

Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщенному показателю транспортно-эксплуатационного состояния

И.Н. Кручинин^{1a}, К.С. Отев^{2b}, О.Н. Бурмистрова^{2c}, Э.Р. Ахтямов^{3d},
М.А. Кузнецов^{4e}, Д.В. Овсячич^{1f}

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

² Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми

³ ООО «УралНИИСтром», ул. Сталеваров, 5, Челябинск, Россия

⁴ ООО «ГД Урало-Сибирская компания», ул. Крестинского, 59, Екатеринбург, Россия

^a kinaa.k@yandex.ru, ^b otev.kirill@mail.ru, ^c oburmistrova@ugtu.net, ^d ra@7359808.ru,

^e kotel96@bk.ru, ^f davbondarenko@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^b <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>,

^d <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2896-9756>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>

Статья поступила 24.09.2024, принята 30.10.2024

Решена проблема совершенствования разработки методов по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог с применением обобщенного показателя транспортно-эксплуатационного состояния. Современная практика освоения лесосырьевых баз в зимний период года сопряжена со значительными трудностями. Отсутствуют основные нормативно-технические требования, не определены физико-механические свойства уплотненного снежного покрова или снежно-ледяных отложений. Невозможна полноценная эксплуатация зимних дорожных покрытий лесных дорог. Поэтому впервые разработанная методика оценки зимнего дорожного покрытия по комплексному обобщенному показателю с учетом его транспортно-эксплуатационного состояния позволила найти решение поставленной задачи. Целью исследований является совершенствование методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных лесовозных дорог с использованием комплексного обобщенного параметра на основе теории элементов нечеткой логики. В поставленные задачи входили: обоснование комплексного критерия обобщенного параметра зимних дорожных покрытий лесных дорог; общая оценка зимних дорожных покрытий лесных лесовозных дорог по критерию транспортно-эксплуатационного состояния; обоснование опытных данных при формировании оценочной шкалы для нейро-нечеткой сети, описывающей транспортно-эксплуатационное состояние зимних дорожных покрытий лесных дорог. Проведенный комплекс исследований показал, что коэффициент сцепления и прочность зимнего дорожного покрытия могут быть выбраны в качестве основных критериев при формировании обобщенного показателя. Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрикционными каменными материалами следует считать щебень фракции 5–10 мм при плотности распределения не менее 6,5 кг/м²; при этом значение комплексного обобщенного показателя зимнего дорожного покрытия должно иметь значение не менее 0,605. Коэффициент сцепления не может быть менее чем 0,44, а значение динамического прогиба дорожного покрытия — менее величины 192,2 МПа. Адекватность полученных величин не вызывает сомнений, и полученные данные могут быть рекомендованы для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог и разработки оптимальных планов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: лесные дороги; зимнее дорожное покрытие; коэффициент сцепления; динамический модуль прогиба.

Development of methods for assessing winter road surfaces of forest roads using a generalized indicator of transport and operational condition

I.N. Kruchinin^{1a}, K.S. Otev^{2b}, O.N. Burmistrova^{2c}, E.R. Akhtyamov^{3d},
M.A. Kuznetsov^{4e}, D.V. Ovseychik^{1f}

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

² Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Коми

³ UralNIИstrom LLC; 5, Stalevarov St., Chelyabinsk, Russia

⁴ Ural-Siberian Company LLC; 59, Krestinsky St., Ekaterinburg, Russia

^a kinaa.k@yandex.ru, ^b otev.kirill@mail.ru, ^c oburmistrova@ugtu.net, ^d ra@7359808.ru,

^e kotel96@bk.ru, ^f davbondarenko@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>, ^b <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>,

^d <https://orcid.org/0009-0007-6563-8696>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-2896-9756>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7768-4223>

Received 24.09.2024, accepted 30.10.2024

The problem of improving the development of methods for assessing the transport and operational condition of winter forest road surfaces using a generalized indicator of the transport and operational condition has been solved. The current practice of developing forest raw material bases in winter is associated with significant difficulties. There are no basic regulatory and technical requirements, the physical and mechanical properties of compacted snow cover or snow and ice deposits have not been determined. Full-fledged operation of winter forest road surfaces is impossible. Therefore, the first developed methodology for assessing winter road surfaces using a complex generalized indicator, taking into account its transport and operational condition, makes it possible to find a solution to the problem. The purpose of our research is to improve the methods for assessing the transport and operational condition of winter forest road surfaces using a complex generalized parameter, based on the theory of fuzzy logic elements. The tasks include: substantiation of the complex criterion of the generalized parameter of winter road surfaces of forest roads; general assessment of winter road surfaces of forest logging roads according to the criterion of transport and operational condition; substantiation of experimental data in the formation of an assessment scale for a neuro-fuzzy network describing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads. The conducted complex of studies shows that the coefficient of adhesion and strength of the winter road surface can be selected as the main criteria in the formation of a generalized indicator. Crushed stone of a fraction of 5–10 mm with a distribution density of at least 6.5 kg/m² should be considered as rational values for treating winter road surfaces with friction stone materials. Also, in this case, the value of the complex generalized indicator of winter road surface should be at least 0.605. The adhesion coefficient cannot be less than 0.44, and the value of the dynamic deflection of the road surface cannot be less than 192.2 MPa. The adequacy of the obtained values is beyond doubt, and the data obtained can be recommended for assessing the transport and operational indicators of winter road surfaces of forest roads and developing optimal plans for the winter maintenance of forest transport infrastructure.

Keywords: forest roads; winter road surface; adhesion coefficient; dynamic deflection modulus.

Введение. При освоении в зимний период года лесозексплуатационных лесных территорий, которые расположены в сложных природно-климатических условиях и имеют значительное удаление от предприятий дорожно-строительного комплекса, возникают существенные ограничения по их транспортной эксплуатации. Освоение лесосырьевых баз в летних условиях обычно осуществляется по лесным лесовозным дорогам круглогодичного действия. При этом лесотранспортную сеть составляют дороги с покрытиями капитального типа [19]. Значительная часть исследований рассматривает технологические процессы строительства или процессы эксплуатации лесных автомобильных дорог только для летнего периода года [1; 2]. В то же время, особенности строительства зимних лесных дорог и их эксплуатация чаще всего не рассматриваются [3; 4]. Чаще всего зимняя эксплуатация сводится либо к полной ликвидации снежного дорожного покрытия, либо только к очистке его от снега или борьбе с зимней скользкостью [5]. Учитывая, что все зимние дороги относятся к дорогам временного типа, для создания нормативных транспортно-эксплуатационных показателей необходимо изменить требования для их оценки. При анализе нормативной документации было выявлено, что общие критерии оценок зимних автомобильных дорожных покрытий, выполненных из снега или снежно-ледяных отложений, для лесных лесовозных дорог практически не обоснованы. Взаимодействие ходовых частей лесовозного автотранспорта с дорожными покрытиями, выполненными из снега или снего-льда, авторами практически не рассматривается [3; 5]. Общие требования к зимним дорожным покрытиям также отсутствуют. Имеется ограниченное количество работ, посвященных строительству и содержанию зимних лесных дорог, выполненных из снега, уплотненного снега, снежно-ледяных отложений, льда [5; 7–11].

Расчет и проектирование зимних дорожных одежд основаны на учете влияния лесовозного автотранспорта на лесотранспортную инфраструктуру и имеют существенные отличия от традиционного грузового автотранспорта, эксплуатируемого на дорогах общего поль-

зования [1–3]. Их снаряженная масса, методы размещения на автомобиле лесного груза, взаимодействие с дорожными покрытиями лесных дорог имеют совсем иные параметры.

Стало понятно, что для снижения стоимости строительства и уменьшения эксплуатационных затрат необходим поиск иных методов оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных лесовозных дорог [1].

Как было показано в наших исследованиях, с учетом территориального нахождения лесосырьевых баз, чтобы наиболее приемлемым способом увеличить эксплуатационную эффективность и повысить транспортно-эксплуатационные показатели лесотранспортной сети, необходимо осуществлять содержание зимних лесных дорог путем обработки дорожных покрытий фрикционными каменными материалами [4; 12; 13]. Именно при использовании каменного фрикционного материала существует возможность регулировать коэффициент сцепления и прочность зимних дорожных покрытий. На это же указывают и исследования некоторых ученых, предположивших, что изменение технологий содержания лесных дорог позволяет увеличить сроки их действия и продлить эксплуатацию весной [5; 14].

В работах [7; 15; 16] были рассмотрены физико-механические свойства уплотненного снежного дорожного покрытия, состоявшего из снега или льда. Были получены основные параметры покрытия, однако при оценке физико-механических свойств снежного дорожного покрытия имелись случаи получения неопределенностей в итоговых результатах. Стало очевидно, что применение традиционных способов оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог не обеспечивает получение сколько-нибудь целесообразных решений.

В этой связи разработка новых способов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных лесовозных дорог с фрикционным слоем, полученным при распределении каменных материалов, с использованием элементов теории нечетких множеств является актуальным направлением исследований.

Целью исследований является разработка метода оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных лесовозных дорог на основе обобщенного комплексного показателя с использованием элементов теории нечетких множеств.

В работе решались следующие задачи: оценка транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных лесовозных дорог; выбор и обоснование критериев обобщенного показателя зимних дорожных покрытий; формирование обучающих выборок для настройки нейронной сети по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог для различных критериев.

Методы и материалы. При формировании лесотранспортной инфраструктуры для зимнего строительства и эксплуатации лесосырьевых баз снежное покрытие, лежащее на дорожном покрытии лесных дорог, используют в качестве обработанного и специально уплотненного снежного покрова. Известно, что для лесных автомобильных дорог их основные транспортно-эксплуатационные показатели будут определяться физико-механическими характеристиками снежного покрова. Наиболее известным нормативно-техническим документом, посвященным автомобильным зимним лесным дорогам, а также автозимникам, стал ВСН 137-89 «Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и северо-востока СССР». В то же время, для зимней эксплуатации автомобильных дорог общего пользования имеется значительное число нормативно-технической документации и научно-исследовательских работ [5; 7; 8]. В основном в них рассматривают особенности территории расположения автомобильных дорог, характеристики дорожно-климатических условий, технологии строительства и зимней эксплуатации дорожных покрытий.

Итогом многолетних наблюдений за дорожно-климатическими условиями на территориях лесосырьевых баз [5; 17–19] стало подробное описание закономерностей формирования снежного покрова и снежных покрытий.

Снежный покров на территориях лесосырьевых баз послойно накапливается и формируется в течение всего зимнего периода. Для лесосырьевых баз, расположенных на территории Пермского края, характерно значительное количество зимних осадков. Так, по материалам исследований [8; 19], доля твердых осадков может достигать до половины от общего количества годовых осадков и колебаться в течение суток от 0,01 до 0,25 м. При этом возникает проблема как строительства, так и содержания зимней лесотранспортной инфраструктуры.

Особо следует отметить, что в условиях лесосырьевых баз Пермского края снежный покров формируется по несколько иным принципам, чем в условиях, где отсутствует лесная древесная растительность [19]. Происходит интенсивное перераспределение снежных осадков за счет лесной растительности. Существенно уменьшено ветровое воздействие на снежный покров. В работе [20] было особо отмечено влияние породного состава древесной растительности на максимальную глубину снега.

Рассмотренные особенности говорят о том, что в про-

цессе строительства и зимней эксплуатации лесных автомобильных дорог, выполненных из снега и снего-льда, необходимо учитывать влияние различных факторов, к которым следует отнести дорожно-климатические, организационные, технологические и физико-механические факторы.

Оценку транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесных дорог осуществляют на основании инструментального обследования. При обследовании проводят измерения глубины снега и снежного покрова, толщины зимнего дорожного покрытия, плотности зимнего дорожного покрытия, прочности зимнего дорожного покрытия, температуры окружающего воздуха.

В наших исследованиях инструментальное обследование зимних дорожных покрытий проводилось по двум критериям — коэффициенту сцепления и модулю динамического прогиба зимнего дорожного покрытия лесных дорог [12; 13].

Результатом проведенных исследований стал вывод о том, что зимние дорожные покрытия зимних лесных дорог необходимо проводить по показателям оценки транспортно-эксплуатационных качеств. Стало понятно, что необходимо учитывать значения коэффициента сцепления колес лесовозного транспорта с зимними дорожными покрытиями и значения модуля динамического прогиба [21–23].

В общем виде коэффициент сцепления колес лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог $F_{сц}$ однозначно может быть описан функцией:

$$F_{сц} = f(P_{сн}, \Phi_p, N_p), \quad (1)$$

где $P_{сн}$ — плотность зимнего дорожного покрытия, г/см³; Φ_p — размер частиц каменного фрикционного материала, мм; N_p — плотность распределения каменных фрикционных материалов по дорожному покрытию, кг/м².

В результате инструментального измерения коэффициента сцепления колес лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог установлено, что их величины варьируются в значительном диапазоне [8; 24]. На коэффициент сцепления оказывают свое влияние плотность зимнего дорожного покрытия, его жесткость, тип каменного фрикционного материала, его плотность распределения по покрытию, размер зерен и способ распределения каменного фрикционного материала по зимнему дорожному покрытию, расположение фрикционного материала по покрытию лесной дороги, погодно-климатические условия.

То же можно сказать и о показателях жесткости зимних дорожных покрытий. Наши исследования [13; 25] показали, что общая оценка основных транспортно-эксплуатационных показателей невозможна без дополнительных показателей, например таких, как модуль динамического прогиба зимнего покрытия дорожной поверхности. При анализе результатов измерения модулей динамических прогибов зимних покрытий было выявлено, что они тоже существенно варьируются. На динамический прогиб зимнего покрытия оказывают существенное влияние дорожно-климатические факторы, конструкция зимней дорожной одежды, величина уплотнения зимнего дорожного покрытия; раз-

меры зимнего дорожного покрытия; способ формирования зимнего покрытия [11; 12; 26].

В общем виде прочности зимнего дорожного покрытия D_n , состоящее из уплотненного снежного покрова или снежно-ледяных отложений, может быть описана с помощью выражения:

$$D_n = f(H_{сн}, N_p, P_{сн}), \quad (2)$$

где $H_{сн}$ — толщина зимнего дорожного покрытия, см; N_p — плотность распределения фрикционных каменных материалов по дорожному покрытию, кг/м²; $P_{сн}$ — плотность снега на зимнем дорожном покрытии, г/см³.

Таким образом, выбрав в качестве основных критериев эффективности коэффициент сцепления колес лесовозного автотранспорта автомобилей с зимним дорожным покрытием дорог, а также, в качестве второго критерия, прочность зимнего покрытия, пришлось использовать положение, что общие значения транспортно-эксплуатационных показателей снежно-ледяных дорожных покрытий лесных дорог характеризуются неопределенностью в полученных данных. Т. е. получить оценку транспортно-эксплуатационного состояния в классическом виде не представляется возможным, поэтому необходимо применить обобщенный метод формирования комплексного показателя эффективности [27].

В нашем случае необходимо оценить набор следующих показателей, таких как обобщенное значение коэффициентов сцепления колес лесовозного подвижного состава с зимним дорожным покрытием посредством коэффициента сцепления, а также оценить величины прочности зимнего дорожного покрытия посредством динамического модуля прогиба.

Примем во внимание, что в качестве усредненного обобщенного показателя эксплуатационной эффективности может быть использована сумма отдельных частных показателей. Вообще представленные отдельные частные показатели могут иметь различные физические показатели, различные размерности и даже способы и методы их оценок. В этом случае необходимо их привести к обобщенному или безразмерному виду.

Введем для каждого коэффициента частный показатель весов. Это необходимо для общего анализа вклада каждого частного показателя в общую сумму. Общая сумма частных показателей всегда должна составлять единицу. Будем считать, что наши коэффициенты k_1 и k_2 при каждом частном показателе будут определяться на основании инструментальных обследований зимних дорог.

Показатель k_1 служит для оценки доли вклада коэффициента сцепления с зимней дорожной поверхностью, показатель k_2 — для оценки доли вклада значения динамического модуля прогиба зимнего дорожного покрытия.

Примем, что в качестве показателя эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги может быть использован показатель типа:

$$C = \frac{k_1(Fc\mu_i - Fc\mu_i^{min})}{Fc\mu_i^{max} - Fc\mu_i^{min}} + \frac{k_2(D\pi_i - D\pi_i^{min})}{D\pi_i^{max} - D\pi_i^{min}}, \quad (3)$$

где k_i — коэффициенты веса отдельных частных кри-

териев; $Fc\mu_i^{min}, Fc\mu_i^{max}$ — минимальное и максимальное значение коэффициента сцепления дорожного зимнего покрытия; $D\pi_i^{min}, D\pi_i^{max}$ — минимальное и максимальное значение модуля динамического прогиба зимнего дорожного покрытия, МПа.

В табл. 1 приведен фрагмент программы исследований состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог для оценки транспортно-эксплуатационного состояния. Использованы следующие сокращения: ЭСДП — эксплуатируемое зимнее дорожное покрытие, обработанное каменными материалами; ЭСЛДП — эксплуатируемое снежно-ледяное зимнее дорожное покрытие, обработанное каменными материалами.

Результаты проведенных экспериментальных испытаний оценки показателей зимних лесных дорог по их транспортно-эксплуатационным показателям, лесных дорог, расположенных в Пермском крае. Время инструментального обследования — февраль-март 2024 г. При инструментальном обследовании зимних дорожных покрытий использовались местные каменные фрикционные материалы.

В результате опытно-экспериментальных исследований были получены основные параметры как прочностных показателей, так и коэффициентов сцепления зимних дорожных покрытий лесных дорог. Визировались типы зимних дорожных покрытий и способы их эксплуатации.

В качестве эксплуатационных показателей были использованы коэффициенты сцепления и прочности покрытия. Коэффициент сцепления определялся с помощью прибора для определения коэффициента сцепления типа ППК-МАДИ ВНИИБД. Оценка прочностных показателей производилась с применением электронного динамического плотномера типа ZFG-3000-10 GPS.

Методика измерения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием предполагает подготовку самого покрытия. Норма распределения каменного фрикционного материала проводилась методом взвешивания контрольного лотка. Прибор ППК-МАДИ устанавливался на подготовленную горизонтальную поверхность в полосе наката на зимнем дорожном покрытии.

Динамический плотномер типа ZFG-3000-10 GPS производит измерение прогиба дорожного покрытия при падении груза на круглый штамп. Результатом измерения служит динамический прогиб зимнего дорожного покрытия, измеряемый в МПа.

При решении задачи оценки коэффициента сцепления по выражению (1) в качестве выходного параметра принималось значение сцепления колес лесовозного автотранспорта с зимним покрытием. При инструментальном обследовании было зафиксировано наименьшее значение, которое составляло 0,1, и наибольшее значение — 0,71.

Для диапазонов входных параметров были использованы значения плотности зимнего дорожного покрытия. В наших опытах плотность дорожного покрытия изменялась от свежеснежного до снежно-ледяных отложений.

Таблица 1. Фрагмент программы исследования по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог

№ серии	Условия испытаний	№ серии	Условия испытаний
	Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 10–15 мм		Зимнее дорожное покрытие, обработанное песчано-щебеночной смесью С2 (фракция 0–20)
4.3. ЭЩ	ЭСДП плотностью 0,65 г/см ³ , плотность распределения 5,0 кг/м ²	6.3. ЭЩЩ	ЭСДП плотностью 0,65 г/см ³ , плотность распределения 5,0 кг/м ²
4.4. ЭЩ	ЭСДП плотностью 0,65 г/см ³ , плотность распределения 1,0 кг/м ²	6.4. ЭЩЩ	ЭСДП плотностью 0,65 г/см ³ , плотность распределения 3,0 кг/м ²
4.5. ЭЩ	ЭСДП плотностью 0,50 г/см ³ , плотность распределения 4,0 кг/м ²	6.5. ЭЩЩ	ЭСДП плотностью 0,50 г/см ³ , плотность распределения 8,0 кг/м ²
4.9. ЭЩ	ЭСЛДП плотностью 0,80 г/см ³ , плотность распределения 3 кг/м ²	6.9. ЭЩЩ	ЭСЛДП плотностью 0,80 г/см ³ , плотность распределения 3 кг/м ²

Любая оценка коэффициента сцепления с зимними дорожными покрытиями лесных дорог характеризуется неопределенностью в полученных данных, и при разработке системы оценки эффективности имеет смысл воспользоваться нейронечеткой продукционной сетью, такой как ANFIS (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*). Представленная нейронечеткая сеть построена на основе нечеткой логики базы правил [28]. При разработке нейронечеткой сети использовалась среда *Matlab* [29].

Оценку транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог по критерию коэффициента сцепления наиболее удобно осуществлять в виде формирования обучающих выборок, полученных в результате опытно-экспериментальных исследований. Фрагмент обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию коэффициента сцепления приведен в табл. 2.

Таблица 2. Фрагмент обучающей выборки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию коэффициента сцепления

№	Ожидаемое значение	Тип зимнего дорожного покрытия	Покрытие, г/см ³	Каменный материал, фракция, мм	Зерновой состав, фракция, мм	Плотность распределения по покрытию, кг/м ²
1	$\varphi_{сц} = 0,43$	покрытие уплотненное снежное	0,65	от 15 до 20	от 15 до 20	не менее 6,00
2	$\varphi_{сц} = 0,32$	покрытие снежно-ледяное	0,76	от 0 до 20	от 0,16 до 20	не менее 3,00
3	$\varphi_{сц} = 0,28$	покрытие ледяное	0,80	от 0 до 20	от 0,16 до 20	не менее 1,00

Варьировались значения плотности дорожного покрытия, плотности распределения фрикционных каменных материалов, от песка до щебня.

Были зафиксированы участки зимнего дорожного покрытия с одинаковыми значениями коэффициента сцепления, но с различным количеством распределения фрикционного каменного материала.

Решение задачи оценки прочности зимних дорожных покрытий проводилось с помощью выражения (2). В качестве выходного параметра принимаем динамический прогиб дорожного покрытия. Прогиб оцениваем динамическим модулем прогиба дорожного покрытия в МПа.

В результате измерений был зафиксирован диапазон от 89,2 до 277,3 МПа.

В качестве входных параметров были использованы величины значений плотности снега у зимнего дорожного покрытия. Использовались наименьшие и наибольшие значения, зафиксированные в результате измерения плотности зимнего дорожного покрытия. В нашем случае они изменялись от снега свежеснежавшего, снега уплотненного и до снежно-ледяных отложений. Оценивались величина уплотненного зимнего дорожного покрытия, слой фрикционных материалов по дорожному покрытию и плотность его распределения.

На основании разработанного плана эксперимента в табл. 3 приведен фрагмент значения обучающих выбо-

рок по критерию динамического модуля как основного критерия при оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных автомобильных дорог.

Исследование динамических прогибов дорожных покрытий зимних лесных дорог показало, что на их величину существенное влияние оказывают плотность зимнего покрытия и нормы распределения каменных фрикционных материалов по покрытию.

Так как задача оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог характеризуется взаимозависимыми параметрами, в качестве критерия был выбран обобщенный показатель.

Общая постановка задачи выполнялась на основе формулы (3).

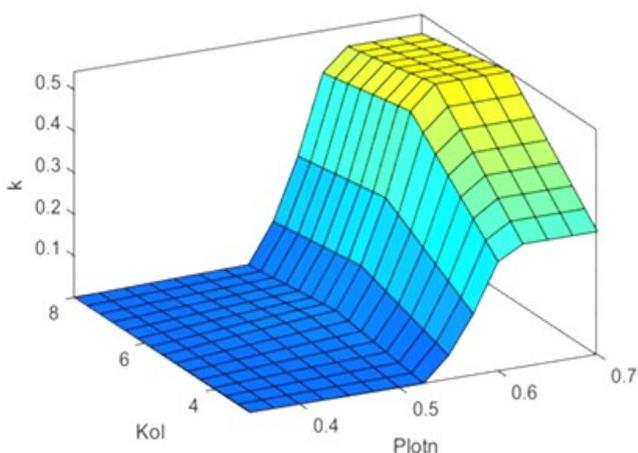
Вводим ограничения. Используем методы теории оптимизации по критерию весовых коэффициентов. Диапазон значений коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием и значений динамического модуля прогиба, *МПа*, можно представить как:

$$F_{сц}^{min} = 0,10; F_{сц}^{max} = 0,71 \quad (4)$$

$$D\pi^{min} = 89,2 \text{ МПа} \quad D\pi^{max} = 277,3 \text{ МПа}$$

Таблица 3. Фрагмент обучающей выборки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию динамического прогиба

№	Ожидаемое значение	Тип зимнего дорожного покрытия	Покрытие, $г/см^3$	Каменный материал, фракция, мм	Зерновой состав фракции, мм	Плотность распределения по покрытию, $кг/м^2$
1	$Dп = 225,2$	уплотненное снежное	0,65	от 15 до 20	от 15 до 20	не менее 6,00
2	$Dп = 284,6$	снежно-ледяное	0,76	от 0 до 20	от 0,16 до 20	не менее 3,00
3	$Dп = 268,7$	ледяное	0,80	от 0 до 20	от 0,16 до 20	не менее 1,00

**Рис.** Графические зависимости коэффициента сцепления с зимними лесными дорогами. Обработка щебня фракции 10–15 мм с величиной посыпки каменных фрикционных материалов, $кг/м^2$

Заключение. Разработанный метод оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по комплексному обобщенному показателю позволил найти решение с учетом неопределенности в полученных данных.

В результате были получены основные факторы, влияющие на прочностные показатели зимних дорожных покрытий лесных дорог, с использованием современных методов комплексного инструментального исследования. Получены основные показатели динамических прогибов дорожных покрытий, и оценены значения динамических модулей этих прогибов.

Сформирован комплексный обобщенный показатель оценки транспортно-эксплуатационного состояния лесной дороги.

Проведенные исследования выявили возможность использования местных каменных фрикционных материалов для обеспечения заявленной прочности покрытий, они могут быть использованы для повышения коэффициента сцепления. В то же время, зерновой анализ показал, что песок чаще всего замельчен, имеет много пылеватых частиц и не отличается структурной прочностью. Наибольшую структурную прочность показали щебни фракций 10–15 и 8–16 мм.

Было определено, что для достижения требуемых нормативно-технических показателей коэффициент сцепления для зимнего покрытия должен составлять: зимнее дорожное покрытие, состоящее из уплотненно-го снежного покрова — не менее 0,30; зимнее дорож-

ное покрытие, состоящее из снежно-ледяных отложений — не менее 0,28. Получены зависимости изменения коэффициента сцепления с зимними дорожными покрытиями в функции от плотности дорожного покрытия и плотности распределения различных фрикционных каменных материалов с применением теории нечетких множеств и нейросетевых технологий.

Прочность снежного зимнего дорожного покрытия будет зависеть от плотности самого покрытия и вида плотности распределения каменных фрикционных материалов. Наибольшее значение на прочность покрытия оказывает размер каменного материала. Так песчаные фракции размером от 0,16 до 5,0 мм практически не оказывают влияния, в то же время фракция от 5,0 до 20,0 мм оказывает наибольшее влияние на динамический модуль прогиба.

На основании проведенных исследований были разработаны варианты обработки фрикционными материалами зимних дорожных покрытий. Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрикционными каменными материалами следует считать: для фракции 5–10 мм при плотности распределения не менее 6,5 $кг/м^2$; для фракции 10–15 мм с плотностью распределения не менее 6,0 $кг/м^2$; для фракции 10–20 мм с плотностью распределения каменных материалов, не менее 9,0 $кг/м^2$ при значении обобщенного показателя транспортно-эксплуатационного состояния не менее 0,605.

При этих параметрах были зафиксированы значения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием не менее 0,442 и значением модуля динамического прогиба зимнего покрытия не менее 192,2 МПа.

По мере уменьшения размеров зерен каменного фрикционного материала изменяется и обобщенный показатель транспортно-эксплуатационного состояния лесных дорог. Особенно негативно влияние мелких фракций каменных материалов. Например, использования песка фракции 0–5 имеет показатель эффективности не более $C = 0,215$, что совершенно неприемлемо для зимних лесных дорог.

Разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию обобщенного показателя может быть рекомендована для повышения эффективности эксплуатации зимних лесных дорог, а также для разработки оптимальных планов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

Литература

1. Алябьев В.И., Ильин Б.А., Кувалдин Б.И., Грехов Г.Ф. Сухопутный транспорт леса. М.: Лесная пром-сть, 1990. 416 с.
2. Вырко Н.П. Сухопутный транспорт леса. Минск: Высшая шк., 1987. 437 с.
3. Леонович И.И. Дороги и транспорт лесной промышленности: справ. пособие. Минск: Высшая шк., 1979. 416 с.
4. Кручинин И.Н. Транспортная инфраструктура лесов. Екатеринбург: ФГБОУ ВО Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2022. 134 с.
5. Морозов С.И., Павлов Ф.А., Плакса Л.Н., Савельев Э.Н. Зимние дороги в лесной промышленности. М.: Лесная пром-сть, 1969. 168 с.
6. 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.
7. Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, 1983. 128 с.
8. Афанасьев И.А., Кручинин И.Н. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона. Пермь: Изд-во Перм. гос. технического ун-та, 2006. 135 с.
9. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction. SAE Int. J. Mater. Manuf. 2011. 4 (1). P. 278-288.
10. Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives // PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing, 2009. 284 p.
11. 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.
12. Лабыкин А.А., Кручинин И.Н., Ахтямов Э.Р., Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Овсейчик Д.В. Совершенствование методов технологического контроля уплотненного снежного покрова при строительстве и эксплуатации зимней транспортной инфраструктуры лесов // Системы Методы Технологии. 2023. № 4 (60). С. 147-154.
13. Кручинин И.Н., Лабыкин А.А., Побединский В.В., Ахтямов Э.Р. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния уплотненного снежного покрова зимних лесных дорог с использованием нейронных сетей // Деревообрабатывающая пром-сть. 2023. № 3. С. 3-10.
14. Корунов М.М. Ускоренный способ постройки зимних дорог. М.: Гослестехиздат, 1946. 34 с.
15. Вуори А.Ф. Механические свойства снега как строительного материала // Физические методы исследования льда и снега: сб. тр. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 118 с.
16. Richmond P., 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.
17. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеониздат, 1957. 179 с.
18. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
19. Галахов Н.Н. Снежный покров в лесу // Метеорология и гидрология. 1940. № 3. С. 15-16.
20. Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.
21. 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.
22. Yong R., Fukue M. Performance of snow under confined compression // Journal of Terramechanics. April 1977. Vol. 14 (1). P. 37-49.
23. 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-во АН СССР, 1945. С. 10-13.
24. Лабыкин 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.
25. Кручинин И.Н., Лабыкин 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; заявл. 16.05.2023; опубл. 28.06.2023.
26. Shoop S., Kesler K., Haehnel R. Finite Element Modeling of Tires on Snow // Tire Science and Technology. TSTCA. 2006. Vol. 34 (1). P. 2-37.
27. Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. М.: Физматлит, 2008. 320 с.
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> (date of access: 30.08.2024).

References

1. Alyab'ev V.I., Il'in B.A., Kuvaldin B.I., Grekhov G.F. Land transport of the forest. M.: Lesnaya prom-st', 1990. 416 p.
2. Vyrko N.P. Land transport of the forest. Minsk: Vysshaya shk., 1987. 437 p.
3. Leonovich I.I. Roads and transport of the timber industry: sprav. posobie. Minsk: Vysshaya shk., 1979. 416 p.
4. Kruchinin I.N. Transport infrastructure of forests. Ekaterinburg: FGBOU VO Ural. gos. lesotekhn. un-t., 2022. 134 p.
5. Morozov S.I., Pavlov F.A., Plaksa L.N., Savel'ev E.N. Winter roads in the timber industry. M.: Lesnaya prom-st', 1969. 168 p.
6. 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.
7. Dyunin A.K. In the kingdom of snow. Novosibirsk: Nauka, 1983. 128 p.
8. Afnas'ev I.A., Kruchinin I.N. Winter maintenance of logging roads in the Ural region. Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhnicheskogo un-ta, 2006. 135 p.
9. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction. SAE Int. J. Mater. Manuf. 2011. 4 (1). P. 278-288.
10. Thompson M.P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives // PhD Dissertation, Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing, 2009. 284 p.
11. VSN 137-89. Design, construction and maintenance of winter roads in Siberia and the north-east of the USSR. Vved. 01.01.1990. M.: Transport, 1991. 157 p.
12. Labykin A.A., Kruchinin I.N., Ahtyamov E.R., Gorohovskij A.G., Shishkina E.E., Ovsejchik D.V. Improving methods for technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter transport infrastructure for forests // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 147-154.
13. Kruchinin I.N., Labykin A.A., Pobedinskij V.V., Ahtyamov E.R. Assessment of the transport and operational state of compacted snow cover on winter forest roads using neural networks // Derevoobrabatvaivashaya promishlennost' (Woodworking industry). 2023. № 3. P. 3-10.

14. Korunov M.M. Accelerated way to build winter roads. M.: Goslestekhzdat, 1946. 34 p.
15. 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.
16. Richmond P., 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.
17. Kuz'min P.P. Physical properties of snow cover. L.: Gidrometeoizdat, 1957. 179 p.
18. Rihter G.D. Snow cover, its formation and properties. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1945. 120 p.
19. Galahov N.N. Snow cover in the forest // Russian Meteorology and Hydrology. 1940. № 3. P. 15-16.
20. Vojtkovskij K.F. Mechanical properties of snow. M.: Nauka, 1977. 126 p.
21. 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 // Design, testing, operation and marketing of automotive equipment. N. Novgorod: NGTU, 1997. P. 121-129.
22. Yong R., Fukue M. Performance of snow under confined compression // Journal of Terramechanics. April 1977. Vol. 14 (1). P. 37-49.
23. 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. M.: Izd-vo AN SSSR, 1945. P. 10-13.
24. Labykin A.A., Kruchinin I.N., Ahtyamov E.R. Development of requirements for compacted snow cover on winter forest roads // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Wood-working industry). 2023. № 2. P. 10-19.
25. 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; zayavl. 16.05.2023; opubl. 28.06.2023.
26. Shoop S., Kesler K., Haehnel R. Finite Element Modeling of Tires on Snow // Tire Science and Technology. TSTCA. 2006. Vol. 34 (1). P. 2-37.
27. Izmailov A.F., Solodov M.V. Numerical optimization methods. M.: Fizmatlit, 2008. 320 p.
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> (date of access: 30.08.2024).