

ПОВЫШЕНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

И.Н. Кручинин¹✉, В.В. Никитин², О.Н. Бурмистрова³,
Е.Н. Щербаков², Э.Р. Ахтямов⁴, Д.В. Овсейчик¹

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

²ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

³ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Россия, 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13

⁴ООО «Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов» («УралНИИСтром»), Россия, 454047, г. Челябинск, ул. Сталеваров, д. 5

kruchininin@m.usfeu.ru

Представлены результаты повышения транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Приведена методика оценки состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием обобщенного комплексного показателя. Установлено, что, что в качестве основных критериев обобщенного показателя необходимо использовать показатель по коэффициенту сцепления колес лесовозного транспорта со снежным покрытием и прочностной показатель покрытия, по модулю динамического прогиба. Рассмотрено влияние на коэффициент сцепления плотности снежного дорожного покрытия и количества распределения различных фрикционных материалов. Установлено влияние размеров зерен фрикционных материалов и их видов на сцепные свойства покрытий. Выявлено, что наибольший коэффициент сцепления достигается при плотности распределения по покрытию от 5,0 до 6,0 кг/м², для щебня фракции 5–10. Для древесной щепы плотность распределения составила не менее 5 м³ на 100 м² снежного дорожного покрытия. При этом значении был зафиксирован коэффициент сцепления со снежной дорожной поверхностью не менее 0,4 и модуль динамического прогиба не менее 195 МПа. Показано, что полученные значения снежных покрытий лесных дорог характеризуется неопределенностью в данных, поэтому для анализа обобщенного показателя использовалась адаптивная нейронечеткая сеть типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Установлено, что значение обобщенного показателя транспортно-эксплуатационного состояния должно быть не менее 0,605. Рекомендуется, для оценки коэффициента сцепления использовать прибор ППК – МАДИ, а для оценки прочности снежных дорожных покрытий использовать динамический плотномер со свободно падающим грузом типа ZFG-3000 GPS. Соблюдение представленных рекомендаций позволяет оперативно оценивать и влиять на транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог и всей лесотранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: зимние лесные дороги, снежное дорожное покрытие, коэффициент сцепления, модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия

Ссылка для цитирования: Кручинин И.Н., Никитин В.В., Бурмистрова О.Н., Щербаков Е.Н., Ахтямов Э.Р., Овсейчик Д.В. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры в зимний период // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 156–169. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-156-169

Стратегия устойчивого развития лесопромышленного комплекса Российской Федерации предусматривает повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесных дорог лесотранспортной инфраструктуры при освоении лесосырьевых баз. Обычно транспортное освоение лесосырьевых баз рассмат-

ривается для летнего периода года, причем только по лесотранспортным путям постоянного действия [1]. При этом практически все исследователи рассматривают строительство и эксплуатацию лесных дорог только для летнего периода [1, 2], даже для северных территорий. В то же время проблемы строительства и эксплуатации зимних лесных дорог практически не рассматриваются [3, 4]. Поскольку зимние лесные дороги относятся к дорогам временного

пользования, большинство исследователей в области эксплуатации этих временных лесотранспортных путей пришли к выводу о том, что для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей следует совершенствовать технологии по их сохранению именно в отношении зимних лесных дорог [5, 6]. При анализе условий строительства и эксплуатации зимних лесных дорог в уплотненном снежном дорожном покрытии был сделан вывод о том, что в пределах действующей нормативно-технической документации необходим пересмотр основных требований к эксплуатационным показателям рассматриваемых покрытий.

Известно, что для зимних лесных дорог характерно исполнение дорожных одежд, состоящих из снега, снежно-ледяных отложений, уплотненного снежного покрова или ледяных покрытий [5, 7–11].

Важно учитывать, что лесовозный подвижной состав, эксплуатируемый в условиях лесосырьевых баз, значительно отличается от традиционных грузовых автомобилей, эксплуатируемых на дорогах общего пользования [1–3]. В современных условиях при транспортном освоении лесосырьевых баз в условиях глобального изменения климата изменились оценочные параметры физико-механических характеристик снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Традиционные показатели уже не могут обеспечить требуемое транспортно-эксплуатационное качество лесных дорог.

Для дальнейшего уменьшения затрат на строительство и эксплуатацию зимней лесотранспортной инфраструктуры важное значение имеет разработка комплекса мероприятий по проведению оценок основных транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры [1].

Как было показано в наших исследованиях [4, 12, 13], снежный покров может оказывать не только положительное влияние на прочностные свойства дорожных покрытий лесных дорог, но и существенно изменить их транспортно-эксплуатационные показатели, а именно коэффициент сцепления и несущую способность дорожного покрытия. Некоторые ученые даже предположили, что при изменении технологий строительства снежных покрытий, может появиться возможность воздействия на эксплуатационные показатели зимних лесных дорог даже в весенний период [5, 14].

В работах [7, 15, 16] была сделана попытка провести оценку физико-механических характеристик снежного дорожного покрова только за счет измерения физико-механических свойств снега и снежно-ледяного покрытия.

Были получены положительные результаты, однако нестабильность свойств снежного материала привела к неопределенностям в полученных результатах. Стало очевидно, что традиционные методы оценки транспортно-эксплуатационного состояния покрытий зимних лесных дорог не способны обеспечить эти решения.

В этой связи повышение транспортно-эксплуатационного состояния дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием методов нечетких множеств является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Цель работы

Цель работы — повышение транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог с использованием методов нейро-нечетких сетей.

Материалы и методы

В практике строительства и эксплуатации лесотранспортной инфраструктуры в зимний период, уплотненный снежный покров на дорожном покрытии рассматривают как специально сформированный и уплотненный слой снега. От его физико-механических показателей зависят основные транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог. Особенности строительства автозимников и их эксплуатации посвящено значительное количество работ [5, 7, 8, 11, 12, 13, 14]. В этих работах важное место отводится не только условиям строительства снежных дорожных покрытий и особенностям природно-климатических условий расположения автомобильных дорог, но и технологиям строительства и эксплуатации.

Итогом многолетних наблюдений за климатическими условиями, в которых функционируют лесосырьевые базы [5, 17–19], стало подробное изучение основных условий и закономерностей формирования на этих территориях снежного покрова.

Известно, что снег послойно накапливается и может образовывать снежный покров значительной мощности [7]. Поскольку доля зимних твердых осадков на северных территориях может достигать почти половину общего количества годовых осадков, то решение проблемы строительства и эксплуатации зимних лесных дорог приобретает первостепенное значение [8, 19]. Обычно в условиях лесосырьевых баз прирост снежного покрова, в зависимости от погодных условий, может изменяться в течение одних суток от 0,01 до 0,25 м.

Строительство и эксплуатация зимней лесотранспортной инфраструктуры для условий северных территорий Урала имеет свои особенности. Следует учитывать, что в условиях лесосырьевых баз снежное покрытие формируется несколько по другим принципам, чем на местности, лишенной древесной растительности [20]. Происходит интенсивное перераспределение снежных осадков за счет лесонасаждений. Оказывают влияние изменения ветровых нагрузок на снежный покров. В работе [19] было отмечено влияние даже породного состава древесной растительности на толщину снежного покрова.

Таким образом, при строительстве и эксплуатации зимних лесных дорог необходимо учитывать существенное количество таких факторов, как физическо-механические и природно-климатические.

Обычно проводятся следующие оценки: измерение толщины снежного дорожного покрытия, измерение плотности снежного покрытия, измерение температуры окружающего воздуха, измерение жесткости снежного дорожного покрытия, измерение коэффициента сцепления. В наших исследованиях предлагается проводить инструментальное обследование различных видов снежных дорожных покрытий с оценкой не только коэффициента сцепления, но и прочностных показателей, а именно модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия [12, 13].

Выполненные исследовательские работы позволили сделать вывод о том, что в качестве выходного параметра для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог следует принять коэффициент сцепления колес лесовозного транспорта со снежной поверхностью и модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия [21–25].

В общем виде коэффициент сцепления колес лесовозных автомобилей со снежной поверхностью $\varphi_{\text{сц}}$ достаточно полно можно определить как функцию

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

где $P_{\text{сн}}$ — плотность снежного дорожного покрытия, г/см³;

Φ_p — размер зерен эксплуатационного материала, мм;

N_p — плотность распределения фрикционных материалов, кг/м².

Анализ результатов измерения коэффициента сцепления колес лесовозных автомобилей с дорожными покрытиями зимних лесных дорог показал, что он изменяется в широком диапазоне [8, 26, 27]. На сцепные свойства колес

оказывают влияние плотность снежного дорожного покрытия, его прочность, тип фрикционного материала, его плотность распределения, размер и фракционный состав материала, вид распределения фрикционного материала по дорожному покрытию, способ распределения и расположения на проезжей части лесной дороги, погодно-климатические факторы.

То же самое можно сказать и о прочностных показателях снежных дорожных покрытий. Выполненные нами исследования [13, 28] позволили сделать вывод о том, что в качестве дополнительного выходного параметра при оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог следует выбрать модуль динамического прогиба снежной дорожной поверхности. При анализе результатов измерения динамических прогибов снежных покрытий было выявлено, что они могут изменяться в достаточно широком диапазоне, поскольку оказываются под влиянием степени уплотнения снежной поверхности, типа снежной поверхности, его толщины, способа уплотнения снежного покрытия и природно-климатических факторов [11, 12, 29, 30].

Оценку прочностных свойств снежного дорожного покрытия D_n адекватно можно описать с помощью выражения

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

где $H_{\text{сн}}$ — толщина снежного покрытия, см;

N_p — плотность распределения фрикционных материалов, кг/м²;

$P_{\text{сн}}$ — плотность снежного дорожного покрытия, г/см³.

Отсюда следует, что проблема оценки основных транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог со снежными дорожными покрытиями относится к чрезвычайно сложной, многопараметрической задаче с взаимозависимыми параметрами и характеризуется неопределенностью в данных, т. е. ее решение в обычной формулировке невозможно. В связи с этим рекомендуется использовать методы, разработанные на основе построения обобщенного комплексного показателя.

В данном случае оценка транспортно-эксплуатационных показателей зимней лесной дороги будет заключаться в определении таких параметров, как значения коэффициента сцепления с дорожным покрытием через коэффициент сцепления и значения прочности дорожного покрытия по модулю динамического прогиба.

За обобщенный показатель эффективности примем сумму частных показателей. Ввиду того, что частные показатели имеют различные

физическую природу, размерности, способы измерения, их необходимо привести к обобщенному безразмерному виду.

Для возможности учета доли вклада для каждого частного показателя воспользуемся оценкой по коэффициентам весов, которые, в свою очередь, также номеруются таким образом, чтобы сумма коэффициентов была равна единице. При этом назначение приоритетов для любых частных показателей будет осуществляться присвоением отдельных весовых коэффициентов. Все весовые коэффициенты, в данном случае это k_1 и k_2 , при каждом частном показателе будут определяться только пользователем.

Таким образом, в общем виде разработанный обобщенный показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимней лесной дороги C принимает вид

$$C = \frac{k_1 (\varphi_{\text{сц}_i} - \varphi_{\text{сц}_i \text{ min}})}{\varphi_{\text{сц}_i \text{ max}} - \varphi_{\text{сц}_i \text{ min}}} + \frac{k_2 (D_{\text{п}_i} - D_{\text{п}_i \text{ min}})}{D_{\text{п}_i \text{ max}} - D_{\text{п}_i \text{ min}}}, \quad (3)$$

где k_i — весовые коэффициенты частных критериев;

$\varphi_{\text{сц}_i \text{ min}}$, $\varphi_{\text{сц}_i \text{ max}}$ — минимальные и максимальные значения показателей коэффициента сцепления со снежной дорожной поверхностью;

$D_{\text{п}_i \text{ min}}$, $D_{\text{п}_i \text{ max}}$ — минимальные и максимальные значения модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия, МПа.

До начала проведения работ по оценке транспортно-эксплуатационного состояния лесотранспортной инфраструктуры в зимний период была разработана программа исследований их физико-механических характеристик (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие сокращения:

Сн — снежное дорожное покрытие;

Л — ледяное дорожное покрытие;

СДП — уплотненное снежное дорожное покрытие;

ЭП — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песком;

ЭЩ — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем;

ЭПЩ — эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песчано-щебеночной смесью;

СЛДП — снежно-ледяное дорожное покрытие;

ЭСДП — эксплуатируемое обработанное фрикционными материалами снежное дорожное покрытие;

ЭСЛДП — эксплуатируемое обработанное фрикционными материалами снежно-ледяное дорожное покрытие;

Щ.СДПЩ — обработанное снежное дорожное покрытие с распределенной по нему щепой древесной;

ЩО.ЩСДП — обработанное снежное дорожное покрытие с распределенной по нему щепой древесной.

В качестве эксплуатационных материалов для повышения транспортно-эксплуатационных показателей использовали каменные — песок, щебень, песчано-щебеночные смеси [31–33] и древесные материалы — опил, щепа из отходов древесины [34, 35].

При обработке полученных опытно-экспериментальных данных применили методы обработки статистических данных [36].

Результаты и обсуждение

Основные физико-механические показатели снежных дорожных покрытий были получены в процессе эксплуатации участков зимних лесных дорог на полигоне, расположенном на территории Пермского края в период февраль — март 2024 г. Для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей были использованы эксплуатационные материалы (табл. 2).

В результате выполненных исследований получены значения прочностных показателей и коэффициентов сцепления зимних лесных дорог в зависимости от вида снежного покрытия и способов его содержания.

В качестве эксплуатационных показателей был использован коэффициент сцепления, полученный с помощью прибора ППК-МАДИ, а оценка прочностных показателей проводилась с применением электронного динамического плотномера типа ZFG-3000 GPS.

Методика измерения коэффициента сцепления предполагает подготовку дорожного покрытия перед измерением. Измерение толщины снежного или снежно-ледяного покрытия проводится измерительной линейкой. Измерение плотности снежного дорожного покрытия — методом режущего кольца с использованием набора ПГ-400. Норма распределения фрикционного материала проводилась методом взвешивания контрольного лотка. Прибор ППК-МАДИ устанавливался на подготовленную горизонтальную поверхность в полосе наката на дорожном покрытии (рис. 1).

Динамический плотномер со свободно падающим грузом ZFG-3000 GPS позволяет оценивать динамический прогиб дорожного

Т а б л и ц а 1

**Фрагмент программы оценки транспортно-эксплуатационного состояния
лесотранспортной инфраструктуры в зимний период**

**Fragment of the program for assessing the transport and operational state
of forestry transport infrastructure in the winter period**

Код серии	Условия эксплуатации	Код серии	Условия эксплуатации
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, не обработанное		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 5–10 мм	
1.1. Сн	СДП, плотность 0,35 г/см ³	6.2. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
1.3. Сн	СДП, плотность 0,55 г/см ³	6.4. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
1.5. Сн	СДП, плотность 0,65 г/см ³	6.5. ЭЩС	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
1.8. Л	СЛДП, плотность 0,80 г/см ³	6.6. ЭЩС	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песком фракции 0...5 мм		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 10...15 мм	
2.2. ЭП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 0,3 кг/м ²	4.2. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
2.4. ЭП	ЭСДП, плотность 0,55 г/см ³ , плотность посыпки 0,2 кг/м ²	4.3. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 кг/м ²
2.6. ЭП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 0,2 кг/м ²	4.6. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1 кг/м ²
2.7. ЭП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 0,5 кг/м ²	4.7. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 3 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное песчано-щебеночной смесью С2 (фракции 0...20)		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щебнем фракции 15...20 мм	
5.1. ЭПЩ	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 кг/м ²	3.2. ЭЩ	ЭСДП – плотностью 0,35 г/см ³ , плотность посыпки – 7,0 кг/м ²
5.4. ЭПЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 6,5 кг/м ²	3.3. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²
5.7. ЭПЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 2 кг/м ²	3.5. ЭЩ	ЭСДП, плотность 0,65 г/см ³ , плотность посыпки 8,0 кг/м ²
5.8. ЭПЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 35 кг/м ²	3.6. ЭЩ	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 3 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 5...10 (опил)		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 20...100	
10.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 м ³ /м ²	11.1. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²
10.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²	11.2. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,35 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
10.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 м ³ /м ²	11.3. ЩО. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
10.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 кг/м ²	11.4. ЩО. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 кг/м ²
Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 10...50		Эксплуатируемое снежное дорожное покрытие, обработанное щепой древесной из отходов фракции 20...160	
20.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,58 г/см ³ , плотность посыпки 1,0 м ³ /м ²	22.1. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,61 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²
20.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,40 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 м ³ /м ²	22.2. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,41 г/см ³ , плотность посыпки 3,0 м ³ /м ²
20.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,60 г/см ³ , плотность посыпки 4,0 м ³ /м ²	22.3. Щ. СЩДП	ЭСДП, плотность 0,62 г/см ³ , плотность посыпки 8,0 м ³ /м ²
20.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 2,0 кг/м ²	22.4. Щ. СЩДП	ЭСЛДП, плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки 5,0 кг/м ²

Т а б л и ц а 2

**Характеристика эксплуатационных материалов, применяемых для
повышения транспортно-эксплуатационных показателей дорожных
покрытий зимних лесных дорог**

**Characteristics of operational materials used to improve the transport
and operational performance of road surfaces on winter forest roads**

Эксплуатационные материалы	Фракция, мм	Размер зерен материала, мм	Прочность, МПа	Норма распределения, кг/м ² (м ³ /100 м ²)
Песок	0...5	0,16...5,0	–	0,2...0,5
Посыпка антигололедная	0...2,5	0,16...2,5	600	0,2...0,6
Щебень	5...10	5...10	800	2,0...7,0
Щебень	5...15	5...15	800	2,0...5,0
Щебень	10...15	10...15	1000	3,0...7,0
Щебень	15...20	15...20	1000	5,0...8,0
Песчано-щебеночная смесь марки С2	0,16...20	0,16...20,0	1200	0,5...3,0
Древесные опилки	0...5	0,16...5,0	–	1,0...3,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	10...50	10...50	–	2,0...4,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	20...100	20...100	–	2,0...5,0 (м ³ /100 м ²)
Щепа древесная	20...160	20...160	–	2,0...8,0 (м ³ /100 м ²)

покрытия при падении груза на нагрузочную плиту, установленную на подлежащую испытанию обработанную снежную поверхность. Результаты испытаний в виде модуля динамического прогиба снежного дорожного покрытия, измеряемого в мегапаскалях (кН/м²), автоматически записываются на карту памяти.

При решении задачи оценки коэффициента сцепления по выражению (1) в качестве выходного параметра принималось значение сцепления колес лесовозного транспорта со снежной поверхностью, оцениваемого коэффициентом сцепления со снежной поверхностью в пределах изменения от 0,1 до 0,71. В качестве входных были использованы такие параметры, как плотность снежного дорожного покрытия, оцениваемого от свежевывающего до снежно-ледяных отложений (г/см³), размер зерен эксплуатационных материалов, используемых для обработки снежных дорожных покрытий лесных дорог (мм) и плотность распределения эксплуатационных материалов (кг/м²).

Динамический плотномер ZFG-3000 GPS имеет встроенную функцию построения графических зависимостей динамических прогибов в зависимости от времени. Для динамических деформаций характерны незначительные амплитуды и быстрое изменение значений (рис. 2, 3). Как видно из этих рисунков, распределение эксплуатационных материалов на покрытии существенно изменяет динамические показатели.

Анализ графиков динамических прогибов снежных покрытий показал, что на величину

прогибов оказывают влияние плотность дорожного покрытия и плотность распределения эксплуатационных материалов. С возрастанием нормы распределения изменяются и динамические показатели покрытий.

Анализ результатов измерения динамических прогибов снежных дорожных покрытий показывает, что они изменяются в широком диапазоне. Выбор в качестве критерия обобщенного показателя показал, что оценка транспортно-эксплуатационных показателей дорожных покрытий зимних лесных дорог характеризуется взаимозависимыми параметрами.

Из приведенного выше ясно, что задача оценки коэффициента сцепления и прочности зимних снежных дорожных покрытий лесных дорог характеризуется неопределенностью данных. Поэтому для ее решения следует использовать методы, разработанные на основе интеллектуальных систем. В данном случае при разработке интеллектуальной системы была использована адаптивная нейро-нечеткая продукционная сеть 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. Сеть разработана в среде MatLab [38].

Рассмотрим параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог по критерию коэффициента сцепления и модуля динамического прогиба (табл. 3).



а



б



в



г

Рис. 1. Опытно-экспериментальные исследования обработанных снежных дорожных покрытий: а — оценка прочности снежного покрытия, обработанного щебнем; б — оценка прочности снежного покрытия, обработанного щепой с помощью динамического плотнмера ZFG-3000 GPS; в — оценка коэффициента сцепления снежного покрытия, обработанного щебнем с помощью прибора ППК-МАДИ; г — оценка коэффициента сцепления снежного покрытия, обработанного щепой древесной с помощью прибора ППК-МАДИ

Fig. 1. Experimental studies of snow road surface: а — assessment of the strength of snow cover treated with crushed stone; б — assessment of the strength of the snow cover treated with wood chips using a dynamic density meter ZFG-3000 GPS; в — assessment of the coefficient of adhesion of snow cover treated with crushed stone using the PPK-MADI device; г — assessment of the coefficient of adhesion of snow cover treated with wood chips using the PPK-MADI device

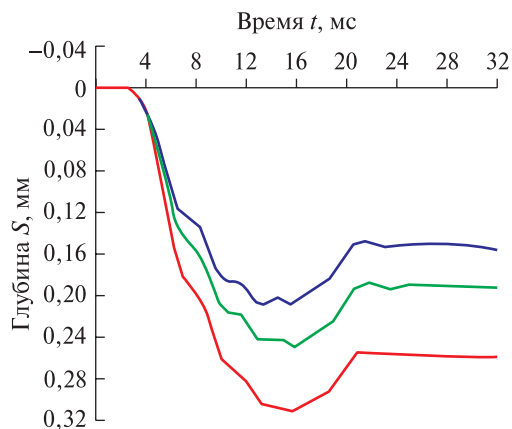


Рис. 2. Функция динамического прогиба снежного дорожного покрытия толщиной 15 см с плотностью $0,65 \text{ г/см}^3$. Динамический модуль $D_n = 116,8 \text{ МПа}$. Здесь и на рис. 3: красная линия — первый динамический прогиб; голубая линия — второй динамический прогиб; синяя линия — третий динамический прогиб

Fig. 2. Dynamic deflection function of a snow road surface 15 cm thick and $0,65 \text{ g/cm}^3$ in density. Dynamic modulus $D_n = 116,8 \text{ МПа}$. Here and in fig. 3: red line — first dynamic deflection; blue line — second dynamic deflection; blue line — third dynamic deflection

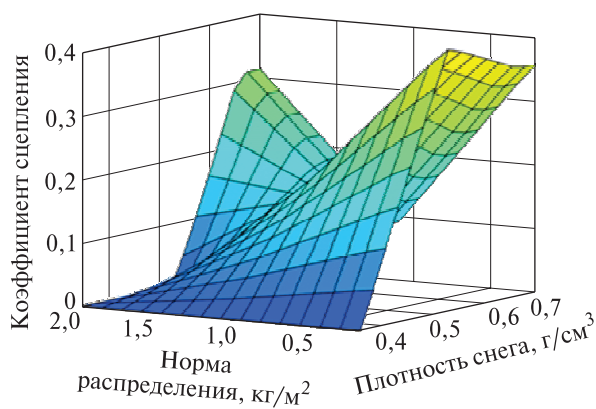


Рис. 4. Изменение коэффициента сцепления со снежным дорожным покрытием в зависимости от плотности снега и плотности распределения эксплуатационного материала (кг/м^2) для песка фракции $0...5 \text{ мм}$

Fig. 4. Change in the coefficient of adhesion to the snow road surface depending on the density of the snow and the distribution density of the operating material (kg/m^2) for sand fr. $0...5 \text{ mm}$

Выполнена оценка транспортно-эксплуатационных показателей снежной поверхности зимних лесных дорог по коэффициенту сцепления (рис.4, 5).

Можно наблюдать участки снежного покрытия с одинаковыми показателями по коэффициенту сцепления, но отличающиеся количественным распределением каменного материала.

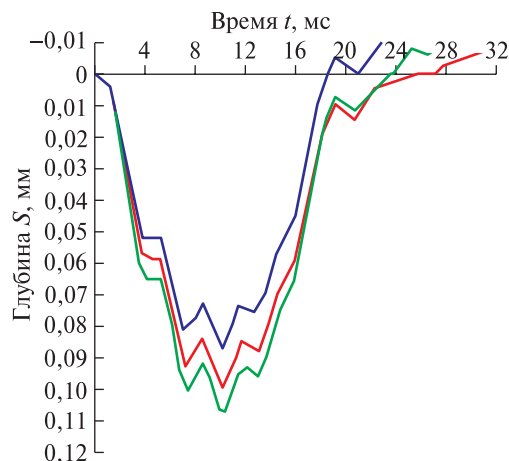


Рис. 3. Функция динамического прогиба снежного дорожного покрытия толщиной 18 см с плотностью $0,65 \text{ г/см}^3$, обработанного щебнем фракции $5...20$, плотность посыпки 10 кг/м^2 . Динамический модуль $D_n = 225,2 \text{ МПа}$

Fig. 3. Dynamic deflection function of a snow road surface 18 cm thick, thick and $0,65 \text{ g/cm}^3$ in density treated with crushed stone of fraction $5...20$, sprinkling density 10 kg/m^2 . Dynamic modulus $D_n = 225,2 \text{ МПа}$

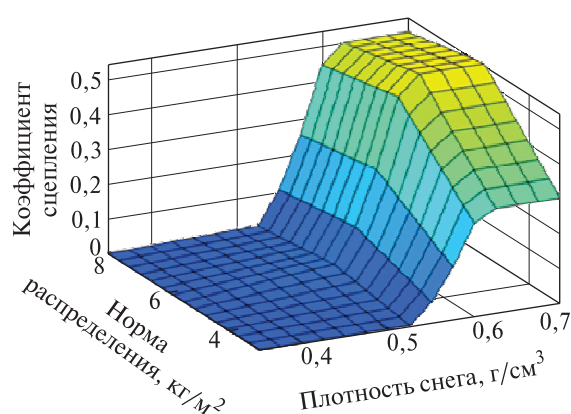


Рис. 5. Изменение коэффициента сцепления со снежным дорожным покрытием в зависимости от плотности снега и плотности распределения эксплуатационного материала (кг/м^2) для щебня фракции $5...15 \text{ мм}$

Fig. 5. Change in the coefficient of adhesion to the snow road surface depending on the density of the snow and the distribution density of the operating material (kg/m^2) for crushed stone fr. $5...15 \text{ mm}$

Решение задачи оценки прочностных свойств снежного дорожного покрытия проводилось с помощью выражения (2). В качестве выходного параметра принималась динамическая прочность уплотненного снежного дорожного покрытия, оцениваемого модулем динамического прогиба снежного дорожного покрытия.

Т а б л и ц а 3

Параметры обучающих выборок по критерию обобщенного показателя эффективности**Parameters of training samples according to the criterion of the generalized performance indicator**

Номер выборки	Вид снежного дорожного покрытия	Плотность снежного дорожного покрытия, г/см ³	Фракция	Размер зерен эксплуатационного материала, мм	Плотность распределения эксплуатационных материалов, кг/м ² (м ³ /100 м ²);	Коэффициент сцепления	Модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия, МПа
1	Уплотненное	0,65	Не обработанное	Не обработанное	Не обработанное	0,28	110,8
2	Не уплотненное	0,35	5...10	5...10	2,0	0,31	36,4
3	Уплотненное	0,65	15...20	15...20	6,0	0,63	225,2
4	Не уплотненное	0,35	15...20	15...20	5,0	0,39	46,8
5	Снежно-ледяное покрытие	0,76	0...20	0,16...20	3,0	0,32	284,6
6	Уплотненное	0,65	0...5	0,16...5	0,2	0,28	116,8
7	Уплотненное	0,65	0...20	0,16...20	5,0	0,40	267,8
8	Уплотненное	0,65	8...16	8...16	4,0	0,36	172,5
9	Не уплотненное	0,35	5...20	5...20	5,0	0,33	46,5
10	Уплотненное	0,65	5...20	5...20	10,0	0,48	212,2
11	Снежно-ледяное покрытие	0,76	10...15	10...15	3,0	0,31	210,2
12	Не уплотненное	0,35	5...15	5...15	5,0	0,32	46,8
13	Ледяное покрытие	0,78	0...5	0,16...5	0,2	0,28	292,1
14	Уплотненное	0,65	5...10	5...10	5,0	0,42	192,2
15	Ледяное покрытие	0,78	5...10	5...10	5,0	0,32	277,8
16	Уплотненное	0,65	0,16...20	0,16...20	5,0	0,35	208,1
17	Уплотненное	0,65	0...5	0,16...5	2,0	0,25	98,3
18	Уплотненное	0,65	10...50	10...50	3,0	0,40	38,2
19	Уплотненное	0,65	20...100	20...100	5,0	0,36	36,4
20	Не уплотненное	0,35	20...160	20...160	5,0	0,33	24,5

Т а б л и ц а 4

Оценка параметров транспортно-эксплуатационных показателей снежного дорожного покрытия лесных дорог при плотности 0,65 г/см³**Evaluation of the parameters of transport and operational indicators of snow road's surfaces of forest roads at a density of 0,65 g/cm³**

Наименование параметра	Варианты обработки снежных дорожных покрытий				
	I	II	III	IV	V
Размер зерен эксплуатационного материала Φ_p , мм	0...5	5...10	10...15	5...20	0...20
Плотность распределения материалов N_p , кг/м ² (м ³ /100 м ²)	0,2	5,0	4,0	7,0	5,0
Толщина снежного покрытия $H_{сн}$, см	9	17	23	18	19
Коэффициент сцепления $\Phi_{сц}$	0,28	0,49	0,36	0,48	0,37
Модуль динамического прогиба снежного покрытия $D_{п}$, МПа	116,8	192,2	172,5	212,2	208,1
Обобщенный показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния снежного дорожного покрытия C	0,215	0,605	0,440	0,461	0,550

Наблюдаемый диапазон был зафиксирован в пределах от 38,2 до 277,3 МПа. В качестве входных параметров были использованы: плотность снежного дорожного покрытия (г/см^3), плотность распределения эксплуатационных материалов (кг/м^2 ; $\text{м}^3/100 \text{ м}^2$), толщина снежного дорожного покрытия (см). Для решения именно такого класса задач следует использовать методы теории оптимизации по весовым коэффициентам. Постановка задачи в содержательном виде выполнялась на основе выражения (3). Введем ограничения по показателям:

коэффициент сцепления с уплотненным снежным дорожным покрытием

$$\varphi_{\text{сц, min}} = 0,10; \varphi_{\text{сц, max}} = 0,71. \quad (4)$$

Модуль динамического прогиба снежного дорожного покрытия зимней лесной дороги, МПа

$$D_{\text{п, min}} = 38,2; D_{\text{п, max}} = 277,3. \quad (5)$$

Результаты исследований и расчетов по полученным уравнениям параметров сведены в табл. 4.

Выводы

1. Разработанный метод повышения транспортно-эксплуатационного состояния снежных дорожных покрытий зимних лесных дорог позволяет учитывать значительное количество внешних факторов, меняющихся в процессе эксплуатации дорог.

2. Использование обобщенного комплексного показателя позволяет оперативно оценивать эффективность зимнего содержания лесных дорог и влиять на основные транспортно-эксплуатационные показатели.

3. Особенностью методики является не только визуальное наблюдение за зимними лесными дорогами, но и их инструментальное обследование по критерию сцепления и динамического прогиба.

4. При проведении обследования используются приборы, получившие апробацию в дорожной отрасли, что положительно сказывается на полученные результаты измерений.

5. Выработаны требования к прочности снежных дорожных покрытий, к типам используемых фрикционных материалов и нормам их распределения по дорожным покрытиям.

6. Учитывая специфику эксплуатации зимних лесных дорог, с целью повышения их транспортно-эксплуатационных показателей предпочтение следует отдавать каменным фрикционным материалам фракции 5...10 мм.

Список литературы

- [1] Алябьев В.И., Ильин Б.А., Кувалдин Б.И., Грехов Г.Ф. Сухопутный транспорт леса. М.: Лесная промышленность, 1990. 416 с.
- [2] Вырко Н.П. Сухопутный транспорт леса. Минск: Высшая школа, 1987. 437 с.
- [3] Леонович И.И., Вырко Н.П., Мартынихин В.Д., Матвейко А.П. Дороги и транспорт лесной промышленности. Минск: Высшая школа, 1979. 416 с.
- [4] Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 6 (366). С. 117–127.
- [5] Морозов С.И., Павлов Ф.А., Плакса Л.Н., Савельев Э.Н. Зимние дороги в лесной промышленности. М.: Лесная промышленность, 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, rep. 97–3, 126 p.
- [7] Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, 1983. 128 с.
- [8] Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Болтнев Д.Е., Никитин В.В., Жук А.Ю. Методика вычисления транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 1 (49). С. 78–81.
- [9] Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction // SAE Int. J. Mater. Manuf., 2011, v. 4(1), pp. 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. 1990.01.01 М.: Транспорт, 1991. 157 с.
- [12] Лабькин 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] Лабькин А.А., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Ахтямов Э.Р. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния уплотненного снежного покрова зимних лесных дорог с использованием нейронных сетей // Деревообрабатывающая пром-ть, 2023. № 3. С. 3–10.
- [14] Коруннов 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. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 118 с.
- [16] Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model // Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, report 90–13. DOI:10.21236/ada230102

- [17] Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 178 с.
- [18] Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1945. 76 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. 158 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: Изд-во НГТУ, 1997. С. 121–129.
- [22] Yong R.N., Fukue M. Performance of snow under confined compression // J. of Terramechanics, 1977, v. 14 (1), pp. 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. М.: Изд-во АН СССР, 1945. С. 10–13.
- [24] Соустова Л.И., Чуйко И.Ю. Определение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019. Т. 62. № 2. С. 68–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).68–77
- [25] Юшков В.С. Диагностика и оценка состояния автомобильных дорог // Молодой ученый, 2011. № 12 (35). Т. 1. С. 67–69.
- [26] СП 288.1328000.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. М.: Стандартинформ, 2017. 66 с.
- [27] Руководство по оценке уровня содержания автомобильных дорог (временное). ОДМ 218.0.000-2003 Утверждено распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации от 19.12.2003 № ИС-28/8938-ис Росавтодор. М.: Информавтодор, 2003. 57 с.
- [28] 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.
- [29] Кручинин И.Н., Лабыкин А.А., Овсейчик Д.В., Побединский В.В., Бурмистрова О.Н., Авдеева В.С. Устройство для формирования уплотненного снежного покрытия. Патент на полезную модель № 219114.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛУТУ, RU. № 2023112508 заявл. 16.05.2023 г. опубл. 28.06.2023 г. 3 с.
- [30] Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988. 281 с.
- [31] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Анализ условий эксплуатации и обоснование транспортных схем в условиях строительства лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2020. № 3 (47). С. 81–87.
- [32] Проваторова Г.В. Зимнее содержание автомобильных дорог. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 67 с.
- [33] Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 1992. 230 с.
- [34] Черкасова Н.Г. Проблемы обращения с древесными отходами, образующимися в процессе лесозаготовки // Лесной и химический комплексы — проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 29 октября 2021 года. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 319–321.
- [35] Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. М.: Физматлит, 2008. 320 с.
- [36] Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables // Andrzej Piegat. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001, 760 с.

Сведения об авторах

Кручинин Игорь Николаевич  — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», kinaa.k@yandex.ru

Никитин Владимир Валентинович — д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

Бурмистрова Ольга Николаевна — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», oburmistrova@ugtu.net

Щербakov Евгений Николаевич — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), scherbakov@bmstu.ru

Ахтямов Эльдар Рашидович — канд. техн. наук, директор ООО «Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов» («УралНИИСтром»), ra@7359808.ru

Овсейчик Дарья Васильевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», davbondarenko@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2024.

Одобрено после рецензирования 10.04.2025.

Принята к публикации 21.05.2025.

IMPROVING TRANSPORT AND OPERATIONAL PERFORMANCE OF FORESTRY TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN WINTER

I.N. Kruchinin¹✉, O.F. Nikitin², O.N. Burmistrova³,
E.N. Scherbakov², E.R. Akhtyamov⁴, D.V. Ovseychik¹

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

³Ukhta State Technical University, 13, Pervomaiskaya st., 169300, Ukhta, Komi Republic, Russia

⁴LLC UralNIIstrom, 5, Stalevarov st., 454047, Chelyabinsk, Russia

kruchininin@m.usfeu.ru

The results of improving methods for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads using a generalized complex indicator are presented. 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 operation of winter forest roads. The problem will be solved by the first developed methodology for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads using a generalized indicator, which determined the purpose of this work. The purpose of the research was to develop a method for assessing the transport and operational condition of snow road surfaces on winter forest roads based on a generalized complex indicator. The objectives of the research included: assessment of the transport and operational condition of road surfaces on winter forest roads; justification of the criteria for the generalized indicator of snow road surfaces; formation of training samples for setting up a neural network to assess the transport and operational state of snow road surfaces on winter forest roads for various criteria. The criteria for the generalized indicator were: the coefficient of adhesion between the wheels of timber transport vehicles and the snow surface and the strength of the snow road surface, modulo dynamic deflection. A set of studies has shown that the adhesion coefficient and strength of the snow cover will depend on the type of treatment and the distribution density of operating materials. In terms of overall properties, preference should be given to the treatment option with materials of fraction 5–10. In this case, the value of the generalized indicator of transport and operational condition should be at least 0,605, the coefficient of adhesion to the snowy road surface should be at least 0,4, with a dynamic deflection modulus of at least 195 MPa. Considering the sufficient adequacy of the data obtained, they can be recommended for increasing the transport and operational performance of winter forest roads and developing optimal plans for the winter maintenance of forest roads.

Keywords: winter forest roads, snow road surface, adhesion coefficient, dynamic deflection module of snow road surface

Suggested citation: Kruchinin I.N., Nikitin V.V., Burmistrova O.N., Shcherbakov E.N., Akhtyamov E.R., Ovseychik D.V. *Povyshenie transportno-ekspluatatsionnykh pokazateley lesotransportnoy infrastruktury v zimniy period* [Improving transport and operational performance of forestry transport infrastructure in winter]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 156–169.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-156-169

References

- [1] Alyab'ev V.I., Il'in B.A., Kuvaldin B.I., Grekhov G.F. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of forests]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry], 1990, 416 p.
- [2] Vyrko N.P. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of forests]. Minsk: Vysshaya shkola [Higher School], 1987, 437 p.
- [3] Leonovich I.I., Vyrko N.P., Martynikhin V.D., Matveyko A.P. *Dorogi i transport lesnoy promyshlennosti* [Roads and transport of the forest industry]. Minsk: Vysshaya shkola [Higher. school], 1979, 416 p.
- [4] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichev S.A., Mogutnov R.V. *Teoreticheskie osnovy i metody matematicheskogo modelirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 6 (366), pp. 117–127.
- [5] Morozov S.I., Pavlov F.A., Plaksa L.N., Savel'ev E.N. *Zimnie dorogi v lesnoy promyshlennosti* [Winter roads in the forestry industry]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' [Forest industry], 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, rep. 97–3, 126 p.
- [7] Dyunin A.K. *V tsarstve snega* [In the kingdom of snow]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 128 p.
- [8] Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Boltnev D.E., Nikitin V.V., Zhuk A.Yu. *Metodika vychisleniya transportno-ekspluatatsionnykh zatrat na soderzhanie lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Methodology for calculating transport and operating costs for the maintenance of a logging road]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 1 (49), pp. 78–81.
- [9] Lee J. An improved slip-based model for tire–snow interaction. *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, 2011, v. 4(1), pp. 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 Proektirovanie, stroitel'stvo i sodержanie zimnikh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri i severo-vostoka SSSR* [VSN 137–89 Design, construction and maintenance of winter roads in Siberia and the north-east of the USSR]. Introduced. 1990.01.01 Moscow: Transport, 1991, 157 p.
- [12] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Akhtyamov E.R., Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Ovseychik D.V. *Sovershenstvovanie metodov tekhnologicheskogo kontrolya uplotnennogo snezhnogo pokrova pri stroitel'stve i ekspluatatsii zimney transportnoy infrastruktury lesov* [Improving the methods of technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest transport infrastructure]. *Sistemy Metody Tekhnologii* [Systems Methods Technologies], 2023, no. 4 (60), pp. 147–154.
- [13] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Pobedinskiy V.V., Akhtyamov E.R. *Otsenka transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya uplotnennogo snezhnogo pokrova zimnikh lesnykh dorog s ispol'zovaniem neyronnykh setey* [Assessment of the transport and operational state of compacted snow cover on winter forest roads using neural networks]. *Derevoobrabatyvayushchaya prom-t'* [Woodworking industry], 2023, no. 3, pp. 3–10.
- [14] Korunov M.M. *Uskorennyy sposob postroyki zimnikh dorog* [Accelerated method for constructing winter roads]. Moscow: Goslestekhzdat, 1946, 34 p.
- [15] Vuori A.F. *Mekhanicheskie svoystva snega kak stroitel'nogo materiala* [Mechanical properties of snow as a building material]. *Fizicheskie metody issledovaniya l'da i snega* [Physical methods for studying ice and snow]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 118 p.
- [16] Richmond P.W., Blaisdell G.L., Green C.E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997, report 90–13. DOI:10.21236/ada230102
- [17] Kuz'min P.P. *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova* [Physical properties of snow cover]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 178 p.
- [18] Rikhter G.D. *Snezhnyy pokrov, ego formirovanie i svoystva* [Snow cover, its formation and properties]. Moscow: Izd-vo Akademii nauk SSSR [Publishing house of the USSR Academy of Sciences], 1945, 76 p.
- [19] Galakhov N.N. *Snezhnyy pokrov v lesu* [Snow cover in the forest]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1940, no. 3, pp. 15–16.
- [20] Voytkovskiy K.F. *Mekhanicheskie svoystva snega* [Mechanical properties of snow]. Moscow: Nauka, 1977, 158 p.
- [21] Kozhevnikov A.N., Belyakov V.V., Malygin V.A. *Uravneniya svyazi parametrov sostoyaniya snega i zavisimosti ikh ot deformatsii snezhnogo pokrova* [Equations for the relationship between snow state parameters and their dependence on snow cover deformation]. *Proektirovanie, ispytaniya, ekspluatatsiya i marketing avtotraktornoy tekhniki* [Design, testing, operation and marketing of automotive equipment]. N. Novgorod: NSTU, 1997, pp. 121–129.
- [22] Yong R.N., Fukue M. Performance of snow under confined compression. *J. of Terramechanics*, 1977, v. 14 (1), pp. 37–49.
- [23] Kragel'skiy I.V., Shakhov A.A. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv snezhnogo pokrova vo vremeni (zatverdenie)* [Changes in the mechanical properties of snow cover over time (hardening)]. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva snega i ikh ispol'zovanie v aerodromnom stroitel'stve* [Physical and mechanical properties of snow and their use in airfield construction]. Moscow: Publ. USSR Academy of Sciences, 1945, pp. 10–13.
- [24] Soustova L.I., Chuyko I.Yu. *Opreделение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем* [Determination of the coefficient of adhesion of a wheel to the road by calculation and experiment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling], 2019, v. 62, no. 2, pp. 68–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).68–77
- [25] Yushkov V.S. *Diagnostika i otsenka sostoyaniya avtomobil'nykh dorog* [Diagnostics and assessment of the condition of highways]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2011, no. 12 (35), t. 1, pp. 67–69.
- [26] *SP 288.1328000.2016 Dorogi lesnye. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva* [SP 288.1328000.2016 Forest roads. Design and construction rules.]. Moscow: Standartinform, 2017, 66 p.
- [27] *Rukovodstvo po otsenke urovnya sodержaniya avtomobil'nykh dorog (vremennoe). ODM 218.0.000-2003 Utverzhdeno rasporyazheniem Gosudarstvennoy sluzhby dorozhnogo khozyaystva Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 19.12.2003 № IS-28/8938-is Rosavtodor* [Guidelines for assessing the level of maintenance of roads (temporary). ODM 218.0.000-2003 Approved by the order of the State Road Service of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 19.12.2003 No. IS-28/8938-is Rosavtodor]. Moscow: Informavtodor, 2003, 57 p.
- [28] Labykin A.A., Kruchinin I.N., Akhtyamov E.R. *Razrabotka trebovaniy k uplotnennomu snezhnomu pokrovu zimnikh lesnykh dorog* [Development of requirements for compacted snow cover of winter forest roads]. *Derevoobrabatyvayushchaya prom-st'* [Woodworking industry], 2023, no. 2, pp. 10–19.
- [29] Kruchinin I.N., Labykin A.A., Ovseychik D.V., Pobedinskiy V.V., Burmistrova O.N., Avdeeva V.S. *Ustroystvo dlya formirovaniya uplotnennogo snezhnogo pokrytiya* [Device for forming compacted snow cover]. Patent for utility model No. 219114.; applicant and patent holder FSBEI HE USLTU, RU. No. 2023112508 declared 16.05.2023 published 28.06.2023, 3 p.
- [30] Kandaurov I.I. *Mekhanika zernistyykh sred i ee primeneniye v stroitel'stve* [Mechanics of granular media and its application in construction]. Leningrad: Stroyizdat, Leningrad Branch, 1988, 281 p.
- [31] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Analiz usloviy ekspluatatsii i obosnovaniye transportnykh skhem v usloviyakh stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of operating conditions and substantiation of transport schemes in the conditions of construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3 (47), pp. 81–87.
- [32] Provatorova G.V. *Zimnee sodержanie avtomobil'nykh dorog* [Winter maintenance of roads]. Vladimir: VISU Publishing House, 2021, 67 p.

- [33] Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. *Biomassa dereva i ee ispol'zovanie* [Wood biomass and its use]. Petrozavodsk: KSC RAS, 1992, 230 p.
- [34] Cherkasova N.G. *Problemy obrashcheniya s drevesnymi otkhodami, obrazuyushchimisya v protsesse lesozagotovok* [Problems of handling wood waste generated during logging]. Lesnoy i khimicheskiy komplekсы – problemy i resheniya: sb. mater. po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Forestry and chemical complexes — problems and solutions: collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, October 29, 2021. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva [Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev], 2022, pp. 319–321.
- [35] Izmailov A.F., Solodov M.V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow: Fizmatlit, 2008, 320 p.
- [36] Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables*. Andrzej Piegat. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001, 760 c.

Authors' information

Kruchinin Igor' Nikolaevich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Ural State Forestry University, kinaa.k@yandex.ru

Nikitin Vladimir Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), nikitinvv@bmstu.ru

Burmistrova Ol'ga Nikolaevna — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Ukhta State Technical University, oburmistrova@ugtu.net

Shcherbakov Evgeniy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), scherbakov@bmstu.ru

Akhtyamov El'dar Rashidovich — Cand. Sci. (Tech.), Director of UralNIИstrom LLC, ra@7359808.ru

Ovseychik Dar'ya Vasil'evna — pg. of the Ural State Forestry University, davbondarenko@mail.ru

Received 20.12.2024.

Approved after review 10.04.2025.

Accepted for publication 21.05.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest