

Совершенствование методов технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве и эксплуатации зимней транспортной инфраструктуры лесов

А.А. Лабыкин^{1a}, И.Н. Кручинин^{1b}, Э.Р. Ахтямов^{2c}, А.Г. Гороховский^{1d},
Е.Е. Шишкина^{1e}, Д.В. Овсейчик^{1f}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² ООО УралНИИСтром, ул. Сталеваров, 5, Челябинск, Россия

^a gabasas@yandex.ru, ^b Kinaa.k@yandex.ru, ^c ra@7359808.ru, ^d goralegr@yandex.ru,

^e elenashishkina@yandex.ru, ^f davbondarenko@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2715-1397>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^c <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>

Статья поступила 05.10.2023, принята 16.10.2023

В статье рассмотрена проблема совершенствования методов технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве и эксплуатации покрытий зимних лесных автомобильных дорог, эксплуатирующихся в уплотненном снежном покрове. Зимние лесные дороги не только обеспечивают освоение лесосырьевых баз в зимний период года, но и позволяют проводить мероприятия по обеспечению устойчивого управления лесами. Как показывает практика освоения лесосырьевых баз, в качестве дорожных покрытий в зимний период года чаще всего используется уплотненный снежный покров. Использование снега в качестве дорожно-строительного материала вызывает значительные трудности при строительстве и эксплуатации зимних лесных дорог. Таким образом, решить проблему позволит впервые разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния снежных поверхностей зимних лесных дорог, что и определило цель настоящей работы. Целью исследований была разработка требований к контролю уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог, эксплуатирующихся в уплотненном снежном покрове. В задачи исследований входили оценка физико-механических свойств уплотненных снежных покрытий с использованием динамического плотномера и разработка требований к технологическому контролю уплотненного снежного покрова. В качестве технологического фактора рассматривался динамический модуль упругости уплотненного снежного покрова, полученного с помощью электронного динамического плотномера типа ZFG-3000-10 GPS. Разработанная интеллектуальная система, построенная в виде нейронечеткой сети с использованием методов теории нечетких множеств и нечеткой логики, позволяет учитывать не только технологические параметры снежной поверхности, но и природно-климатические факторы. Проведенный комплекс исследований показал, что в процессе строительства зимних лесовозных дорог контролируемый динамический модуль упругости должен находиться в диапазоне от 80 до 180 МПа. При этом наименьшие значения его не должны быть ниже 80 МПа. Учитывая достаточную адекватность полученных данных, они могут быть рекомендованы для технологического контроля в практике строительства и эксплуатации зимних лесных дорог.

Ключевые слова: снег; зимние лесные дороги; уплотненный снежный покров; динамический модуль упругости снега.

Improving methods for technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest transport infrastructure

A.A. Labykin^{1a}, I.N. Kruchinin^{1b}, E.R. Akhtyamov^{2c}, A.G. Gorokhovskiy^{1d},
E.E. Shishkina^{1e}, D.V. Ovseychik^{1f}

¹ Ural State Forestry Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

² UralNIISTrom LLC; 5, Stalevarov St., Chelyabinsk, Russia

^a gabasas@yandex.ru, ^b Kinaa.k@yandex.ru, ^c ra@7359808.ru, ^d goralegr@yandex.ru,

^e elenashishkina@yandex.ru, ^f davbondarenko@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2715-1397>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^c <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>

Received 05.10.2023, accepted 16.10.2023

The article discusses the problem of improving methods for technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest road surfaces operating in compacted snow cover. Winter forest roads not only ensure the development of

forest resource bases in the winter season, but also allow for activities to ensure sustainable forest management. As the practice of developing timber resource bases shows, compacted snow cover is most often used as road surfaces in the winter. The use of snow as a road-building material causes significant difficulties in the construction and operation of winter forest roads. Thus, the first developed method for assessing the transport and operational condition of snow surfaces on winter forest roads will allow solving the problem, which determined the purpose of this work. The purpose of the research is to develop requirements for the control of compacted snow cover during the construction of winter forest roads operating in compacted snow cover. The objectives of the research included: assessing the physical and mechanical properties of compacted snow covers using a dynamic density meter and developing requirements for technological control of compacted snow covers. The dynamic modulus of elasticity of compacted snow cover, obtained using an electronic dynamic density meter of the ZFG-3000-10 GPS type, is considered as a technological factor. The developed intelligent system, built in the form of a neuro-fuzzy network using the methods of fuzzy set theory and fuzzy logic, allows taking into account not only the technological parameters of the snow surface, but also natural and climatic factors. The conducted set of studies have shown that during the construction of winter logging roads, the controlled dynamic modulus of elasticity should be in the range from 80 to 180 MPa. At the same time, its minimum values should not be lower than 80 MPa. Considering the sufficient adequacy of the obtained data, they can be recommended for technological control in the practice of construction and operation of winter forest roads.

Keywords: snow; winter forest roads; compacted snow cover; dynamic modulus of elasticity of snow.

Введение. Для последовательной реализации стратегии по устойчивому развитию лесопромышленного комплекса Российской Федерации необходима оценка функционирования ее лесотранспортной инфраструктуры. Чаще всего основные исследования в этой области нацелены на повышение эффективности использования постоянно действующих лесных дорог с капитальным типом покрытия [1]. Много внимания уделено изучению процессов, сопутствующих как строительству, так и эксплуатации отдельных элементов лесотранспортных сетей. Что касается освоения лесосырьевых баз северных регионов РФ, которые расположены в сложных природно-климатических условиях, то проблемы строительства и использования зимних лесных дорог в современной научной литературе практически не получили должного освещения [2; 3]. Следует отметить, что зимние лесные дороги — это не только ветки или лесовозные усы, но и вся существующая лесотранспортная инфраструктура, эксплуатируемая в зимний период года. Практически все исследователи в области строительства и эксплуатации как временных лесных дорог, так и дорог постоянного действия пришли к выводу, что для обеспечения нормативных значений требуемых транспортно-эксплуатационных характеристик снежных дорожных покрытий необходима комплексная оценка применяемых технологий их строительства [4; 5].

Что касается зимних лесных дорог, то при анализе условий их строительства и эксплуатации в уплотненном снежном покрытии был сделан вывод, что в пределах действующих нормативно-технических требований возникла необходимость в пересмотре требований к параметрам конструктивных элементов дорог, состоящих из снега, уплотненного снежного покрова или снеголедяных отложений [6–10].

Основные способы строительства зимних дорог из снега были сформулированы и апробированы в начале прошлого века. В современных условиях глобального изменения климата физико-механические характеристики снежных покрытий изменились, и оценочные параметры зимних лесных дорог уже не обеспечивают требуемых транспортно-эксплуатационных показателей.

Стало понятно, что для дальнейшего уменьшения затрат на строительство и эксплуатацию зимних лесных дорог необходимо разработать мероприятия по повышению оценок физико-механических характеристик снежных дорожных покрытий [11; 12].

Например, изменение технологий строительства уплотненного снежного покрова на зимних дорогах позволяет регулировать транспортно-эксплуатационные показатели в весенний период года [13; 14]. Как было показано в наших исследованиях, изменения физико-механических показателей снежной поверхности дают возможность изменять ее несущую способность, жесткость и даже регулировать коэффициент сцепления с колесами лесовозных автопоездов [15–17].

Лесотранспортная инфраструктура как один из элементов

устойчивого управления лесами оказывает значительное влияние на их средообразующую функцию, а это накладывает существенные ограничения на выбор технологий как строительства, так и эксплуатации зимних лесных дорог [14; 18].

В этой связи создание новых методов технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог и оценке транспортно-эксплуатационных показателей снежного покрытия зимних лесных дорог при строительстве и эксплуатации является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований является разработка требований к контролю уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог, эксплуатирующихся в уплотненном снежном покрове.

В работе рассматривалась следующая задача: разработать требования к технологическому контролю уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог.

Методы и материалы. В практике строительства транспортной инфраструктуры лесов в зимний период года уплотненный снежный покров на дорожном покрытии рассматривают как специально сформированный и уплотненный слой снега. От его физико-механических показателей будут зависеть основные транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог. Особенности строительства зимников и их эксплуатации посвящено значительное количество работ [6; 14; 19]. В этих работах значительное место отводится не только условиям формирования снежного покрова на дорожных покрытиях и особенностям природно-климатических условий расположения автомобильных дорог, но и технологиям его уплотнения и уходу за ним.

В результате многолетних климатических наблюдений [8; 12; 18; 20] изучены закономерности формирования снежного покрова. Известно, что доля зимних твердых осадков на северных территориях России может достигать почти половины от общего количества годовых и формироваться в виде снежной поверхности [12; 21]. Снег послойно накапливается и образует снежный покров. Общий прирост снежного покрова, в зависимости от погодных условий, может варьироваться от 0 до 0,25 м в течении суток.

При проектировании зимней лесотранспортной инфраструктуры следует учитывать, что в условиях залесенной местности накопление снежных осадков на дорожных покрытиях имеет свои особенности. Известно, что наличие древостоя и его породный состав производят перераспределение выпадающего снега за счет деревьев. Происходит изменение направления и силы ветра, изменяются снегоперенос и ветровые нагрузки на снежную поверхность. Ряд авторов указывает на влияние породного состава лесных насаждений на высоту отложений снежного покрова. Исследования подтвердили, что наибольший прирост снежного покрова наблюдался на лесных полянах и в березовых насаждениях [18].

Таким образом, строительство снежных лесных автомобильных дорог в зимний период имеет свои особенности. В частности, необходимо учитывать не только дорожно-климатические зоны, но и породный состав осваиваемых лесосырьевых баз.

Рассматривая снег с точки зрения дорожно-строительного материала, к его основным физико-механическим характеристикам можно отнести непостоянную плотность и прочность, незначительную теплопроводность, неустойчивость фазового состояния и экологическую безвредность. В исследованиях [22–25] были получены значения механических показателей при деформациях различных снежных поверхностей. Было выяснено, что их плотность значительно зависит от их температуры и вида уплотнения.

В зависимости от климатических условий, видов внешних воздействий и времени года можно выделить следующие виды снежного покрова на покрытиях лесных дорог: свежеснежный, снег рыхлый, снег обвалованный, уплотненный снежный покров, снег в полосе наката, уплотненный снег под колесами автомобильного лесовозного подвижного состава, снежно-ледяной накат, снежно-ледяные отложения, шуга дорожная.

Уплотненный снежный покров рассматривают как специально сформированный слой снега на дорожном покрытии. Свойства этого покрова напрямую влияют на транспортно-эксплуатационные показатели лесных дорог. Чаще всего рассматриваются природно-климатические условия его применения и технологии уплотнения [15; 26; 27].

К транспортно-эксплуатационным показателям построенного снежного покрытия следует отнести толщину уплотненного снежного покрова на дорожном покрытии, плотность слоя снега, глубину колеи на снежном покрытии, ровность снежного покрытия, коэффициент сцепления со снежной поверхностью, скорость и интенсивность движения лесовозного подвижного состава.

Первым условием начала строительства зимних лесных дорог является наличие уплотненного снежного слоя на дорожном покрытии. Вторым условием для создания уплотненного снежного слоя является отрицательная температура и относительная влажность воздуха в диапазоне от 65 до 85 %.

В табл. 1 приведены средние значения интенсивности выпадения снежных осадков по дорожно-климатическим подзонам лесосырьевых баз Свердловской области при многолетних наблюдениях. По данным многолетних наблюдений, для Свердловской области плотность свежеснежного снега может составлять от 0,08 до 0,10 г/см³ [4].

Таблица 1. Средние значения многолетних наблюдений интенсивности выпадения снежных осадков по дорожно-климатическим подзонам, расположенным на территориях лесосырьевых баз Свердловской области (по данным И.А. Афанасьева)

Дорожно-климатические подзоны Свердловской области	Интенсивность выпадения снежных осадков по месяцам, мм/сутки				
	Январь	Февраль	Март	Ноябрь	Декабрь
А	14,1	20,8	19,1	26,4	24,0
В	8,2	14,4	12,5	17,4	14,7
С	11,9	16,5	15,7	23,5	19,9

Плотность снежного покрова в дорожном покрытии будет зависеть от толщины снега, его влажности, влажности и температуры воздуха, а также от интенсивности движения лесовозных автопоездов и состава лесотранспортного потока [4].

Сочетание всех перечисленных факторов дает разброс значений плотности снега в уплотненном покрытии от 0,40 до 0,55 г/см³. Что приводит к тому, что в одной и той же дорожно-климатической зоне лесосырьевой базы возможная наибольшая толщина уплотненного слоя к концу зимнего периода может достигать различных значений. В наших исследованиях были зафиксированы значения наибольшей расчетной толщины уплотненного слоя снега от 12,7 до 27,5 см [5; 10]. Помимо этого, в течение всего зимнего периода происходит испарение снега, находящегося в уплотненном слое.

Таким образом, в процессе строительства зимних лесных дорог приходится учитывать значительное количество факторов — как физических, так и природно-климатических. Наименьшие допустимые значения плотности снежной поверхности как технологического фактора представлены в табл. 2. Многие из технологических показателей отличаются нестабильностью и имеют значительный разброс. Все это привело к тому, что для проведения технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог необходимо разработать новые критерии их оценки.

Полученные данные по снежным поверхностям позволили сделать предположение, что для комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорог необходимо использовать современные методы измерения динамических характеристик дорожного покрытия.

Таблица 2. Технологические показатели снежной поверхности лесных дорог

Толщина уплотненного снежного покрова, см	Наименьшие допустимые значения плотности снежной поверхности, г/см ³ , при температуре снега, °С			
	–1	–5	–10	–15
5,0	0,55	0,53	0,51	0,48
10,0	0,52	0,48	0,46	0,45
15,0	0,49	0,46	0,44	0,43
20,0	0,47	0,44	0,40	0,42
25,0	0,46	0,42	0,38	0,41

В наших исследованиях предлагается проводить инструментальное обследование различных снежных покрытий с оценкой динамического модуля упругости конструктивных слоев зимних лесных дорог [10].

При проведении технологического контроля при строительстве снежного покрытия следует проводить следующие виды измерений: измерение толщины уплотненного снежного покрова, измерение плотности снежного покрова, измерение температуры окружающего воздуха, измерение температуры снега, измерение температуры дорожного покрытия, измерение динамического модуля упругости уплотненного снежного покрытия с применением электронных динамических плотномеров.

До начала проведения работ по строительству снежных дорожных покрытий и учета всего многообразия параметров зимних лесных дорог была разработана программа измерений физико-механических характеристик снежных покрытий, представленных в табл. 3.

При обработке полученных опытно-экспериментальных данных были использованы методы обработки статистических данных.

Результаты. Основные физико-механические показатели снежных дорожных покрытий были получены в процессе строительства участка зимней лесной дороги, проходящей по территории Кыштымского лесхоза на участке ПК28+20 – ПК380+05, участок (55°36'55.3"N 60°31'57.5"E) в период ноябрь 2022 – январь 2023 гг. В результате исследований получены значения изменения транспортно-эксплуатационного состояния зимних лесных дорог в зависимости от вида снежных покрытий и способов их строительства.

Таблица 3. Программа измерения физико-механических характеристик зимних лесных дорог

Толщина снега, см	Исследуемое снежное дорожное покрытие, плотность снега, температура	Толщина снега, см	Исследуемое снежное дорожное покрытие, плотность снега, температура
5	Снег слежавшийся, 0,32 г/см ³ , t = -5 °C	5	Уплотненный снежный покров, 0,55 г/см ³ , t = -15 °C
10	— “ —	10	— “ —
15	— “ —	15	— “ —
20	— “ —	20	— “ —
25	— “ —	25	— “ —
5	Снег слежавшийся, 0,40 г/см ³ , t = -15 °C	5	Уплотненный снежный покров, 0,60 г/см ³ ,
10	— “ —	10	— “ —
15	— “ —	15	— “ —
20	— “ —	20	— “ —
25	— “ —	25	— “ —
5	Уплотненный снежный покров, 0,55 г/см ³ ,	5	Уплотненный снежный покров, 0,65 г/см ³ ,
10	— “ —	10	— “ —
15	— “ —	15	— “ —
20	— “ —	20	— “ —
25	— “ —	25	— “ —

В качестве технологического фактора рассматривался динамический модуль упругости уплотненного снежного покрова, полученного с помощью электронного динамического плотномера типа ZFG-3000-10 GPS.

Анализ результатов измерения динамических прогибов снежных поверхностей показал, что они варьируются в значительном диапазоне. На динамический модуль упругости оказывают влияние как технологические, так и природно-климатические факторы.

В табл. 4 приведены значения измерения динамического модуля упругости снежных покрытий на опытном участке зимней лесной дороги.

Таблица 4. Параметры технологического фактора оценки состояния уплотненного снежного покрытия зимних лесных дорог по динамическому модулю

Толщина снежного покрова, см	Температура, °C	Плотность снега, г/см ³	Динамический модуль упругости, МПа
15,0	0	0,32	12,8
15,0	-5	0,32	15,6
5,0	-15	0,32	21,3
25,0	0	0,32	14,5
25,0	-5	0,32	12,3
25,0	-15	0,32	18,7
10,0	0	0,40	67,1
10,0	-5	0,40	78,2
10,0	-15	0,40	79,3
25,0	-15	0,40	85,9
25,0	0	0,50	108,2
25,0	-5	0,50	110,2
25,0	-15	0,50	127,4
15,0	0	0,55	123,5
15,0	-5	0,55	137,3
15,0	-15	0,55	141,8
10,0	0	0,60	156,8
10,0	-5	0,60	168,9
10,0	-15	0,60	178,2
5,0	0	0,65	189,2
5,0	-5	0,65	182,1
5,0	-15	0,65	199,2

Как видно, полученный параметр имеет сильную связь с плотностью снега, толщиной уплотненного слоя и температурой.

При этом можно наблюдать участки уплотненного снежного покрова с одинаковыми показателями по динамическому модулю, но отличающимися физико-механическими свойствами.

С целью преодоления этого противоречия были изучены графики динамических прогибов снежных поверхностей при испытаниях плотномером ZFG-3000-10 GPS. Было определено, что чем ниже плотность снежной поверхности и выше температура, тем становятся больше динамический прогиб покрытия и скорость внедрения штампа плотномера.

На рис. 1, а представлены динамические прогибы для снежного покрытия низкой плотности. На плотных снежных покрытиях из уплотненного снега динамические прогибы имеют незначительные величины и отличаются быстрыми изменениями значений их деформаций (рис. 1, б). В наших исследованиях было зафиксировано значительное влияние температуры снега на динамический модуль упругости (табл. 4).

Анализ результатов измерения динамических прогибов снежных покрытий показывает, что они варьируются в довольно широком диапазоне. Выбрав в качестве критерия технологического контроля строительства зимних лесных дорог динамический модуль упругости уплотненного снежного покрова, пришлось столкнуться с тем, что задача оценки прочности дорожных покрытий зимних лесных дорог является чрезвычайно сложной, многопараметрической с взаимозависимыми параметрами и характеризуется неопределенностью в данных. Поэтому для решения именно такого класса задач, с учетом условий неопределенности, следует использовать методы теории нечетких множеств нечеткой логики.

Нечеткий вывод выполнялся по методу Мамдани [29]. Реализация нечетких моделей произведена с использованием системы компьютерной математики *Matlab* [11], которая располагает средствами, такими как приложения *Fuzzy Logic Toolbox* и *FIS Editor*.

Постановка задачи в содержательном виде выполнялась на основе результатов значений экспериментальных исследований и заключалась в качественном описании основных зависимостей выходной величины от исходных данных.

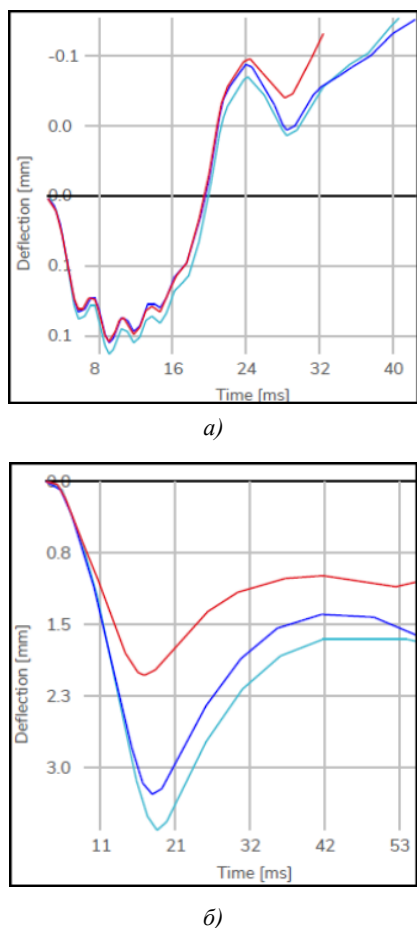


Рис. 1. Графические зависимости динамического прогиба уплотненного снежного покрова: *а* — уплотненный снежный покров при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и плотности $0,32\text{ г/см}^3$; *б* — уплотненный снежный покров при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и плотности $0,6\text{ г/см}^3$. Зеленая линия — первое воздействие от динамического плотномера; синяя линия — второе воздействие от динамического плотномера; красная линия — третье воздействие от динамического плотномера

В качестве входной величины принята толщина снежного покрова, которая изменяется, в нашем случае, в диапазоне от 5,0 до 25,0 см.

Второй входной величиной принята плотность снежного покрытия. Диапазон ее изменения был выбран от 0,3 до 0,65 г/см³.

Выходной параметр. Выходным параметром будет прочность дорожного покрытия из уплотненного снежного покрова, оцениваемого динамическим модулем упругости. В наших исследованиях наименьшее значение составило

12,8 МПа. Наибольшее значения модуля составило 199,2 МПа.

Обобщающая функция примет вид:

$$D_{ij} = f(H_{ij}, P_{ij}), \tag{1}$$

где H_{ij} — толщина снежного покрова, см; P_{ij} — плотность снежного покрова, г/см³.

Для лингвистических переменных определены термножества со следующими значениями:

- «Динамический модуль упругости, D » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс};
- «Толщина снежного покрова, H » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс};
- «Плотность снежного покрова, P » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс}.

В лингвистических переменных значения термножеств представлены в виде треугольных подмножеств, а по краям универсума приняты S-образные и Z-образные функции. Формализация нечетких функций была выполнена в среде *Fuzzy Logic Toolbox* [29].

Для вывода обобщающей функции сформулированы нечеткие функции принадлежности.

База правил нечеткой продукции формировалась логическими выражениями, и в полном объеме разработанная база правил приведена в табл. 5, изображена на рис. 2 и 3. Параметры обучающих выборок нейросети для оценки транспортно-эксплуатационных показателей снежных поверхностей по динамическому модулю упругости в соответствии с выражением (1) приведены в табл. 6.

Создание новых методов оценки качества снежных покрытий лесных дорог при их строительстве из уплотненного снега с учетом условий неопределенности привело к разработке адаптивной нейронечеткой продукционной сети типа ANFIS (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*). Эта сеть имеет свойства продукционных нечетких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей, поэтому относится к системам гибридного типа. Систему строим в среде *Matlab*. Для задания исходных данных создается файл в виде матрицы с исходными данными.

В интерфейсе программы задается схема метода нечеткого вывода, используемого в сети, она показана на рис. 4.

После загрузки исходных данных и определения параметров лингвистических переменных для входных и выходной переменных генерируется структура сети, представленной на рис. 5, с базой правил. В нашем случае имеются три входные переменные с тремя термножествами. Созданная таким образом сеть настраивается, или обучается, как это общепринято называть.

Процесс точности обучения сети визуализируется на экране. Более полно данные процесса настройки выводятся в рабочую область главной формы интерфейса.

Полученная сеть после обучения выдавала результаты расчетов с точностью не менее 3,22 %.

Таблица 5. База правил нечеткого вывода моделирования величины динамического модуля упругости снежного покрытия $D_{ij} = f(H_{ij}, P_{ij})$

Значения лингвистической переменной «Толщина снежного покрова, H »	Значения выходных нечетких подмножеств «Динамический модуль упругости, D » при изменении нечеткой функции «Плотность снежного покрова, P »				
	Мин	Мал	Срд	Бол	Макс
Мин	Мин	Мал	Мин	Мин	Мин
Мал	Мал	Срд	Мал	Мин	Мин
Срд	Срд	Бол	Срд	Мал	Мин
Бол	Срд	Макс	Бол	Срд	Мал
Макс	Бол	Макс	Бол	Срд	Мал

Таблица 6. Параметры обучающих выборок нейросети строительства снежного покрытия на зимних лесных дорогах

Вид снежного покрытия	Толщина снежного покрова, см	Плотность снежного покрова, г/см ³	Температура, °С	Динамический модуль упругости, E_{VD} , МПа
Рыхлый	15	0,28	-5	15,6
Уплотненный	10	0,60	-15	178,2
Слежавшийся	25	0,32	0	14,5
Уплотненный	5	0,65	-15	199,2
Обоснование переменных				
По данным наблюдения	Наибольшие зарегистрированные значения наблюдаемого диапазона	Наибольшее и наименьшее зарегистрированное значение плотности	При полевых испытаниях	Диапазон значений, полученных при полевых испытаниях
–	от 5,0 до 25	от 0,3 до 0,65	от 0 до -15	от 12,8 до 199,2

Файл	Правка	Формат	Вид	С
5.0	5	0.01	37.3	
5.0	15	0.01	38.0	
10.0	5	0.02	21.1	
10.0	15	0.02	23.2	
15.0	5	0.10	13.2	
15.0	15	0.10	14.1	
25.0	5	0.21	3.4	
25.0	15	0.21	4.2	
5.0	5	0.26	16.9	
5.0	15	0.26	18.2	
10.0	5	0.27	14.6	
10.0	15	0.27	15.3	
15.0	5	0.28	8.7	
15.0	15	0.28	9.1	
25.0	5	0.26	6.6	
25.0	15	0.26	8.4	
15.0	0	0.32	12.8	
15.0	5	0.32	15.6	
8.4	15	0.32	21.3	
25.0	0	0.32	14.5	
25.0	5	0.32	12.3	
25.0	15	0.32	18.7	
5.0	0	0.65	189.2	
5.0	5	0.65	182.1	
5.0	15	0.65	199.2	
10.0	0	0.60	156.8	
10.0	5	0.60	168.9	
10.0	15	0.60	178.2	
15.0	0	0.55	123.5	
15.0	5	0.55	137.3	
15.0	15	0.55	141.8	
25.0	0	0.50	108.2	
25.0	5	0.50	110.2	
25.0	15	0.50	127.4	
5.0	0	0.76	168.6	
5.0	5	0.76	188.9	
5.0	15	0.76	202.5	
10.0	0	0.72	142.1	
10.0	5	0.72	156.7	
10.0	15	0.72	178.5	
15.0	0	0.73	112.5	
15.0	5	0.73	131.2	
15.0	15	0.73	128.9	

Рис. 2. Задание исходных данных

Проверка адекватности решения проводилась на тестовых примерах, которые исследуются в процедуре «Rule Viewer» программы. Особенностью этого приложения является то, что могут задаваться любые наборы исходных данных (лежащие в области определения сети).

На рис. 6 представлен фрагмент процедуры нечеткого вывода в среде *Fuzzy Logic Toolbox* в виде оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог.

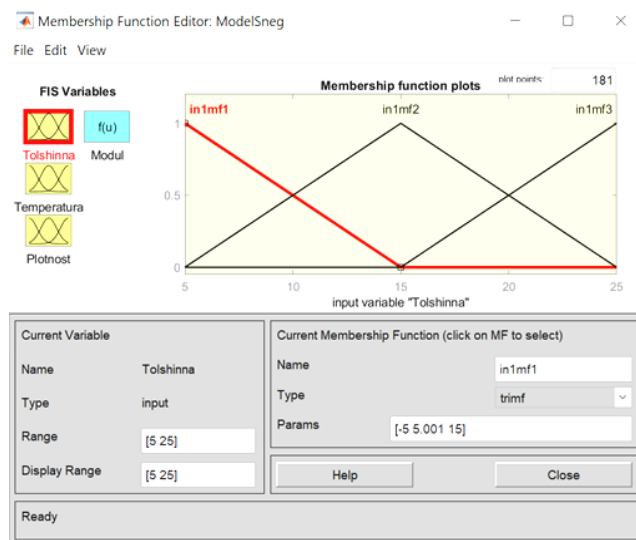
Для анализа поведения динамического модуля упругости снежного покрова и влияния на него технологических параметров были выбраны фиксированные значения критических точек.

Зафиксировав значение толщины снежной поверхности равным 15 см при температуре -10 °С, получена зависимость динамического модуля упругости, представленная на рис. 7 в виде выражения:

$$D_{\text{покрытия}} = -5807 \cdot P^3 + 9834 \cdot P^2 - 5077 \cdot P_{\text{сн}} + 886,9 \quad (2)$$

Зафиксировав значение толщины снежной поверхности равным 20 см при плотности снега 0,50 г/см³, получена зависимость, представленная на рис. 8 в виде выражения:

$$D_{\text{покрытия}} = 1,135 \cdot T^2 + 21,1 \cdot T + 225,7 \quad (3)$$

**Рис. 3.** Задание входных переменных нечеткими функциями

Судя по результатам расчетов, модель интеллектуальной системы является достаточно адекватной реальному объекту.

Заключение. Разработка методов контроля уплотненного снежного покрова при строительстве зимних лесных дорог, с учетом особенности их эксплуатации, неоднозначной структуры снежной поверхности, недостаточности статистических данных привела к практической невозможности описания традиционными средствами их взаимного влияния на прочность снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог, что потребовало принципиально нового подхода к решению этой проблемы.

Была проведена оценка влияния типов уплотненной снежной поверхности на основные физико-механические показатели дорожных покрытий. Впервые получены динамические свойства уплотненных снежных покрытий в зависимости от их температуры, плотности и толщины. Подобрана технология измерения динамического модуля упругости уплотненного снежного покрытия.

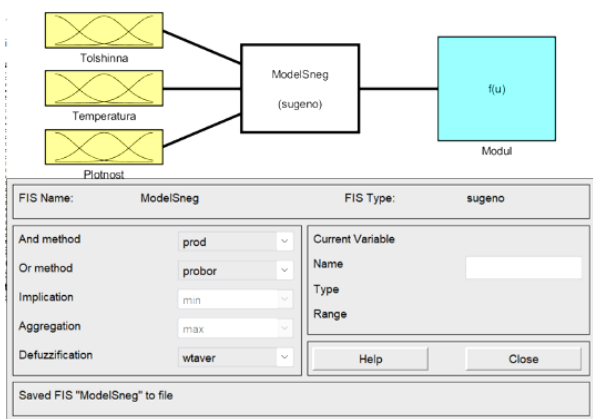


Рис. 4. Схема метода нечеткого вывода (Сугено) в сети

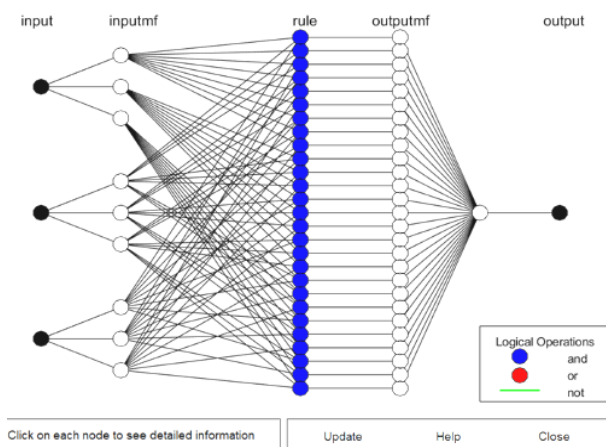


Рис. 5. Структура нейронечеткой сети

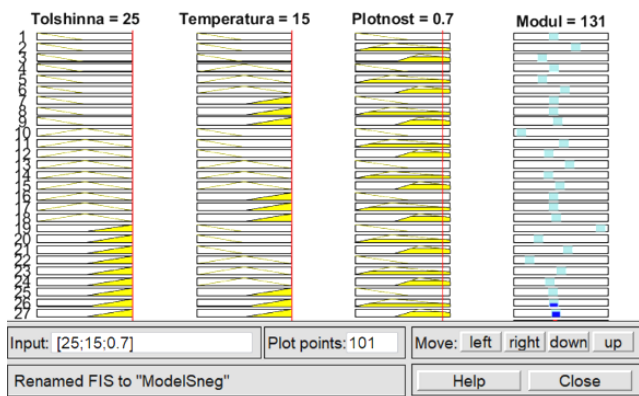


Рис. 6. Фрагмент процедуры нечеткого вывода в среде Fuzzy Logic Toolbox

Литература

1. Вырко Н.П. Сухопутный транспорт леса. Минск: Высшая шк., 1987. 437 с.
2. Алябьев В.И., Ильин Б.А., Кувалдин Б.И., Грехов Г.Ф. Сухопутный транспорт леса. М.: Лесная пром-сть, 1990. 416 с.
3. Леонович И.И. Дороги и транспорт лесной промышленности: справ. пособие. Минск: Высшая шк., 1979. 416 с.
4. Афанасьев И.А., Кручинин И.Н. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 135 с.
5. Кручинин И.Н. Транспортная инфраструктура лесов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 134 с.
6. ВСН 137-89. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР; введ. 01.01.1990. М.: Транспорт, 1991. 157 с.

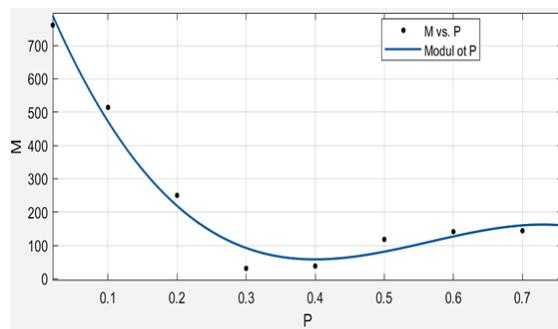


Рис. 7. График динамического модуля упругости снежного покрова в зависимости от плотности снежной поверхности при ее толщине 15 см и температуре -10°C

Разработанная интеллектуальная система, построенная в виде нейронечеткой сети с использованием методов теории нечетких множеств и нечеткой логики, позволяет учитывать не только технологические параметры снежной поверхности, но и природно-климатические.

Проведенный комплекс исследований с использованием интеллектуальной системы показал, что в процессе строительства зимних лесовозных дорог контролируемый динамический модуль упругости должен находиться в диапазоне от 80 до 180 МПа. При этом его наименьшие значения не должны быть ниже 80 МПа.

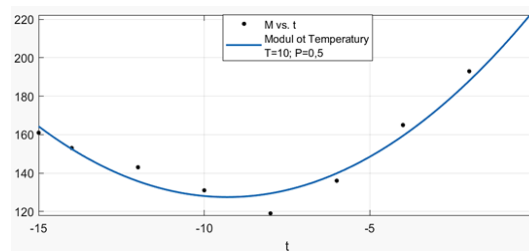


Рис. 8. График динамического модуля упругости снежного покрова в зависимости от температуры снежной поверхности при ее толщине в 20 см и плотности $0,50 \text{ г/см}^3$

Следует учитывать, что превышение указанного диапазона характерно только для снежного покрова незначительной плотности. К таким видам поверхностей можно отнести, например, свежеснеженный снег. При появлении значений динамического модуля выше наибольшего значения диапазона следует говорить о низкой несущей способности снежного покрова или тонкого слоя снега, лежащего на дорожных конструкциях в мерзлом состоянии.

Оперативный технологический контроль уплотненных снежных дорожных покрытий с использованием динамических плотномеров может быть рекомендована для использования в практике строительства и эксплуатации зимних лесных дорог.

7. Кручинин И.Н., Ченушкина С.В. Цифровая трансформация лесного хозяйства: технологии и распределенные реестры лесотранспортной инфраструктуры // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 132-137.
8. Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 158 с.
9. Вуори А.Ф. Механические свойства снега как строительного материала // Физические методы исследования льда и снега: сб. тр. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 118 с.
10. Лябыкин А.А., Кручинин И.Н., Ахтямов Э.Р. Разработка требований к уплотненному снежному покрову зимних лесных дорог // Деревообрабатывающая пром-сть. 2023. № 2. С. 10-19.
11. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 84 с.

12. Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, 1983. 128 с.
13. Кожевников А.Н., Беляков В.В., Малыгин В.А. Уравнения связи параметров состояния снега и зависимости их от деформации снежного покрова // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники. Н. Новгород: НГТУ, 1997. С. 121-129.
14. Морозов С.И., Павлов Ф.А., Плакса Л.Н., Савельев Э.Н. Зимние дороги в лесной промышленности. М.: Лесная пром-сть, 1969. 168 с.
15. Кручинин И.Н. Особенности формирования уплотненного снежного наката на автомобильной дороге // Вестн. ВолГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. Вып. 16 (35). С. 77-81.
16. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction. SAE Int. J. Mater. Manuf. 2011. 4 (1). P. 278-288.
17. Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model // Electronic recourse. Electronic data. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997. Report 90-13.
18. Галахов Н.Н. Снежный покров в лесу // Метеорология и гидрология. 1940. № 3. С. 15-16.
19. Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives // PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing. 2009. 284 p.
20. Корунов М.М. Ускоренный способ постройки зимних дорог. М.: Гослестехиздат, 1946. 34 с.
21. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
22. Крагельский И.В., Шахов А.А. Изменение механических свойств снежного покрова во времени (затвердение) // Физико-механические свойства снега и их использование в аэродромном строительстве: сб. М.: Изд. АН СССР, 1945. С. 10-13.
23. Daisy Huang, Jonah H. Lee. Mechanical properties of snow using indentation tests: size effects // Journal of Glaciology. 2013. V. 59. № 213. P. 35-46.
24. Shapiro L.H., Johnson J.B., Sturm M., Blaisdell G.L. Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications // Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL. 1997. Report 97-3. 126 p.
25. Yong R., Fukue M. Performance of snow under confined compression // Journal of Terramechanics. 1977. April. V. 14 (1). P. 37-49.
26. Кручинин И.Н., Кручинин С.И., Булдаков С.И. Устройство для формирования снежного наката на автомобильной дороге: пат. 83073 Рос. Федерация, МПК7 E 01 H 4/00. № 2008141121/22; заявл. 16.10.2008; опубл. 20.05.2009. Бюл. № 14.
27. Кручинин И.Н., Лабькин А.А., Овсейчик Д.В., Побединский В.В., Бурмистрова О.Н., Авдеева В.С. Устройство для формирования уплотненного снежного покрытия: пат. на полезную модель № 219114. № 2023112508; заявл. 16.05.2023; опубл. 28.06.2023.
28. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 p.
29. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2014a. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 18.10.2023).
6. VSN 137-89. Design, construction and maintenance of winter roads in Siberia and the north-east of the USSR; vved. 01.01.1990. М.: Transport, 1991. 157 p.
7. Kruchinin I.N., CHenushkina S.V. Digital transformation of forestry: technologies and distributed registries of forest transport infrastructure // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 4 (56). P. 132-137.
8. Vojtkovskij K.F. Mechanical properties of snow. М.: Nauka, 1977. 158 p.
9. Vuori A.F. Mechanical properties of snow as a building material // Fizicheskie metody issledovaniya l'da i snega: sb. tr. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 118 p.
10. Labykin A.A., Kruchinin I.N., Ahtyamov E.R. Development of requirements for compacted snow cover on winter forest roads // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2023. № 2. P. 10-19.
11. Kuz'min P.P. Physical properties of snow cover. L.: Gidrometeoizdat, 1957. 84 p.
12. Dyunin A.K. In the kingdom of snow. Novosibirsk: Nauka, 1983. 128 p.
13. Kozhevnikov A.N., Belyakov V.V., Malygin V.A. Relationship equations for the parameters of the state of snow and their dependence on the deformation of the snow cover. N. Novgorod: NGTU, 1997. P. 121-129.
14. Morozov S.I., Pavlov F.A., Plaksa L.N., Savel'ev E.N. Winter roads in the timber industry. М.: Lesnaya prom-st', 1969. 168 p.
15. Kruchinin I.N. Features of the formation of compacted snow run on the road // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture. 2009. Vyp. 16 (35). P. 77-81.
16. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction. SAE Int. J. Mater. Manuf. 2011. 4 (1). P. 278-288.
17. Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the SRREL shallow snow mobility model // Electronic recourse. Electronic data. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997. Report 90-13.
18. Galahov N.N. Snow cover in the forest // Russian Meteorology and Hydrology. 1940. № 3. P. 15-16.
19. Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives // PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing. 2009. 284 p.
20. Korunov M.M. Accelerated way to build winter roads. М.: Goslестехиздат, 1946. 34 p.
21. Rihter G.D. Snow cover, its formation and properties. М.; Л.: Izd-vo AN SSSR, 1945. 120 p.
22. Kragel'skij I.V., SHahov A.A. Changes in the mechanical properties of the snow cover over time (hardening) // Fiziko-mekhanicheskie svoystva snega i ih ispol'zovanie v aerodromnom stroitel'stve: sb. М.: Izd. AN SSSR, 1945. P. 10-13.
23. Daisy Huang, Jonah H. Lee. Mechanical properties of snow using indentation tests: size effects // Journal of Glaciology. 2013. V. 59. № 213. P. 35-46.
24. Shapiro L.H., Johnson J.B., Sturm M., Blaisdell G.L. Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications // Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL. 1997. Report 97-3. 126 p.
25. Yong R., Fukue M. Performance of snow under confined compression // Journal of Terramechanics. 1977. April. V. 14 (1). P. 37-49.
26. Kruchinin I.N., Kruchinin S.I., Buldakov S.I. Device for the formation of snow run on the road: pat. 83073 Ros. Federaciya, МПК7 E 01 H 4/00. № 2008141121/22; заявл. 16.10.2008; opubl. 20.05.2009. Byul. № 14.
27. Kruchinin I.N., Labykin A.A., Ovsejchik D.V., Pobedinskij V.V., Burmistrova O.N., Avdeeva V.S. Device for forming compacted snow cover: pat. na poleznuyu model' № 219114. № 2023112508; заявл. 16.05.2023; opubl. 28.06.2023.
28. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 p.
29. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2014a. URL: <http://www.mathworks.com> (data obrashcheniya: 18.10.2023).

References

1. Vyrko N.P. Land transport of the forest. Minsk: Vysshaya shk., 1987. 437 p.
2. Alyab'ev V.I., Il'in B.A., Kuvaldin B.I., Grekhov G.F. Land transport of the forest. М.: Lesnaya prom-st', 1990. 416 p.
3. Leonovich I.I. Roads and transport of the timber industry: sprav. posobie. Minsk: Vysshaya shk., 1979. 416 p.
4. Afanas'ev I.A., Kruchinin I.N. Winter maintenance of logging roads in the Ural region. Perm: Izd-vo Perm. gos. tekhn. unta, 2006. 135 p.
5. Kruchinin I.N. Transport infrastructure of forests. Ekaterinburg: UGLTU, 2022. 134 p.