

Нейронечеткая сеть для расчета стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта

С.А. Чудинов^a, И.А. Карабутова^b

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a chudinova@m.usfeu.ru, ^b karabutova.ia@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0802-909X>

Статья поступила 24.01.2024, принята 12.02.2024

Высокие нагрузки от лесотранспорта и сложные природные условия лесной зоны требуют разработки эффективных проектных решений, обеспечивающих нормативные транспортно-эксплуатационные показатели в течение всего срока службы при условии минимальной стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог. С учетом данных требований эффективной технологией является строительство лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта. В отличие от традиционно используемых при строительстве инертных каменных материалов, фиброцементогрунтовые слои устраиваются из местного природного грунта с использованием незначительных объемов добавок: портландцемента и фиброволокна, что уменьшает транспортные расходы на их доставку и общую стоимость строительно-монтажных работ. Поэтому технология строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта является экономически эффективной, в особенности в районах, отдаленных от мест производства инертных каменных материалов. Учитывая значительную площадь лесосырьевой базы и конъюнктуру рынка поставщиков дорожно-строительных материалов, на стадии принятия экономически эффективных проектных решений требуется разработка интеллектуальной системы для определения стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта, в зависимости от различного расстояния по доставке фиброволокна и портландцемента, что и составило цель настоящей работы. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) обоснование входных и выходных переменных для интеллектуальной системы; 2) обоснование типа интеллектуальной системы; 3) разработка обучающих выборок для настройки нейросети; 4) программная реализация нейронной сети в среде Matlab; 4) обучение нейронной сети и проверка достоверности на тестовых примерах. Результатом исследования является разработанная нейронечеткая сеть для расчета стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта в зависимости от дальности возки основных компонентов — портландцемента и фиброволокна в диапазоне расстояний от 30 до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE = 0,144 %. Практическое применение результатов предусмотрено для технико-экономического обоснования конструкций дорожных одежд из фиброцементогрунтов.

Ключевые слова: интеллектуальная система; фиброцементогрунт; нейронечеткая сеть ANFIS; лесовозная автомобильная дорога; стоимость строительства.

Neuro-fuzzy network for calculating the cost of constructing a logging road made of fiber cement soil

S.A. Chudinov^a, I.A. Karabutova^b

Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

^a chudinova@m.usfeu.ru, ^b karabutova.ia@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0802-909X>

Received 24.01.2024, accepted 12.02.2024

High loads from timber transport and difficult natural conditions of the forest zone require the development of effective design solutions that ensure standard transport and operational indicators throughout the entire service life, subject to the minimum cost of construction of timber roads. Taking into account these requirements, an effective technology is the construction of logging roads from fiber cement soil. Unlike inert stone materials traditionally used in construction, fiber cement soil layers are made from local natural soil using small amounts of additives: Portland cement and fiber, which reduces transportation costs for their delivery and the total cost of construction and installation work. Therefore, the technology for constructing logging roads from fiber cement soil is economically effective, especially in areas remote from the production sites of inert stone materials. Taking into account the significant area of the timber resource base and the market conditions for suppliers of road building materials, at the stage of making cost-effective design decisions, the development of an intelligent system is required to determine the cost of constructing a logging road from fiber cement soil, depending on the different distances for the delivery of fiber and Portland cement, which is the purpose of this work. To achieve the goal, the following tasks are solved: 1) justification of the input and output variables for the intelligent system; 2) justification of the type of intelligent system; 3) development of training samples for setting up the neural network; 4) software implementation of a neural network in the Matlab environment; 4) training the neural network and checking its validity using test examples. The result of the study is a developed neuro-fuzzy network for calculating the cost of constructing 1 km of category III logging highway from fiber cement soil, depending on the distance of transportation of the main components: Portland cement and fiber in the distance range from 30 km to 500 km with an average absolute error MAPE = 0.144 %. The practical application of the results is provided for the feasibility study of road pavement structures made of fiber cement soils.

Keywords: intelligent system; fiber cement soil; neural network *ANFIS*; logging road; construction cost.

Введение. Эффективность функционирования лесозаготовительной отрасли зависит от развития и качественного состояния транспортной инфраструктуры, в том числе лесовозных автомобильных дорог. В работах [1–3] проведены исследования технологии строительства автомобильных дорог из фиброцементогрунтов, которая позволяет обеспечить в течение всего срока службы требуемые транспортно-эксплуатационные показатели с минимальными затратами на строительство конструкций дорожных одежд.

Фиброцементогрунт — это композиционный материал, состоящий из смешанных в определенных пропорциях местного грунта, портландцемента, волокон фибры и воды, обеспечивающих в проектном возрасте требуемую марку по прочности и коэффициент морозостойкости в зависимости от области применения в слоях дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог по ГОСТ Р 70452-2022 [4; 5]. Благодаря дисперсному армированию цементогрунтовой матрицы распределенными волокнами фибры фиброцементогрунт обладает свойствами повышенной прочности, трещиностойкости и морозостойкости по сравнению с цементогрунтом [6–8]. Поэтому фиброцементогрунт особенно эффективно использовать для строительства лесовозных автомобильных дорог в сложных условиях лесной зоны, характеризующихся слабыми основаниями, повышенной влажностью грунтов и высокими нагрузками от лесотранспорта.

Благодаря использованию местного грунта в качестве основного компонента укрепленных грунтов строительство дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта экономически эффективно и в основном зависит от стоимости добавок и транспортных затрат на доставку портландцемента и фиброволокна [9–11]. В связи с тем, что места производства портландцемента и фиброволокна расположены неравномерно по территории субъектов Российской Федерации, сметная стоимость строительства дорож-

ных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в значительной степени зависит от расстояния по доставке данных добавок.

Таким образом, разработка интеллектуальной системы по расчету сметной стоимости строительства дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта в зависимости от расстояния по доставке портландцемента и фиброволокна является актуальной.

Цель настоящей работы заключается в разработке нейронечеткой сети для расчета стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта с учетом различного расстояния по доставке портландцемента и фиброволокна на примере Свердловской области.

Задачи настоящих исследований включают:

1. Обоснование входных и выходной переменных для интеллектуальной системы.
2. Обоснование типа интеллектуальной системы.
3. Разработка обучающих выборок для настройки нейронной сети.
4. Программную реализацию нейронной сети в среде *Matlab*.
5. Обучение нейронной сети и проверка достоверности на тестовых примерах.

Объекты и методы исследования. Исследование проводилось на основании расчета объемов работ по строительству 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта в условиях Свердловской области. Конструирование и расчет дорожной одежды выполнены в соответствии с ПНСТ 542-2021 [12] в программном комплексе «Кредо Радон 4.2» («Кредо-Диалог» СП ООО, Минск). Параметры исходных данных приведены в табл. 1, прочностные характеристики конструкции дорожной одежды — в табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные для расчета дорожной одежды из фиброцементогрунта

Наименование показателя	Значение показателя
Дорожно-климатическая зона	2
Схема увлажнения рабочего слоя	2
Количество расчетных дней в году, <i>дней</i>	140
Глубина промерзания, <i>см</i>	200
Категория дороги	III-л
Количество полос движения	1
Тип конструкции дорожной одежды	Переходный
Срок службы покрытия, <i>лет</i>	5
Межремонтный срок покрытия, <i>лет</i>	3
Коэффициент надежности	0,82
Ширина проезжей части, <i>м</i>	5,5
Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий
Расчетная влажность грунта, <i>доли ед.</i>	0,710
Нормативная статистическая нагрузка на ось, <i>кН</i>	117,70
Давление в шинах, <i>МПа</i>	0,60
Диаметр штампа, <i>см</i>	40,29
Расчетное число приложений на полосу приведенной нагрузки на последний год службы, <i>ед./сут.</i>	398,92

Таблица 2. Прочностные характеристики конструкции дорожной одежды из фиброцементогрунта

Номер слоя	Наименование материала слоя	Расчетная толщина слоя, см	Общий модуль упругости по слоям, МПа	Показатель прочности:		Предельное активное напряжение сдвига в слое, МПа	Расчетное активное напряжение сдвига, МПа
				Критерий	Расчетное значение коэффициента прочности		
1	Фиброцементогрунт марки М60 А, ГОСТ 70452-2022	63	211	–	–	–	–
2	Суглинок легкий	–	40	сдвиг	0,88	0,01022	0,01165
Суммарная толщина конструкции дорожной одежды		63	–				

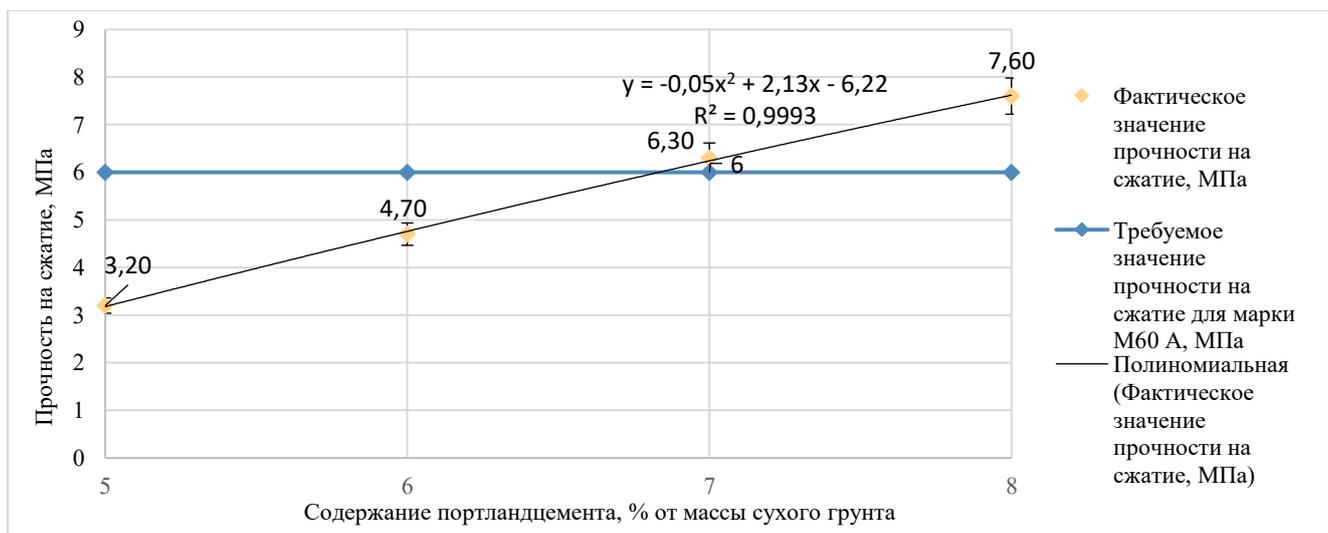
Состав фиброцементогрунта марки М60 А с коэффициентом морозостойкости 0,91 при 15 циклах замораживания-оттаивания для II дорожно-климатической зоны подобран в лабораторных условиях на аттестованном испытательном оборудовании в соответствии с ГОСТ 70452-2022 [5] в следующем соотношении компонентов: портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [13] — 7 % от массы сухого грунта; фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области — 1,5 % от массы сухого грунта. Оптимальное содержание базальтового фиброволокна для достижения максимальных прочностных показателей фиброцементогрунта получено на основе предварительных лабораторных исследований и соответствует 1,5 % от массы сухого грунта. Добавка воды производилась до оптимальной

влажности фиброцементогрунтовой смеси в количестве 16 % от массы сухого грунта. Приготовление фиброцементогрунтовой смеси производилось на основе природного грунта — суглинка тяжелого песчаного (табл. 3), взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области. Результаты лабораторных исследований по подбору оптимального состава фиброцементогрунтовой смеси для достижения нормативных прочностных показателей, представлены на рис. 1, 2.

На основании полученных параметров конструкции дорожной одежды из фиброцементогрунта произведен расчет объемов работ на строительство лесовозной автомобильной дороги протяженностью 1 км III-л категории (табл. 4).

Таблица 3. Характеристика природного грунта для приготовления фиброцементогрунтовой смеси

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

**Рис. 1.** Результаты лабораторных исследований прочности на сжатие фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента

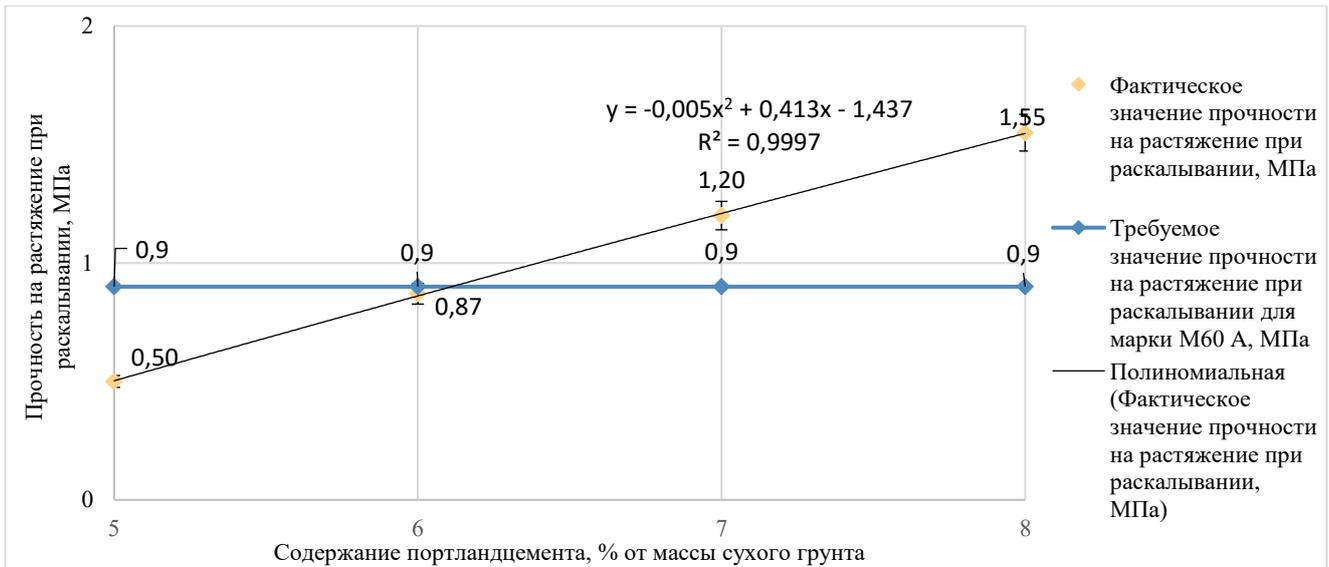


Рис. 2. Результаты лабораторных исследований прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента

Таблица 4. Объемы работ на строительство дорожной одежды из фиброцементогрунта

Наименование работ	Единицы измерения	Объем
Разработка грунта 2-й группы бульдозером мощностью 79 кВт с перемещением до 10 м	м ³	2 310
Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161 122,5 кг; масса базальтового фиброволокна = 62 658,75 кг)	м ²	5 500
Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161 122,5 кг; масса базальтового фиброволокна = 62 658,75 кг)	м ²	5 500
Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161 122,5 кг; масса базальтового фиброволокна = 62 658,75 кг)	м ²	5 500

Расчет сметной стоимости строительства дорожной одежды из фиброцементогрунта произведен базисно-индексным методом с применением федеральной сметно-нормативной базы ФСНБ-2001 в редакции 2020 г. (с изменениями 1–9) [14] в программе Гранд-Смета в соответствии с Методикой определения сметной стоимости строительства [15], в текущем уровне цен на III квартал 2023 г., в зависимости от различных вариантов транспортно-логистической схемы доставки материалов, портландцемента и фиброволокна. Для условий Свердловской области приняты следующие параметры доставки материалов от места их производства до объекта строительства лесовозной автомобильной дороги:

- портландцемент: 30 км; 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500 км;
- базальтовое фиброволокно: 30 км; 100; 200; 300; 400; 500 км.

В расчет приняты следующие стоимости дорожно-строительных материалов в текущем уровне цен:

- портландцемент: 10 тыс. р. за 1 т;
- базальтовое фиброволокно (фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит): 3 тыс. р. за 1 т.

Обоснование входных и выходной переменных для нейронечеткой сети. Ориентируясь на использование аппарата современных интеллектуальных систем и на основании постановки задачи в содержательном

виде, можно определить входные и выходную переменные задачи.

Входные переменные. В качестве входных переменных определены следующие параметры:

- расстояние доставки портландцемента, км;
- расстояние доставки фиброволокна, км.

Выходная переменная. Выходной переменной принимается стоимость устройства дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги.

Формально постановка задачи определения сметной стоимости устройства дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги запишется в виде:

$$Cost = f(PortlandDistance, FibraDistance) \quad (1)$$

Обоснование типа интеллектуальной системы. В настоящее время создано много различных типов интеллектуальных систем, которые основаны на различных концепциях [16]. Например, большое распространение получили нечеткие системы, основанные на базах правил. Другая концепция включает нейронные сети. Каждый вид интеллектуальных систем имеет свои преимущества и недостатки. Например, в нечеткой системе используется методика нечеткого вывода с применением базы правил и лингвистических переменных. В нейронных сетях предусмотрено соединение элементов по типу нервной системы, состоящей из нейронов. Для объединения преимуществ обоих типов была создана адаптивная нейронечеткая сеть *ANFIS (Adaptive*

Network Neuron Fuzzy Interference). Специфика задачи заключается в некоторой неопределенности входных и выходных параметров. Поэтому нейронечеткая адаптивная сеть *ANFIS* будет в большей степени подходить для решения задачи определения стоимости устройства дорожной одежды в зависимости от факторов, величина которых принимает значения из некоторого диапазона.

Программная реализация нейронной сети в Matlab. Для создания сети необходимо подготовить

обучающие выборки. Данные для входных параметров в виде обучающих выборок были подготовлены на основании результатов расчета сметной стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта в зависимости от различных параметров доставки портландцемента и базальтового фиброволокна от места их производства до объекта производства строительно-монтажных работ. В табл. 5 приведены результаты расчетов в виде фрагмента обучающих выборок.

Таблица 5. Фрагмент обучающих выборок нейронной сети

Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, р.
30	30	9 458 705,20
50	30	9 504 887,86
100	30	9 620 134,87
150	30	9 735 465,65
200	30	9 850 796,58
250	30	9 959 757,32
300	30	10 068 718,25
350	30	10 177 678,99
400	30	10 286 639,90
450	30	10 395 600,65
500	30	10 504 561,40
30	100	9 521 483,28
50	100	9 567 665,94
100	100	9 682 912,96
150	100	9 798 243,73

Для реализации нейронной сети использована среда *Neuro-Fuzzy Designer* приложения *Matlab*.

Пакет *Neuro-Fuzzy Designer* позволяет выполнять обучение методом обратного распространения ошибки, основным назначением которого является настройка всех слоев многослойной структуры путем изменения весов промежуточных слоев гибридным методом, который представляет собой комбинацию методов наименьших квадратов и обратного распространения ошибки.

В условиях решения нашей задачи задано 10 эпох обучения, поэтому для настройки параметров используется гибридный метод обучения.

На основании обучающей выборки подготовленных данных создается файл с форматом *FibraCost.txt* (рис. 3, а). Данные представлены в виде матрицы, причем выходной параметр располагается в последнем столбце.

Затем исходные данные загружаются в приложение (рис. 3, б). Задается методика нечеткого вывода для выходной переменной методом Сугено (рис. 3, в). После подгрузки исходных данных выбираются параметры исходных переменных и задаются треугольные функции принадлежности для терм-множеств входных и выходной лингвистических переменных (рис. 3, г). Сгенерированная система нечеткого вывода приведена на рис. 3, д.

Запускается процедура обучения сети (рис. 3, е). Процесс обучения отображается в командном окне *Matlab* (рис. 3, ж).

Проверка адекватности настройки нейронной сети. Для определения адекватности необходимо определить точность настройки нейронной сети. Точность является показателем качества модели временного ряда, которая представляет результат процесса его моделирования.

Проверка модели на адекватность ее работы в среде *Matlab* выполняется в процедуре *RuleViewer* (рис. 4), где настроены входные значения и установлены соответствующие выходные данные каждого нечеткого правила. Настройка сети выполнена корректно, если полученные выходные значения соответствуют обучающим данным.

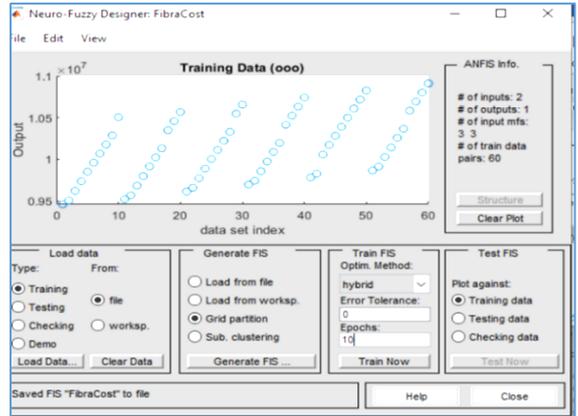
На рис. 4 для заданных исходных данных *PortlandDistance = 30*; *FibraDistance = 30* получено значение *Cost = 9 460* тыс. р., которое отличается от заданного — *9 458,7052* тыс. р. на величину менее 1 %.

Расчет абсолютной ошибки настройки нейронной сети с использованием процедуры *RuleViewer* для каждой выборки исходных данных показал точность выполненной настройки 99,985 % (средняя абсолютная ошибка настройки нейронной сети *MAPE = 0,015* %).

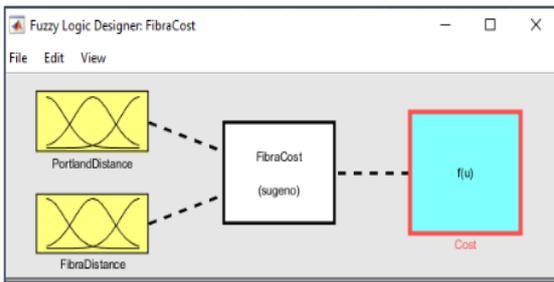
*FibraCost.txt – Блокнот

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
30	30	9458705.20		
50	30	9504887.86		
100	30	9620134.87		
150	30	9735465.65		
200	30	9850796.58		
250	30	9959757.32		
300	30	10068718.25		
350	30	10177678.99		
400	30	10286639.90		
500	30	10504561.40		
30	100	9521483.28		
50	100	9567665.94		
100	100	9682912.96		
150	100	9798243.73		
200	100	9913574.66		
250	100	10022535.41		

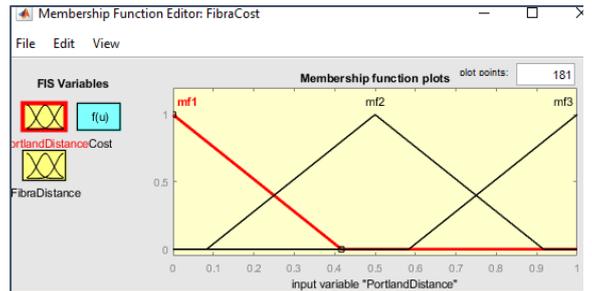
а)



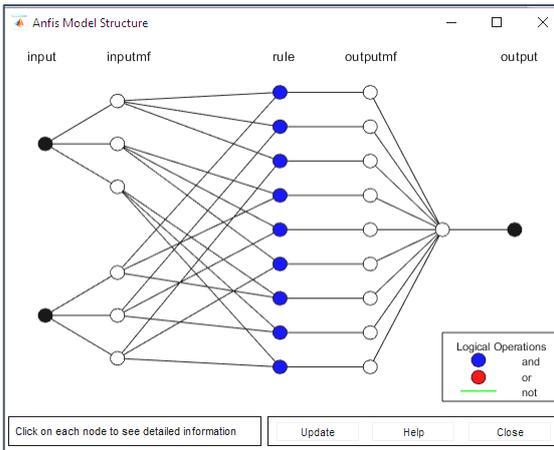
б)



в)



г)



д)



е)

```

Command Window

Start training ANFIS ...

 1  1801.29
 2  1798.27

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Minimal training RMSE = 1798.272109

ANFIS info:
Number of nodes: 35
Number of linear parameters: 9
Number of nonlinear parameters: 18
Total number of parameters: 27
Number of training data pairs: 60
Number of checking data pairs: 0
Number of fuzzy rules: 9

Start training ANFIS ...

 1  1798.27
 2  1795.73

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Minimal training RMSE = 1795.730988
    
```

ж)

Рис. 3. Процедура создания нейронечеткой сети в системе Matlab: а — обучающая выборка в формате .txt; б — загрузка данных; в — задание методики нечеткого вывода; г — переменная PortlandDistance; д — генерация нейронной сети; е — отображение процесса обучения; ж — процесс обучения нейронечеткой сети

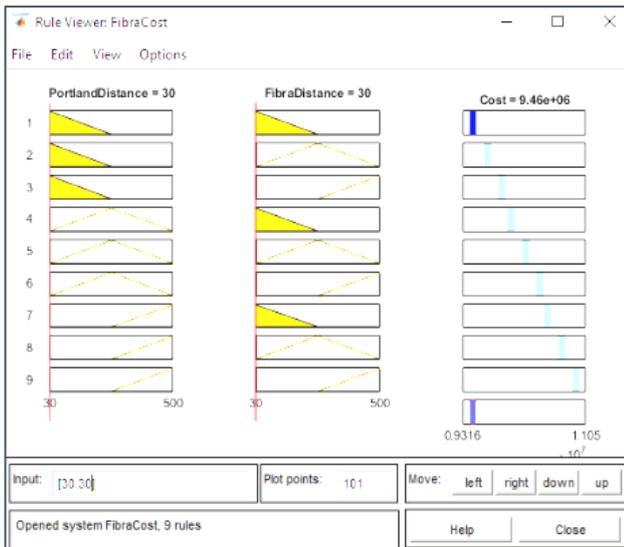


Рис. 4. Расчеты функции $Cost = f(PortlandDistance, FibraDistance)$ по разработанной модели нейросети в процедуре *RuleViewer*

Проверка достоверности на тестовых примерах.

Достоверность работы сети проверяется по дополни

тельным тестовым выборкам. Нейронная сеть проверяется на специально подготовленных тестовых примерах, которые не вошли в обучающую выборку. Проверка проводится аналогично в процедуре *RuleViewer*.

Достоверность также выражается величиной точности работы нейронной сети. Для определения точности был произведен расчет средней абсолютной ошибки работы нейронной сети для тестовых выборок, который показал точность работы нейронечеткой сети 99,856 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети $MAPE = 0,144$ %). Фрагмент расчета достоверности по каждому тестовому набору значений представлен в табл. 6. Это позволяет считать степень достоверности результатов разработанной нейронечеткой сети как достаточно высокую.

Результаты и обсуждение. Разработанная нейронечеткая сеть позволяет производить расчет стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта в зависимости от дальности возки основных компонентов: портландцемента и фиброволокна в диапазоне расстояний от 30 до 500 км со средней абсолютной ошибкой $MAPE = 0,144$ %.

Таблица 6. Фрагмент расчета достоверности работы нейронечеткой сети

Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость из выборки тестовых значений, р.	Сметная стоимость, рассчитанная с помощью нейронной сети, р.	Абсолютная ошибка, %	Достоверность, %
450	30	10 395 600,7	10 396 000	0,004	99,996
350	100	10 240 457,1	10 242 000	0,015	99,985
400	200	10 439 119,5	10 438 000	0,011	99,989
300	300	10 305 945,1	10 390 000	0,816	99,184
100	400	9 942 108,67	9 941 900	0,002	99,998
300	500	10 475 439,2	10 477 000	0,015	99,985

На основании полученных результатов расстояние доставки рассматриваемых компонентов фиброцементогрунтовой смеси оказывает влияние на общую стоимость строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. В связи с тем, что содержание портландцемента в составе фиброцементогрунтовой смеси и его стоимость выше, чем базальтового фиброволокна, то показатели среднего расстояния доставки данного минерального вяжущего в большей степени оказывают влияние на увеличение общей стоимости работ, чем фиброволокно.

Минимальная стоимость строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта составляет 9 458,7 тыс. р. при дальности возки портландцемента и базальтового фиброволокна 30 км. При увеличении расстояния возки портландцемента и базальтового фиброволокна до 500 км стоимость строительства также увеличится на 15 % и составит 10 911,3 тыс. р. (рис. 5).

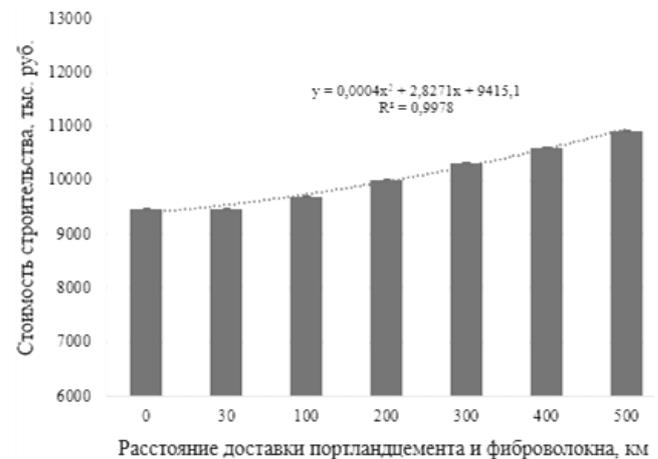


Рис. 5. Гистограмма зависимости стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

Нейронечеткая сеть позволяет в кратчайшие сроки и с большой точностью производить расчет средней стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки основных компонентов: портландцемента и фиброволокна. Данные показатели требуется учитывать при технико-экономическом обосновании выбора вариантов конструкций дорожных одежд из различных материалов.

Традиционно используемыми для устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог являются инертные каменные материалы: щебень, гравий, щебеночно-песчаные смеси, гравийно-песчаные смеси, песок и т. п. Данные материалы технологичны в производстве строительных работ, однако при устройстве дорожных одежд требуются большие объемы их использования, что увеличивает затраты на транспортировку и в целом на общую стоимость строительно-монтажных работ [17]. Особенно актуальной данная проблема является в районах, отдаленных от мест производства инертных материалов.

Для устройства фиброцементогрунтовых слоев требуются сравнительно меньшие объемы портландцемента и фиброволокна, что, с учетом отдаленности лесозаготовительных районов от мест производства инертных каменных материалов и сети автомобильных дорог общего пользования, делает технологию строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунтов более экономически эффективной [18–20]. Разработанная нейронечеткая сеть для условий Свердловской области позволяет определять показате-

ли экономической эффективности строительства фиброцементогрунтовых лесовозных автомобильных дорог, основанные на снижении стоимости строительства в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов.

Выводы. В современных условиях удаленности лесосырьевых баз от мест производства дорожно-строительных материалов, требований повышения качества и долговечности лесовозных автомобильных дорог при условии минимальных затрат на их строительство появляется необходимость в совершенствовании методов конструирования и технико-экономического обоснования дорожных одежд. Данные задачи эффективно решаются с использованием новых теоретических подходов, основанных на достижениях математики и информационных технологий.

Разработанная модель интеллектуальной системы в среде *Matlab* позволяет достаточно точно решать задачу определения стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта в условиях Свердловской области и автоматизировать этот трудоемкий процесс. Программная реализация нейронечеткой сети и ее достаточная адекватность позволяют рекомендовать результаты для использования при технико-экономическом обосновании вариантов конструкций дорожных одежд и снижении стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунтов в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов.

Литература

1. 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.
2. Ayeledeen M., Azzam W., Arab M.G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement // *Geotech Geol Eng.* 2022. № 40. P. 1873-1885.
3. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // *Soils Found.* 2019. № 59. P. 2144-2154.
4. Чудинов С.А. Фиброцементогрунтовая смесь: пат. RU2785742C1; заявл. 03.05.2022; опублик. 12.12.2022. Бюл. № 35. 9 с.
5. ГОСТ Р 70452-2022. Грунты стабилизированные и укрепленными неорганическими вяжущими. Общие технические условия. Введ. 30.11.2022. М.: Ин-т стандартизации, 2022. 24 с.
6. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl // *Geotech Geol Eng.* 2023. № 3. P. 1-15.
7. Mazhar S., GuhaRay A. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling // *Int J Geotech Eng.* 2021. № 15. P. 977-993.
8. Gong Y., He Y., Han C. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles // *Adv Mater Sci Eng.* 2019. V. 2019. P. 10-21.
9. Чудинов С.А., Черняк Р.Д., Дмитриев В.Н., Байц О.Н. Опыт-производственные исследования применения золошлаковых отходов в дорожном строительстве // *Дороги и мосты.* 2022. № 2 (48). С. 254-273.
10. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // *Науч. исследования.* 2018. № 6. С. 23-25.
11. Степанец В.Г., Герасимова С.А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозоустойчивости // *Молодой ученый.* 2020. № 22 (312). С. 148-154.
12. ПНСТ 542-2021. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Введ. 18.05.2021. М.: Стандартиформ, 2021. 77 с.
13. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 30.04.2020. М.: Стандартиформ, 2020. 19 с.
14. ФСНБ-2001. Федеральная сметно-нормативная база ценообразования в строительстве в редакции 2020 года (с Изм. 1-9). URL: https://gk-infostroy.ru/bd_nsi/fsnb/ (дата обращения: 15.01.2024).
15. Методика определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации»: утв. приказом М-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от

04.08.2020 № 421/пр. URL:

<https://minstroyrf.gov.ru/docs/74853> (дата обращения: 15.01.2024).

16. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, 2001. 760 p.
17. Muñoz Y.O., de Almeida J.L., Mora A.J.E.V. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application // Geotech Geol Eng. 2023. № 41. P. 2599-2628.
18. Катаров В.К. Ресурсосберегающая методика расчета дорожных одежд лесовозных дорог // Resources and technology. 2020. № 1. P. 1-13.
19. Чернышова Е.В., Скрыпников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 95-101.
20. Мохирев А.П., Медведев С.О. Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. № 3 (35). С. 103-113.
8. Gong Y., He Y., Han C. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles // Adv Mater Sci Eng. 2019. V. 2019. P. 10-21.
9. CHudinov S.A., CHernyak R.D., Dmitriev V.N., Bajc O.N. Pilot research on the use of ash and slag waste in road construction // Dorogi i mosty. 2022. № 2 (48). P. 254-273.
10. Voskanyanc K.E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction // Scientific research. 2018. № 6. P. 23-25.
11. Stepanec V.G., Gerasimova S.A. Pavement bases from reinforced soils of increased strength and frost resistance // Young Scientist. 2020. № 22 (312). P. 148-154.
12. PNST 542-2021. Non-rigid road pavements. Design rules. Vved. 18.05.2021. M.: Standartinform, 2021. 77 p.
13. GOST 31108-2020. General construction cements. Technical conditions. Vved. 30.04.2020. M.: Standartinform. 2020. 19 p.
14. FSNB-2001. Federal estimate and regulatory framework for pricing in construction as amended in 2020 (from Amendments 1-9). URL: https://gk-infostroy.ru/bd_nsi/fsnb/ (data obrashcheniya: 15.01.2024).

References

1. 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.
2. 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.
3. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // Soils Found. 2019. № 59. P. 2144-2154.
4. CHudinov S.A. Fiber cement soil mixture: pat. RU2785742C1; zayavl. 03.05.2022; opubl. 12.12.2022. Byul. № 35. 9 p.
5. 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.
6. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl // Geotech Geol Eng. 2023. № 3. P. 1-15.
7. Mazhar S., GuhaRay A. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling // Int J Geotech Eng. 2021. № 15. P. 977-993.
15. Methodology for determining the estimated cost of construction, reconstruction, major repairs, demolition of capital construction projects, work to preserve cultural heritage sites (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation on the territory of the Russian Federation: utv. prikazom M-va stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Ros. Federacii ot 04.08.2020 № 421/пр. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/74853> (data obrashcheniya: 15.01.2024).
16. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, 2001. 760 p.
17. Muñoz Y.O., de Almeida J.L., Mora A.J.E.V. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application // Geotech Geol Eng. 2023. № 41. P. 2599-2628.
18. Katarov V.K. Resource-saving methodology for calculating road pavements for logging roads // Resources and technology. 2020. № 1. P. 1-13.
19. CHernyshova E.V., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Abasov M.A. Timber roads in the transport network of a timber industry enterprise // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 2 (368). P. 95-101.
20. Mohirev A.P., Medvedev S.O. Smolina O.N. Factors influencing the capacity of logging roads // Forestry Engineering Journal. 2019. № 3 (35). P. 103-113.