия дорожной одежды и линейная жесткость геосинтетического материала, а для величины растягивающего усилия в геосинтетической прослойке наибольшее значения оказывают: модуль упругости грунта земляного полотна, линейная жесткость геосинтетического материала и толщина основания дорожной одежды. Результаты прогнозирования расчетов показали высокую точность прогноза выходных параметров с помощью созданной нейронной сети, средняя погрешность составила 9,24%. Таким образом созданная нейронная сеть позволяет достаточно точно прогнозировать величину вертикального перемещения на поверхности дорожной одежды, т.е. величину модуля упругости дорожной одежды и величину растягивающего усилия в армирующей прослойке.

Ключевые слова: автомобильные дороги, лесовозные дороги; геосинтетические армирующие материалы; дорожная одежда переходного типа, метод конечных элементов, интеллектуальная нейронная сеть, нагрузка, линейно-упругая модель.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR CALCULATION OF STRUCTURES OF TRANSITIONAL ROAD PAVEMENTS WITH A GEOSYNTHETIC INTERLAYER ON PUBLIC ROADS AND LOGGING ROADS

A.M. Burgonutdinov[1], V.I. Kleveko[2], A.S. Sergeev[2]

© Бургонутдинов А. М., Клевеко В. И., Сергеев А. С., 2025

[1]*Doctor of Engineering, Professor, Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*
[2]*Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*

Abstract. The study is based on a methodology for calculating transitional pavements for logging roads using geosynthetic interlayers, based on the use of artificial neural networks (ANN). Numerical modeling of the stress-strain state, performed in the PLAXIS 2D environment (finite element method), allowed us to obtain a dataset of 414 calculation series. This dataset, including 13 input and 2 output variables, served as the basis for training and validation of the developed intelligent neural network. Using the neural network, we identified weighting coefficients for the influence of input parameters on the value of output parameters. The results showed that such factors as the elastic modulus of the subgrade soil, the thickness of the pavement surface, and the linear stiffness of the geosynthetic material have the greatest influence on the magnitude of vertical deformation. For the tensile force in the geosynthetic interlayer, the following factors have the greatest influence: the elastic modulus of the subgrade soil, the linear stiffness of the geosynthetic material, and the thickness of the pavement base. The predictive calculation results demonstrated high accuracy in predicting output parameters using the developed neural network, with an average error of 9.24%. Thus, the developed neural network allows for a fairly accurate prediction of the magnitude of vertical displacement on the road surface, i.e., the elastic modulus of the road surface and the tensile force in the reinforcing layer.

Keywords: Highways, logging roads; geosynthetic reinforcing materials; transitional road surfaces, finite element method, intelligent neural network, load, linear elastic model.

Одной из основных статей затрат в общей себестоимости деловой древесины являются транспортные расходы, связанные с её доставкой от мест рубки к потребителям. Снижение транспортных расходов является актуальной задачей для всего лесопромышленного комплекса нашей страны. Одним из основных способов транспортировки деловой древесины является её вывоз автомобильным транспортом по зимним лесовозным дорогам. Такой способ транспортировки не требует строительства всесезонных дорог и является одним из самых экономичных способов. Однако в последнее время, в связи с потеплением климата, во многих регионах, время эксплуатации зимников снижается, что вызывает всё большую необходимость возведения всесезонных лесовозных дорог.

Строительство и эксплуатация лесовозных дорог всесезонного действия часто осложняется сложными инженерно-геологическими условиями. Низкая прочность грунтов в основаниях приводит к образованию колейности и других дефектов, ухудшающих транспортно-эксплуатационные показатели, что, в свою очередь, увеличивает стоимость перевозки древесины. Одним из эффективных методов повышения прочности земляного полотна является применение геосинтетических материалов, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями. Существующие нормативные методики расчета дорожных одежд с геосинтетикой, основанные на аналитических и эмпирических подходах, не всегда адекватно описывают сложные процессы, происходящие в конструкции. Хотя численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе PLAXIS доказало свою эффективность для таких расчетов [14-24], его доступность для большинства проектных организаций ограничена. В качестве альтернативы предлагается разработка инженерного метода на базе искусственной нейронной сети (ИНС), основанного на закономерностях, выявленных с помощью МКЭ. Предыдущие исследования [25] подтвердили возможность использования ИНС для прогнозирования вертикальных перемещений в конструкциях без геосинтетики с высокой точностью (погрешность $\leq 5\%$).

Настоящее исследование расширяет этот подход для дорожных одежд переходного типа лесовозных дорог с армирующими геосинтетическими прослойками. Моделирование методом МКЭ было выполнено в PLAXIS 2D с использованием следующих моделей материалов:

- Покрытие и основание: описаны линейно-упругой моделью (параметры: модуль упругости E, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}25$).
- Грунт земляного полотна: описан упругопластической моделью Мора-Кулона (параметры: модуль упругости E, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}35$, угол внутреннего трения φ, удельное сцепление C, угол дилатансии $\psi = 0$). Нагрузка от колеса моделировалась штампом круглой формы.

Для разработки ИНС была сформирована база данных на основе результатов МКЭ-моделирования. Входными параметрами сети являются тринадцать ключевых характеристик конструкции и материалов:

- Нагрузка от колеса расчётного автомобиля, Q.
- Диаметр отпечатка колеса, D.
- Толщина покрытия, H_1.
- Модуль упругости покрытия, E_1.
- Удельный вес покрытия, γ_1.
- Толщина основания, H_2.
- Модуль упругости основания, E_2.
- Удельный вес основания, γ_2.
- Удельное сцепление грунта, C.
- Угол внутреннего трения грунта, φ.
- Модуль деформации грунта, E_3.
- Удельный вес грунта, γ_3.
- Линейная жесткость геосинтетического материала, G.
- Выходными параметрами являются:
- Вертикальная осадка на поверхности дорожной одежды, S.
- Растягивающее усилие в армирующей прослойке, N.

Схема исследуемой конструкции дорожной одежды с геосинтетической прослойкой представлена на Рис. 1.

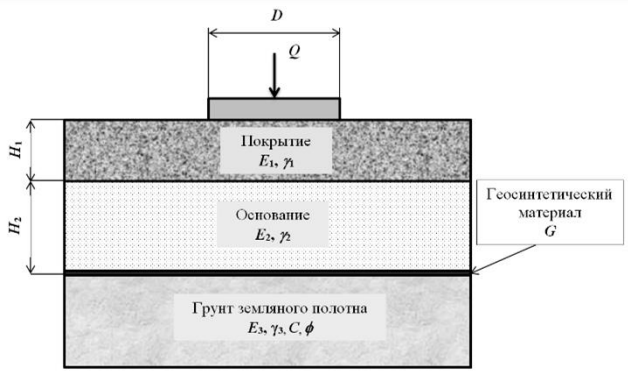


Рисунок 1. Расчетная схема дорожной одежды переходного типа с геосинтетической армирующей прослойкой

В основу разработки нейронной сети легла база данных, сгенерированная с помощью программы PLAXIS 2D. Объем выборки составил 414 расчетных случаев, результаты которых были занесены в таблицу Excel. В таблице 1 представлены диапазоны варьирования входных характеристик, применявшихся для обучения и последующей апробации модели.

Таблица 1 Диапазоны входных параметров нейронной сети для армированного основания

Параметры	Диапазон параметров
Входные параметры	
Нагрузка от колеса расчетного автомобиля, кН	50-65
Диаметр отпечатка колеса расчетного автомобиля, кН	0,2-0,6
Толщина покрытия, м	0,1-0,25
Модуль упругости покрытия, МПа	100-700
Удельный вес покрытия, кН/м^3	15-21
Толщина основания, м	0,15-0,4
Модуль упругости основания,	50-400
Удельный вес основания,	15-20
Линейная жесткость геосинтетического материала G	300-1800
Удельное сцепление грунта земляного полотна, кПа	0-35
Угол внутреннего трения грунта земляного полотна,	5-40
Модуль деформации грунта земляного полотна, МПа	2,5-35
Удельный вес грунта земляного полотна, кН/м^3	15-20

Описание разработанной искусственной нейронной сети. Методика разработки интеллектуальной нейронной сети, примененная в данном исследовании, подробно изложена в работе [25]. Для решения задачи сложной регрессии при расчете дорожных одежд была использована полносвязная нейронная сеть прямого распространения, способная эффективно прогнозировать различные характеристики конструкций.

Архитектура сети соответствует классической трехуровневой структуре, включающей входной, скрытый и выходной слои. В рамках данного исследования была обучена модель для прогнозирования вертикальных перемещений поверхности дорожного покрытия под воздействием колесной нагрузки расчетного автомобиля.

В результате разработана нейронная сеть с 13 входными параметрами и 2 выходными параметрами. Визуальное представление архитектуры модели приведено на рис. 2.

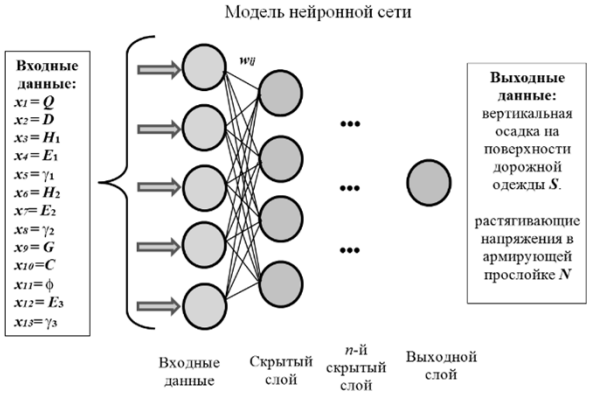


Рисунок 2. Модель нейронной сети

На рисунке 2 представлена схема искусственной нейронной сети, где: xi – числа, являющиеся исходными данными прогнозируемого процесса с весом связей w_{ij}. Вес связи w_{ij} это число, на которое умножается выходное значение предыдущего слоя. Нейроны скрытого и выходного слоя – это функции $f(u)$ и $t(u)$, где u – сумма входящих значений, умноженных на соответствующие веса связей w_{ij}. Функции $f(u)$ и $t(u)$, называются активационными, а параметры a_i и m_n – выходом активационных функций $f(u)$ и $t(u)$.

Архитектура представленной нейронной сети (рис. 2) характеризуется следующей организацией: входной слой содержит 5 нейронов, скрытый слой - 4 нейрона, выходной слой - 1 нейрон. Выходное значение сети является результатом всех вычислительных операций. Все нейроны смежных слоев соединены между собой, что определяет данную конфигурацию как полносвязную.

Следует отметить, что в практических задачах количество нейронов в слоях и количество скрытых слоев может варьироваться в зависимости от вычислительных ресурсов и целесообразности для конкретной задачи.

Искусственная нейронная сеть представляет собой математическую модель, воспроизводящую принципы обработки информации в биологических нейронных структурах. Данная система состоит из иерархически организованных слоев взаимосвязанных вычислительных единиц (нейронов), включающих входной, один или несколько скрытых и выходной слои.

Каждый искусственный нейрон выполняет последовательное преобразование входных сигналов: умножение на весовые коэффициенты, суммирование полученных произведений и применение нелинейной активационной функции. Именно введение нелинейности через активационные функции позволяет сети моделировать сложные зависимости в данных.

Поведение и вычислительные возможности сети определяются совокупностью всех весовых коэффициентов и параметров активационных функций. Процесс настройки этих параметров, известный как обучение сети, является обязательным предварительным этапом перед использованием сети для прогнозирования.

Обучение нейронной сети представляет собой итеративный процесс оптимизации весовых коэффициентов и параметров активационных функций. Данный процесс направлен на минимизацию функции потерь, количественно оценивающей расхождение между прогнозами сети и эталонными значениями из обучающей выборки. Обучающая выборка объемом 414 примеров была сформирована на основе базы данных расчетных параметров дорожных одежд и состоит из пар "входные данные - целевые значения".

Современные алгоритмы обучения, включая методы второго порядка, использующие информацию о кривизне функции потерь, осуществляют постепенную корректировку параметров сети. Несмотря на вычислительную сложность процесса, особенно для крупных сетей, после обучения модель приобретает способность к прогнозированию на новых данных.

Важной особенностью нейронных сетей является их характеристика "чёрного ящика" - сложность интерпретации внутренних представлений и преобразований данных. Эта нелинейность, обеспечивающая возможность выявления сложных зависимостей, одновременно ограничивает прозрачность принятия решений, что в некоторых случаях может требовать применения альтернативных методов.

Для реализации нейронной сети использовался язык программирования Python с применением библиотек TensorFlow и Keras. Архитектура сети оптимизирована с помощью байесовских методов с учетом:

- анализа конфигураций с двумя и тремя скрытыми слоями
- поддержания соотношения параметров модели к объему данных 2,5:1
- предотвращения явлений переобучения и избыточности модели

В результате оптимизации была определена оптимальная архитектура сети, обеспечивающая баланс между вычислительной эффективностью и прогностической способностью.

Результаты и их обсуждение. После завершения обучения нейронной сети были получены прогнозные значения вертикальных деформаций поверхности дорожного покрытия. Для количественной оценки точности прогнозирования механических характеристик грунтов был построен график сопоставления предсказанных и фактических значений (рис. 3).

Достоверность результатов оценивалась путем проведения 10 независимых прогонов модели. Полученные данные (таблица 3) демонстрируют высокую сходимость результатов с минимальным разбросом показателей, что подтверждает стабильность работы нейронной сети. Средняя величина погрешности прогнозирования не превышает 5%, что свидетельствует о удовлетворительной точности модели для практического применения в расчетах дорожных одежд.

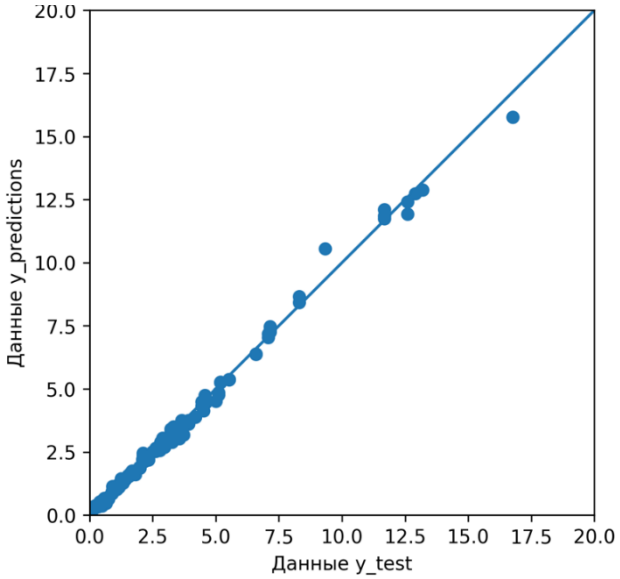


Рисунок 3. Пример результатов работы нейронной сети

Таблица 3 Результаты точности прогнозирования нейронной сети

№ расчета	Точность прогнозирования, %
1	90,76
2	92,06
3	90,11
4	89,60
5	91,77
6	88,27
7	91,70
8	91,07
9	90,73
10	91,52
Среднее значение	90,76

Полученные результаты показали, что средняя погрешность прогнозирования составила 9,24%, что является приемлемым значением (менее 10%). Данный показатель подтвердил адекватность и работоспособность разработанной нейронной сети.

Особое внимание в исследовании было уделено анализу значимости входных параметров модели. Для количественной оценки влияния различных факторов на выходные параметры, особенно учитывая нелинейный характер процессов, был применен метод SHAP (SHapley Additive exPlanations), позволяющий интерпретировать прогнозы сложных моделей машинного обучения.

Результаты анализа важности признаков, полученные с использованием метода SHAP, представлены в таблице 4. Эти данные позволяют определить степень влияния каждого входного параметра на прогнозируемые характеристики и выявить наиболее значимые факторы, определяющие поведение модели.

Таблица 4 Итоговая таблица влияния входных параметров на величину вертикального перемещения *S* и усилия в армирующей прослойке *N*

№ п/п	Входной параметр	Ранг		Среднее значение веса связи	
		S	***N***	***S***	***N***
1	*Q*, кН	11	8	0,146	0,071
2	*D*, м	8	9	0,289	0,062
3	H_1, м	2	10	0,605	0,054
4	E_1, кПа	9	5	0,286	0,118
5	$\gamma 1$, кН/м^3	4	6	0,494	0,113
6	H_2, м	6	3	0,350	0,170
7	E_2, кПа	10	11	0,194	0,050
8	γ_2, кН/м^3	5	7	0,475	0,072
9	*G*, кН/м^2	3	2	0,571	0,293
10	*C*, кПа	13	12	0,077	0,028
11	*f*, град	12	13	0,116	0,015
12	E_3, кПа	1	1	1,269	0,309
13	γ_3, кН/м^3	7	4	0,330	0,170

Проведенный анализ влияния входных параметров на выходные характеристики для расчета дорожных одежд переходного типа с геосинтетическими прослойками выявил следующие закономерности:

Наибольшее влияние на оба выходных параметра оказывает модуль упругости грунта земляного полотна (E_3). При этом значимость остальных параметров варьируется в зависимости от конкретной выходной характеристики:

Для вертикального перемещения (S):

- Второй по значимости параметр - толщина покрытия (H_1)
- Третий параметр - линейная жесткость геосинтетического материала (G)

Для усилия в армирующей прослойке (N):

- Второе место занимает линейная жесткость геосинтетического материала (G)
- Третье место - толщина основания дорожной одежды (H_2)

Полученные результаты демонстрируют различный характер влияния исследуемых параметров на различные выходные характеристики конструкции, что необходимо учитывать при проектировании дорожных одежд переходного типа.

Заключение. Разработанная интеллектуальная нейронная сеть демонстрирует возможность определения расчетных параметров дорожной одежды с удовлетворительной точностью. Модель обеспечивает прогнозирование вертикальной осадки поверхности под колесной нагрузкой и растягивающих усилий в армирующей прослойке со средней погрешностью 9,24%, не превышающей пороговое значение в 10%.

Анализ чувствительности модели выявил ключевые факторы влияния на выходные параметры. Наибольшую значимость проявляют: модуль деформации грунта земляного полотна (E_3), линейная жесткость геосинтетического материала (G), а также толщины

конструктивных слоев покрытия и основания.

Для дальнейшего повышения точности прогнозирования рекомендуется расширение объема обучающей выборки, с преимущественным добавлением данных по параметрам, оказывающим наибольшее влияние на выходные характеристики. Это позволит улучшить обобщающую способность модели и повысить достоверность прогнозных расчетов.

Список литературы

1. Клевеко В.И. Определение физико-механических характеристик грунтов основания временной лесной дороги и выявление причин образования колейности :/ В.И. Клевеко, Е.А. Кунгурова //Деревообрабатывающая промышленность. –2024. –№ 1. –С. 3-9.

2. Бургонутдинов А.М. Исследование прочностных характеристик грунта лесных дорог :/ А.М. Бургонутдинов, В.И. Клевеко // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 12 (102). – С. 65-69.

3. Солодянкина А.А., Лаптев В.А. Использование геосинтетических материалов при строительстве лесовозных дорог // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2022. Т. 1. С. 254-260; EDN: LZYVSE

4. Сушков С.И., Князев А.В., Востриков Д.С. К вопросу использования геосинтетических материалов в строительстве лесных автомобильных дорог//Воронежский научно-технический Вестник. 2018. Т. 1. № 1 (23). С. 15-21; EDN: YUUKAN

5. Тумашик И.И., Вырко Н.П., Лащенко А.П., Лось А.М. Усиление лесных дорог геосинтетическими материалами по методу грунт в оболочке // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2007. №18. С. 60-63; EDN: TZQKQX

6. Клевеко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 114-123.

7. Бургонутдинов А.М. Применение геосинтетических материалов для временных лесовозных дорог :/ А.М. Бургонутдинов, В.И. Клевеко, В.Э. Рубенков // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск. – 2024. – С. 136-140.

8. Клевеко В.И., Бургонутдинов А.М. Существующие виды армированных оснований лесовозных автомобильных дорог :/ В.И. Клевеко, А.М. Бургонутдинов //Теория и практика современной науки. –2022. –№ 11 (89). – С. 72-76.

9. Бурмистрова О.Н. Экспериментальные исследования армированных глинистых оснований лесовозных дорог :/ О.Н. Бурмистрова, А.М. Бургонутдинов, В.И. Клевеко //Аграрный научный журнал. –2023. – № 10. – С. 147-153.

10. Клевеко В.И. Натурные исследования армированных грунтовых оснований лесных дорог :/ В.И. Клевеко, А.М. Бургонутдинов //Высокие технологии и инновации в науке. Сборник статей международной научной конференции. Санкт-Петербург. – 2022. – С. 18-22.

11. Клевеко В.И. Комплексные исследования напряженно-деформированного состояния активной зоны армированных оснований лесных дорог :/ В.И. Клевеко, А.М. Бургонутдинов // Научные исследования в современном мире. Теория и практика. Сборник статей международной научной конференции. Санкт-Петербург. –2022. –С. 50-54.

12. Kleveko V.I. Model and field experimental studies of reinforced clay bases//Journal of Physics: Conference Series. "Deep Foundations and Geotechnical Problems of Territories, DFGC 2021". – 2021. –P. 012032.

13. Клевеко В.И. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния армированных грунтовых оснований в глинистых грунтах // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. –2014. –№ 4 (30). –С. 188-197.

14. Клевеко В.И. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчетов по методу конечных элементов :/ В.И. Клевеко, Д.А. Татьянников, Е.О. Драчева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 170-179.

15. Клевеко В.И. Сравнение результатов численного и аналитического методов расчета дорожной одежды переходного типа лесных дорог : / В.И. Клевеко, В.Э. Рубенков //Современные проблемы развития Европейского Севера - 2024. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ухта. – 2024. – С. 28-31.

16. Рубенков В.Э. Расчет дорожной одежды временных дорог различного назначения с геосинтетической прослойкой : / В.Э. Рубенков, В.И. Клевеко //Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2024. – Т. 1. – С. 286-290.

17. Бурмистрова О.Н., Кручинин И.Н., Клевеко В.И. Оценка напряжённо-деформированного состояния дорожной одежды лесных дорог, усиленной геосинтетическими оболочками // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 56-63. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.2.56; EDN: DIWXCD

18. Xu Y.F., Huang J. Case Study on Earth Reinforcement Using Soilbags // Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics – Shanghai, China, 2008. – pp. 597-602. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0_111

19. Bo-Bo X., Bin T., Xiao-chun L. A New Structure of Geotextile Called Soil Nets for Reinforcement [Электронный документ] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. URL: https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/9518593/(accessed 13.01.2024). DOI: https://doi.org/10.1155/2017/9518593.

20. Бурмистрова О.Н., Пластинина Е.В., Воронина М.А. Обоснование расчетных схем и математических моделей нежестких дорожных одежд, армированных геосинтетическими материалами // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2012. № 1 (15). С. 45-51; EDN: QBHYOH

21. Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Исследование армированной дорожной одежды путем численного моделирования // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2011. С. 36-40. EDN: TNMRGR

22. Клевеко В.И., Рубенков В.Э. Сравнение результатов численного и аналитического методов расчета дорожной одежды переходного типа лесных дорог // Современные проблемы развития Европейского Севера - 2024. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ухта, 2024. С. 28-31. EDN: FWZGCY

23. Применение нейронных сетей для расчета конструкций дорожных одежд переходного типа на лесных дорогах: монография / В. В. Сорочан, Н. П. Гаврилюк, Ю. А. Царев, В. И. Клевеко; Гуманитар. нац. исслед. ин-т «Нацразвитие». - Санкт-Петербург : Нацразвитие, 2025. - С. 188-198. - URL: http://natsrazvitie.ru/monografii. - Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-00213-429-8.

References

1. Kleveko V.I. Determination of the physico-mechanical characteristics of the soils of the base of a temporary forest road and identification of the causes of rutting :/ V.I. Kleveko, E.A. Kungurova //The woodworking industry. -2024. –No. 1. –pp. 3-9.

2. Burgonutdinov A.M. Investigation of the strength characteristics of the soil of forest roads :/ A.M. Burgonutdinov, V.I. Kleveko // Theory and practice of modern science. -2023. – № 12 (102). – Pp. 65-69.

3. Solodyankina A.A., Laptev V.A. The use of geosynthetic materials in the construction of logging roads // Modern technologies in construction. Theory and practice. 2022. Vol. 1. pp. 254-260; EDN: LZYVSE

4. Sushkov S.I., Knyazev A.V., Vostrikov D.S. On the use of geosynthetic materials in the construction of forest highways//Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2018. Vol. 1. No. 1 (23). pp. 15-21; EDN: YUUKAN

5. Tumashik I.I., Vyrko N.P., Lashchenko A.P., Los A.M. Reinforcement of forest roads with geosynthetic materials using the soil-in-shell method // Actual problems of the forest complex. 2007. No. 18. pp. 60-63; EDN: TZQKQX

6. Kleveko V.I. Application of geosynthetic materials in road construction in the Perm region //Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. - 2013. – No. 1. – pp. 114-123.

7. Burgonutdinov A.M. Application of geosynthetic materials for temporary logging roads :/ A.M. Burgonutdinov, V.I. Kleveko, V.E. Rubenkov // Forest engineering, materials science and design. Proceedings of the 88th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation). Minsk, 2024, pp. 136-140.

8. Kleveko V.I., Burgonutdinov A.M. Existing types of reinforced bases of logging roads :/ V.I. Kleveko, A.M. Burgonutdinov //Theory and practice of modern science. -2022. –№ 11 (89). – Pp. 72-76.

9. Burmistrova O.N. Experimental studies of reinforced clay bases of logging roads : O.N. Burmistrova, A.M. Burgonutdinov, V.I. Kleveko //Agrarian Scientific Journal. -2023. – No. 10. – pp. 147-153.

10. Kleveko V.I. Field studies of reinforced soil bases of forest roads :/ V.I. Kleveko, A.M. Burgonutdinov //High technologies and innovations in science. Collection of articles of the international scientific conference. Saint Petersburg, 2022, pp. 18-22.

11. Kleveko V.I. Comprehensive studies of the stress-strain state of the core of reinforced forest road bases :/ V.I. Kleveko, A.M. Burgonutdinov // Scientific research in the modern world. Theory and practice. Collection of articles of the international scientific conference. Saint Petersburg. -2022. –pp. 50-54.

12. Kleveko V.I. Model and field experimental studies of reinforced clay bases//Journal of Physics: Conference Series. "Deep Foundations and Geotechnical Problems of Territories, DFGC 2021." – 2021. –P. 012032.

13. Kleveko V.I. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced soil bases in clay soils // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. -2014. –№ 4 (30). – Pp. 188-197.

14. Kleveko V.I. Comparison of model stamp tests and calculations using the finite element method :/ V.I. Kleveko, D.A. Tatiannikov, E.O. Dracheva // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. - 2014. – No. 4. – pp. 170-179.

15. Kleveko V.I. Comparison of the results of numerical and analytical methods for calculating the road surface of the transitional type of forest roads : / V.I. Kleveko, V.E. Rubenkov //Modern problems of the development of the European North - 2024. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Ukhta. – 2024. – pp. 28-31.

16. Rubenkov V.E. Calculation of the road surface of temporary roads for various purposes with a geosynthetic layer : / V.E. Rubenkov, V.I. Kleveko //Modern technologies in construction. Theory and practice. – 2024. – Vol. 1. – pp. 286-290.

17. Burmistrova O.N., Kruchinin I.N., Kleveko V.I. Assessment of the stress-strain state of the road surface of forest roads reinforced with geosynthetic shells // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Environmental management. 2024. No. 2 (62). pp. 56-63. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.2.56; EDN: DIWXCD

18. Xu Y.F., Huang J. Case Study on Earth Reinforcement Using Soilbags // Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics – Shanghai, China, 2008. – pp. 597-602. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0_111

19. Bo-Bo X., Bin T., Xiao-chun L. A New Structure of Geotextile Called Soil Nets for Reinforcement [Electronic document] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. URL: https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/9518593/(accessed 13.01.2024). DOI: https://doi.org/10.1155/2017/9518593.

20. Burmistrova O.N., Plastinina E.V., Voronina M.A. Substantiation of calculation schemes and mathematical models of non-rigid road clothes reinforced with geosynthetic materials // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Environmental management. 2012. No. 1 (15). pp. 45-51; EDN: QBHYOH

21. Martynov E.A., Litvinov N.N. Investigation of reinforced pavement by numerical modeling // Development of the road transport complex and construction infrastructure based on rational use of natural resources. Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. 2011. pp. 36-40. EDN: TNMRGR

22. Kleveko V.I., Rubenkov V.E. Comparison of the results of numerical and analytical methods for calculating the road surface of the transitional type of forest roads // Modern problems of the development of the European North - 2024. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Ukhta, 2024. pp. 28-31. EDN: FWZGCY

23. The use of neural networks for calculating transitional-type road clothing structures on forest roads: a monograph / V. V. Sorochan, N. P. Gavril, Yu. A. Tsarev, V. I. Kleveko; Humanities. research. in-t "National development". - St. Petersburg : National Development, 2025. - pp. 188-198. - URL: http://natsrazvitie.ru/monografii - Title page. the screen. - ISBN 978-5-00213-429-8.