УДК 630*90 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-187-195

Разработка методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог с продлённым сроком эксплуатации

Э.Р. Ахтямов[1a], И.Н. Кручинин[1b], К.С. Отев[2c], О. Н. Бурмистрова[2d], М.Г. Ежова[3e], В.В. Кириллова[3f]

[1] Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, 37, Екатеринбург, Россия
[2] Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, город Ухта, Республика Коми, Россия
[3] Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта, 62, Екатеринбург, Россия
[a] ra@7359808.ru, [b] kruchininin@m.usfeu.ru, [c] otev.kirill@mail.ru, [d] oburmistrova@ugtu.net, [e] marinaezh@mail.ru, [f] kirillova_vv@usue.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-4910-8835, [b] https://orcid.org/0000-0002-7598-9672,
[c] https://orcid.org/0009-0007-3073-5090, [d] https://orcid.org/0000-0003-2616-7557,
[e] https://orcid.org/0009-0005-3709-5706, [f] https://orcid.org/ 0009-0009-9985-1131.
Статья поступила 10.06.2026, принята 10.09.2026.

Решена проблема увеличения сроков эксплуатации зимних лесных автомобильных дорог в условиях межсезонья. Было показано, что современная транспортная инфраструктура при освоении лесосырьевых баз, находящихся на значительном удалении от основных лесовозных магистралей, нуждается в особых методах оценки. Выбрав в качестве оценки эффективность функционирования лесовозной сети по обобщенному показателю, появилась возможность несколько по-иному рассматривать способы повышения их транспортно-эксплуатационных показателей. Целью является совершенствование методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей временных зимних лесных дорог с продлённым сроком службы с использованием многопараметрического обобщённого показателя, построенного на основе нейронечётких сетей. В основные задачи исследований входили следующие показатели. Определить частные критерии, входящие в обобщённый многопараметрический показатель транспортно-эксплуатационного состояния зимних лесных дорог. Провести комплекс опытно-экспериментальных исследований физико-механических показателей зимних дорожных покрытий. Найти рациональные параметры зимних дорожных покрытий. Учитывая неопределённость в сроках их эксплуатации, было проблематично использовать традиционные инструментальные методы их оценки. Поэтому, впервые разработанная методика повышения их транспортно-эксплуатационного состояния и увеличения сроков эксплуатации позволила найти решение поставленной задачи. Впервые решена проблема повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог с увеличенным сроком эксплуатации. Проведённый комплекс исследований позволил подобрать технологические режимы обработки дорожных покрытий различными измельчёнными дорожно-строительными материалами. В процессе исследований было выявлено, что для получения рационального значения динамического модуля упругости дорожного покрытия зимних лесных дорог необходимо использовать щепу древесную, с размером частиц от 20 до 50 мм и плотностью посыпки по покрытию в количестве не менее 4 кбм на каждые 100 м^2, при плотности снега не менее 650 кг на кбм. При этом, динамический модуль упругости должен быть не менее 220,9 МПа. Рациональное значение коэффициента теплопроводности зимнего дорожного покрытия, обработанного щепой, должно быть в пределах от 0,255 до 0,326 Вт/м · К. При этом необходимо применять щепу с размером частиц от 20 до 50 мм и с плотностью распределения по покрытию в количестве не менее 2,5 кбм на каждые 100 м^2. А рациональное значение коэффициента сцепления с дорожным покрытием, обработанным щепой, должно быть не менее 0,244. Адекватность полученных значений не вызывает сомнений и полученные данные могут быть рекомендованы для назначений мероприятий по продлению сроков эксплуатации зимних дорожных покрытий лесных дорог в весенний период.

Ключевые слова: лесные дороги; зимнее дорожное покрытие; динамический модуль; сцепление; теплопроводность.

Development of methods for improving the transport and operational performance of winter forest roads with an extended service life

E.R. Akhtyamov[1a], I.N. Kruchinin[1b], K.S. Otev[2c], O. N. Burmistrova[2d], M.G. Ezhova[3e], V.V. Kirillova[3f]

[1] Ural State Forestry University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia
[2] Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Komi Republic, Russia
[3] Ural State University of Economics; 62, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia
[a] ra@7359808.ru, [b] kruchininin@m.usfeu.ru, [c] otev.kirill@mail.ru, [d] oburmistrova@ugtu.net, [e] marinaezh@mail.ru, [f] kirillova_vv@usue.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-4910-8835, [b] https://orcid.org/0000-0002-7598-9672,
[c] https://orcid.org/0009-0007-3073-5090, [d] https://orcid.org/0000-0003-2616-7557,
[e] https://orcid.org/0009-0005-3709-5706, [f] https://orcid.org/ 0009-0009-9985-1131.
Received 10.06.2026, accepted 10.09.2026.

The study addresses the issue of extending the service life of winter forest roads during the off-season. It is demonstrated that modern transport infrastructure requires specialized assessment methods when developing timber bases located at significant distances from main logging routes. By assessing the efficiency of the logging network using a generalized indicator, it has become possible to consider methods for improving their transport and operational performance in a slightly different way. The goal of the research is to improve methods for improving the transport and operational performance of temporary winter forest roads with an extended service life using a multiparameter generalized indicator constructed based on neuro-fuzzy networks. The main objectives of the study include the following indicators: to determine the specific criteria included in the generalized multiparameter indicator of the transport and operational condition of winter forest roads; to conduct a set of experimental studies of the physical and mechanical properties of winter road surfaces; to find rational parameters for winter road surfaces. Given the uncertainty of their service life, using traditional instrumental methods for assessing them is problematic. Therefore, a newly developed methodology for improving their transport and operational condition and extending their service life provides a solution to this problem. This study, for the first time, addresses the problem of improving the transport and operational performance of winter forest road pavements with an extended service life. A comprehensive study enables the selection of technological regimes for treating road surfaces with various crushed road construction materials. The study reveals that to achieve a reasonable value for the dynamic modulus of elasticity of winter forest road pavements, it is necessary to use wood chips with a particle size of 20 to 50 mm and a spreading density of at least 4 cubic meters per 100 m², with a snow density of at least 650 kg per cubic meter. Furthermore, the dynamic modulus of elasticity should be at least 220,9 MPa. The optimal thermal conductivity coefficient for winter road surfaces treated with wood chips should be between 0,255 and 0,326 W/m·K. Wood chips with a particle size of 20 to 50 mm and a distribution density of at least 2,5 cubic meters per 100 square meters should be used. The optimal adhesion coefficient for wood chips treated road surfaces should be at least 0,244. The adequacy of the obtained values is beyond doubt, and the data obtained can be recommended for planning measures to extend the service life of winter road surfaces on forest roads during the spring.

Keywords: forest roads; winter road surfaces; dynamic modulus; adhesion; thermal conductivity.

Введение. Особенностью освоения лесоэксплуатационных лесных территорий в зимний период года является строительство и содержание разветвлённой сети временных лесных автомобильных дорог. При этом лесотранспортная инфраструктура включает в себя как автомобильные дороги круглогодового действия, с дорожными конструкциями капитального типа, так и сезонного действия, с дорожными покрытиями переходного типа [1, 2]. Эти элементы лесотранспортной сети строятся и эксплуатируются только в период летнего строительного сезона и ограничены погодно-климатическими условиями, где располагаются лесосырьевые базы [3, 4].

В то же время, помимо дорог постоянного действия, в лесотранспортную сеть должны быть включены временные автомобильные лесные дороги. Их особенностью является ограниченный временный период строительства и эксплуатации [1, 5]. Применительно к этим дорогам рассматривают как технологии их строительства из уплотненного зимнего покрытия, так и технологии их зимнего содержания, а также технологии увеличения их сроков стабильной эксплуатации [6, 7].

Основные особенности строительства зимних лесных дорог и требования к их эксплуатационным показателям рассмотрены в работах [4, 6, 8, 9]. В качестве основного дорожно-строительного материала для этого типа автомобильных дорог обычно рассматривают снежный покров, уплотнённое снежное покрытие, снежно-ледяные отложения.

Выбор типов зимних дорожных покрытий также имеет свои особенности. На этот выбор могут повлиять как дорожно-климатические условия, так и эксплуатационные факторы. Так как лесные дороги в основном необходимы для обеспечения вывозки древесины, то возникает необходимость в создании лесотранспортной инфраструктуры.

Особенности перемещения по лесотранспортным сетям, особенности размещения на лесовозном подвижном составе лесоматериалов, графики движения, обоснование рейсовой нагрузки и многие другие факторы рассмотрены в исследованиях [2, 3, 10, 11]. Следует отметить, что рассмотренные исследования выполнены только для летних лесных дорог.

В процессе исследований эффективности функционирования лесотранспортной инфраструктуры в зимний период были сформулированы следующие требования:

– основным фактором, определяющим необходимость развития сети зимних лесных автомобильных дорог, может служить только срок службы зимних дорожных покрытий;

– эксплуатационные затраты на строительство и содержание зимних лесных дорог зависят только от их основных транспортно-эксплуатационных показателей [12];

– все зимние лесные дороги могут быть отнесены только к дорогам временного пользования, и к ним нельзя применять методы оценки, используемые на дорогах общего пользования.

Таким образом, для повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимней лесотранспортной инфраструктуры, для обеспечения продления сроков службы зимних дорожных покрытий, для обеспечения продления сроков эксплуатации зимних лесных дорог в весенний период года необходимо разработать методы, позволяющие принципиально изменить основные эксплуатационные показатели этих дорог.

Известно, что чаще всего, эти исследования касались только вопросов их зимнего содержания [13].

Однако, в ряде исследований были получены способы значительно повысить транспортно-эксплуатационные показатели и увеличить сроки службы дорожных покрытий не только в зимний, но и в весенний период года при содержании дорог [13, 14].

Речь идёт о способах обработки зимних дорожных покрытий различными теплотехническими составами, позволяющими обеспечить требуемые прочностные и эксплуатационные параметры снежных дорожных покрытий.

В работах [12, 13 ,14, 15] рассматривается возможность повысить основные показатели дорожных по-

крытий путём их обработки различными материалами, в том числе и измельчёнными древесными отходами.

Именно при использовании измельчённой древесины появляется возможность как в регулировании теплотехнических параметров покрытия, так и в регулировании сцепных качеств, а именно в возможности изменить коэффициент сцепления с дорожными покрытиями.

Таким образом возникли предпосылки, позволяющие существенно влиять на транспортно-эксплуатационные показатели зимних лесных дорог как в период их строительства, так и в период их эксплуатации.

Целью исследований была разработка методов по повышению транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог, позволяющих значительно продлить сроки их эксплуатации в весенний период.

В работе решались следующие задачи: мониторинг основных транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог; формирование многопараметрического обобщенного показателя транспортно-эксплуатационных качеств; настройка нейронечёткой сети и обучающих выборок при оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог.

Методы и материалы. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог можно рассматривать как многопараметрическую задачу, решение которой будет характеризоваться общей неопределённостью.

Следует учитывать, что к эксплуатационным показателям можно отнести: плотность зимнего дорожного покрытия; толщину снежного покрытия; ровность снежного покрытия; коэффициент сцепления со снежным покрытием; глубину колеи на снежном покрытии, расчётную скорость и интенсивность движения лесовозного подвижного состава.

Закономерности накопления твёрдых снежных осадков по дорожно-климатическим подзонам рассмотрены в работах [3, 4, 6, 9, 16, 17, 18]. В них основное внимание уделяется характеристикам природно-климатических условий строительства и эксплуатации автозимников и зимних лесных дорог.

Что касается природно-климатических условий, в которых расположены лесосырьевые базы, то следует отметить наличие древесной растительности и отсутствие протяжённых открытых участков местности [4, 8, 19].

Основные вопросы технологии строительства и содержания зимних лесных дорог отражены в работах [4, 6, 9, 20]. Основной упор в этих работах делается на природно-климатические условия территорий, на которых расположены лесотранспортные сети и на технологии строительства их из снежных и снежно-ледяных отложений.

Таким образом, рассмотренные особенности строительства дорог привели к тому, что в процессе строительства лесных дорог необходимо учитывать технико-экономические, дорожно-климатические, физико-механические и организационно-технологические факторы.

Чаще всего для продления срока эксплуатации зимних дорог осуществляются мероприятия по повышению либо термического сопротивления их дорожных одежд, либо создания условий, замедляющих «растепление» автозимников [9].

В наших работах были рассмотрены мероприятия по обработке и закреплению каменных или древесных материалов на зимнем дорожном покрытии [13, 25]. Было показано, что обработка измельчённой древесиной зимнего дорожного покрытия позволяет значительно продлить сроки эксплуатации зимних лесных дорог только в случае обеспечения требуемых значений транспортно-эксплуатационных показателей.

Следует понимать, что применение зимних дорожных покрытий для лесных дорог, обработанных измельчённой древесиной, должны удовлетворять основным техническим, экологическим и экономическим критериям. Всё это существенно усложняет задачу, и выработать единый критерий, который бы учитывал все показатели, не представляется возможным.

Известно, что общую оценку транспортно-эксплуатационного состояния линейных объектов необходимо проводить только с использованием нескольких частных показателей [12, 14, 15, 16, 22].

В качестве частных показателей, наиболее полно описывающих транспортно-эксплуатационное состояние зимних лесных дорог, возможно использовать критерии динамического прогиба дорожного покрытия, критерии сцепления с дорожным покрытием и критерии термического сопротивления дорожного покрытия [11, 13].

Рассмотрим для нашего случая несколько показателей. Частный критерий зимнего дорожного покрытия по основному показателю прочности M_{PA} может быть представлен в виде функции

$$M_{PA} = f(P_L, F_R, K_L, T), \quad (1)$$

где P_L – величина плотности снега на зимней дороге, кг/м^3; F_R – величина частиц распределённой древесины по покрытию. Оценивается по размеру частиц для наиболее крупной фракции древесины, мм; K_L – величина распределения древесных материалов по дорожному покрытию, м^3 на каждые 100 м^2; T – температура окружающего воздуха, С°.

Было выявлено, что на значение модуля динамического прогиба зимнего дорожного покрытия оказывают существенное влияние как дорожно-климатические условия, так и способы строительства и эксплуатации лесных дорог. В наших работах также были проведены оценки по влиянию на прочность покрытия количества измельчённой древесины [11, 13].

Следующим частным показателем, для оценки транспортно-эксплуатационного состояния следует использовать коэффициент сцепления с дорожным покрытием.

Частный критерий зимнего дорожного покрытия по показателю K_S может быть представлен в виде функции:

$$K_S = f(P_L, F_R, K_L, T), \quad (2)$$

где P_L – величина плотности снега на зимней дороге, кг/м^3 ; F_R – величина частиц распределённой древесины по покрытию. Оценивается по размеру частиц для наиболее крупной фракции древесины, мм; K_L – величина распределения древесных материалов по дорожному покрытию, м^3 на каждые 100 м^2; T – температура окружающего воздуха, С°.

В нашей работе [21] было достаточно подробно рассмотрено влияние как типов, так и их количества различных материалов на сцепные свойства зимних дорожных покрытий лесных дорог.

Частный критерий зимнего дорожного покрытия по показателю T_L может быть представлен в виде функции:

$$T_L = f(P_L, F_R, K_L, T), \quad (3)$$

где P_L – величина плотности снега на зимней дороге, кг/м^3 ; F_R – величина частиц распределённой древесины по покрытию. Оценивается по размеру частиц для наиболее крупной фракции древесины, мм; K_L – величина распределения древесных материалов по дорожному покрытию, м^3 на каждые 100 м^2; T – температура окружающего воздуха, С°.

Теплопроводность дорожного покрытия будет играть решающую роль в назначении сроков продления эксплуатации зимников в весенний период. В работах неоднократно рассматривались условия по продлению сроков эксплуатации зимних лесных дорог и использования различных дорожно-строительных материалов [14, 21, 22].

Как показано в работе [15], решить подобную задачу традиционными методами чаще всего не представляется возможным. Поэтому воспользуемся известным методом формирования обобщённого показателя эффективности.

Многопараметрический обобщённый показатель транспортно-эксплуатационного состояния зимних лесных дорог с увеличенными сроками эксплуатации может быть представлен в виде

$$\text{МОП} = \frac{k_\text{М}(M_{PA} - M_{PA}^{min})}{M_{PA}^{max} - M_{PA}^{min}} + \frac{k_\text{С}(K_S - K_S^{min})}{K_S^{min} - K_S^{max}} + \frac{k_\text{Т}(T_L - \boldsymbol{T}_L^{min})}{T_L^{max} - T_L^{min}} \quad (4)$$

где k_M – коэффициент веса при частном показателе прочности покрытия, k_M = 0,4; k_C – коэффициент веса при частном показателе сцепления покрытия, k_C = 0,2; k_T – коэффициент веса при частном показателе коэффициента теплопроводности обработанного зимнего дорожного покрытия, k_T =0,4; $M_{PA}^{min}, M_{PA}^{max}$ – наибольшие и наименьшие значения модуля динамического прогиба зимнего дорожного покрытия, МПа; K_S^{min}, K_S^{max} – наибольшие и наименьшие значения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием; T_L^{min}, T_L^{max} – наибольшие и наименьшие значения коэффициента теплопроводности обработанного зимнего дорожного покрытия, Вт/м К.

Весовые показатели $\boldsymbol{k_i}$ служат мерой значимости любого частого показателя в обобщённом.

Результаты. Задача нахождения рациональных значений обобщённого показателя сводится к получению данных о частных показателях. Их значения возможно получить только опытно-экспериментальным путем.

В качестве объекта исследования был выбран участок зимней лесной дороги с дорожным покрытием, обработанным измельченной древесиной [12].

Для повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог была использована измельчённая древесина с размером частиц от 5 до 160 мм.

К транспортно-эксплуатационным показателям следует отнести прочностные, фрикционные и теплотехнические параметры дорожных покрытий зимних лесных дорог.

Помимо этого, были проанализированы варианты конструктивного исполнения дорожных одежд из уплотненного снега. Разработана технология их строительства и дорожно-строительные механизмы для увеличения эксплуатационных показателей, представленные в патенте № 236240. Устройство для формирования зимнего эксплуатационного дорожного покрытия [25].

На рис. 1 представлены рабочие моменты измерения толщины зимнего дорожного покрытия, обработанного опилом, коэффициента сцепления с дорожным покрытием, теплопроводности зимнего дорожного покрытия и динамического модуля упругости.

Для измерения коэффициента сцепления использовался модифицированный прибор типа ППК-МАДИ. Прибор для измерения коэффициента сцепления устанавливался в полосе движения на обработанное дорожное покрытие с различной дозировкой измельченной древесины. Рабочий момент проведения измерения представлен на рис. 1, *б*. Результаты измерений заносились в обучающие выборки для настройки нейронечёткой сети.

Для измерения термического сопротивления зимнего дорожного покрытия использовалась методика испытания теплопроводности дорожно-строительных материалов. Согласно разработанной методике испытаний, были проведены исследования по оценке теплопроводности зимнего дорожного покрытия, обработанного измельчённой древесиной.

Определение теплопроводности проводились с помощью прибора измерения теплопроводности ИТП-МГ4 «Зонд» с цилиндрическим зондом. Прибор внесён в реестр РФ Сертификат №30484-11 (продлён до 2031). Рабочий момент представлен на рис. 1, *в*.

Для измерения прочности обработанного зимнего покрытия использовались динамические методы испытаний. Согласно разработанной методике испытаний, были проведены исследования по оценке динамического модуля упругости покрытия.

Измерение динамического прогиба проводилась с использованием прибора типа ZFG-3.0. прибор внесён в реестр РФ Сертификат № 10912 – 87. Определение динамического прогиба основано на регистрации перемещения круглого штампа от ударного воздействия от падающего груза массой 10 кг. Рабочий момент проведения измерения представлен на рис. 1, *г*. Результаты измерений в МПа, заносились в обучающие выборки, для настройки нейронечёткой сети.

При анализе полученных результатов исследования пришлось столкнуться с невозможностью получения достоверных данных с применением традиционных методов. Было установлено, что полученные результа-

ты характеризуются неопределённостью в полученных данных.

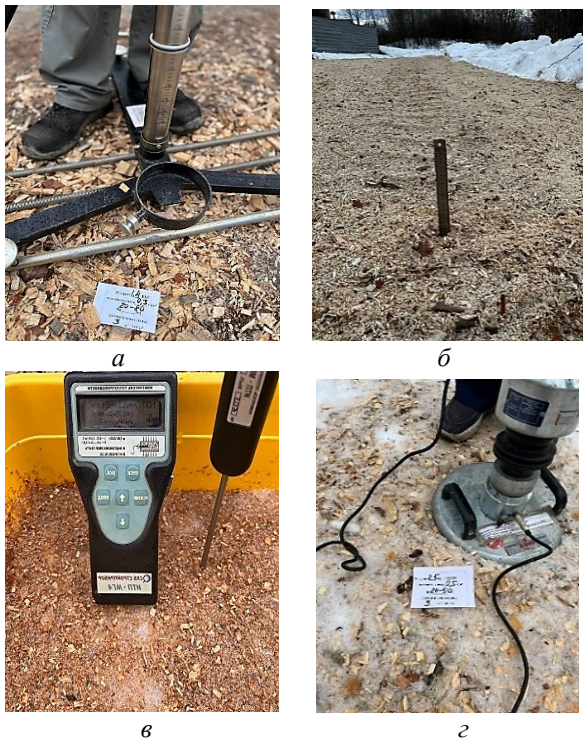

Рис. 1. Рабочие моменты оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий: *а* – зимнее покрытие, обработанное опилом; *б* – измерение коэффициента сцепления на зимнем покрытии; *в* – измерение зондом коэффициента теплопроводности опила; *г* – измерение динамического модуля упругости зимнего дорожного покрытия

Так как исследуемые параметры дорожных покрытий имеют взаимное влияние друг на друга, то их анализ возможен только с использованием элементов нечёткой логики. Как показано в работах [26, 27], подобный анализ наиболее эффективно проводить с применением нейронечёткой продукционной сети типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System).

В группу по оценке прочности дорожного покрытия включены значения плотности покрытия. В группу по оценке теплопроводности включены значения плотности распределения измельчённой древесины. В группу по оценке сцепления с покрытием включены данные о размере частиц древесины и температуры воздуха.

Для настройки нейронечёткой сети были использованы так называемые «обучающие выборки». Каждая выборка была получена в результате измерений конкретного показателя [15]

Зафиксировав значения величины крупности щепы фр. 20– 0 мм при температуре минус 5 °С и плотности покрытия в 500 кг/ м^3, из выражения (1) получена зависимость модуля динамического прогиба в зависимости от плотности распределения щепы по покрытию:

$$M_{PA} = -0{,}00064 \cdot K_L^{\,7} + 0{,}2725 \cdot K_L^{\,6} - 4{,}259\, K_L^{\,5} + 31{,}57 \cdot K_L^{\,4} - 113{,}2 \cdot K_L^{\,3} + 173 \cdot K_L^{\,2} - 93{,}07 \cdot K_L + 182{,}2 \quad (5)$$

где K_L – плотность распределения измельчённой древесины по зимнему дорожному покрытию. Единица измерения в м^3 на каждые 100 м^2.

Графическая интерпретация изменения динамического модуля упругости зимнего дорожного покрытия в зависимости от плотности посыпки щепой приведена на рис. 2.

С целью сопоставимости результатов, аналогично по величине плотности распределения измельчённой древесины по зимнему покрытию, была проведена также и оценка термического сопротивления зимнего дорожного покрытия.

Так, при фиксированных значениях плотности снежного покрытия в 500 кг/м^3, при температуре окружающего воздуха минус 5 °С и для размера частиц щепы от 20 до 50 мм была получена зависимость коэффициента теплопроводности покрытия в зависимости от плотности распределения щепы.

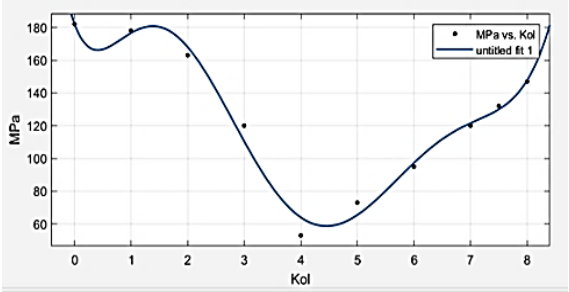

Рис. 2. Графическая интерпретация изменения динамического модуля упругости зимнего дорожного покрытия в зависимости от плотности посыпки щепой

Уравнение регрессии изменения коэффициента теплопроводности дорожного покрытия примет вид:

$$T_L = 0{,}2345 \cdot K_L^{\,6} - 0{,}02293\, K_L^{\,5} - 0{,}7784 \cdot K_L^{\,4} + 0{,}06742 \cdot K_L^{\,3} + 0{,}6764\, K_L^{\,2} - 0{,}09656 \cdot K_L + 0{,}137 \quad (6)$$

где K_L – плотность распределения измельчённой древесины по зимнему дорожному покрытию. Единица измерения в м^3 на каждые 100 м^2.

На рис. 3 представлена графическая интерпретация изменения коэффициента теплопроводности зимнего дорожного покрытия, обработанного щепой с размером частиц от 20 до 50 мм.

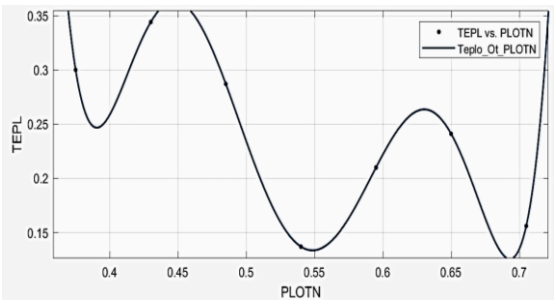

Рис. 3. Графическая интерпретация изменения коэффициента теплопроводности зимнего дорожного покрытия в зависимости от плотности посыпки щепой

Оценка коэффициента сцепления с зимними дорожными покрытиями, обработанных щепой может быть описана в виде функции K_S по выражению (2).

Решение осуществлялось аналогично приведённому выше алгоритму настройки нейронечёткой сети в форме «обучающих выборок».

Зафиксировав значения величины крупности щепы размером от 20 до 50 мм, при температуре окружающего воздуха минус 5 °С и плотности покрытия в 500 кг/м^3 получена зависимость коэффициента сцепления со снежным покрытием в зависимости от плотности распределения щепы:

$$K_S = 0{,}3116 \cdot K_L^{\,7} + 0{,}08874 \cdot K_L^{\,6} - 1{,}19\, K_L^{\,5} - 0{,}07111 \cdot K_L^{\,4} + \\ + 1{,}5 \cdot K_L^{\,3} - 0{,}1585 \cdot K_L^{\,2} - 0{,}6357 \cdot K_L + 0{,}3173 \qquad (7)$$

где K_L – плотность распределения измельчённой древесины по дорожному покрытию, м^3 на каждые 100 м^2.

На рис. 4 представлена графическая интерпретация изменения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием.

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

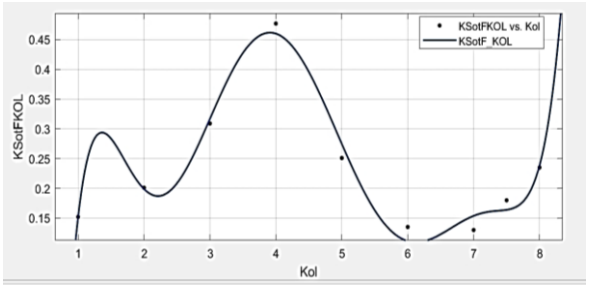

Рис. 4. Графическая интерпретация изменения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием в зависимости от плотности посыпки щепой

Для нахождения обобщённого показателя транспортно-эксплуатационного состояния зимних лесных дорог следует ограничить область выходных значений.

На основании проведённых исследований нами были рассмотрены следующие ограничения.

При оценке прочностных показателей зимнего покрытия можно принять следующий диапазон наблюдаемых значений динамического модуля упругости. Наименьшее значение было зафиксировано на неуплотнённом снежном покрытии и составило 11,3 МПа. Наибольшее, зафиксированное значение наблюдалось на снежно-ледяном покрытии и составило 297,0 МПа.

При измерении коэффициента теплопроводности прибором ИТП-МГ4 «Зонд» с цилиндрическим зондом, был зафиксирован диапазон от 0,145 до 0,685 Вт/м К.

При оценке коэффициента сцепления с дорожным покрытием был зафиксирован диапазон от 0,11 до 0,39.

Эксплуатация зимних лесных дорог показала, что роль и значение сцепных свойств покрытий для продления сроков службы не является критически важным показателем.

Напротив, прочностные и теплотехнические показатели оказывают основное влияние на сроки службы зимних дорожных покрытий в весенний период.

Для наших исследований были приняты следующие значения весовых коэффициентов частных критериев. Например, для коэффициента веса при частном показателе сцепления с дорожным покрытием было принято значение равным $\boldsymbol{k_C} = 0{,}2$.

Для коэффициента веса при частном показателе прочности зимнего дорожного покрытия было принято значение $\boldsymbol{k_M} = 0{,}4$.

А для коэффициента веса при частном показателе коэффициента теплопроводности обработанного зимнего дорожного покрытия было назначено значение $\boldsymbol{k_T} = 0{,}4$.

Результаты исследований и расчётов по полученным зависимостям представлены в табл. 3.

Экономическая целесообразность внедрения обработанных щепой дорожных покрытий зимних лесных дорог с продленным сроком эксплуатации проводилась на основании локального сметного расчёта ресурсно-индексным методом. Расчёты производились для условий лесосырьевых баз, расположенных на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югра (1 зона) в продукте ГРАНД-Смета, версия 2024.3 [28, 29].

На рис. 5 и 6 представлены результаты сравнительных затрат в базовом, традиционном варианте строительства и эксплуатации лесной зимней дороги и в проектируемом варианте, с зимним дорожным покрытием, обработанным измельчённой древесиной. В нашем случае рассматривалась щепа древесная с размером частиц от 20 до 50 мм и плотностью распределения по дорожному покрытию в количестве не менее 4 м^3 на каждые 100 м^2.

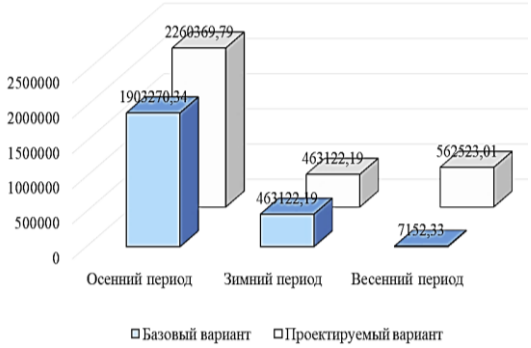

Рис. 5. Состав затрат на строительство зимней лесной дороги в базовом и проектируемом варианте (в зависимости от сезонов производства работ)

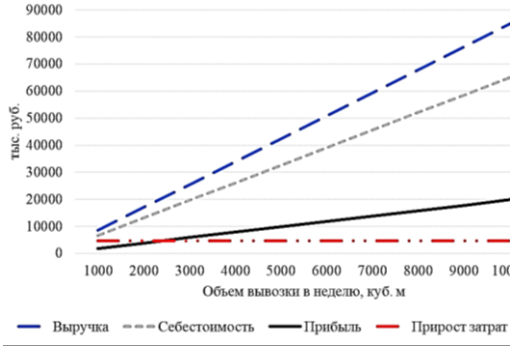

Рис. 6. Динамика показателей целесообразности устройства обработанных зимних дорожных покрытий

Целесообразность о проведении сроков работ по строительству лесной дороги с продлёнными сроками эксплуатации рассмотрена для условий эксплуатации подъездных путей к нижнему складу, протяжённостью не менее 5 км, при средней цене одного обезличенного кубометра круглых лесоматериалов 8500 руб (по осреднённым данным начало 2025 года).

Таблица 3. Оценка транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог, обработанных измельчённой древесиной

Наименование параметра	Варианты обработки зимних дорожных покрытий измельченной древесиной						
	Опил фр. 0–5 мм	Щепа фр. 5–20 мм	Щепа фр. 5–20 мм	Щепа фр 20–50 мм	Щепа фр 20–50 мм	Щепа 20–100 мм	Щепа 20–100 мм
Размер крупной фракции, F_R ,мм	0.316	16	16	45	45	63	63
Плотность распределения измельчённой древесины, м^3 на каждые 100 м^2, K_L	5.0	2.0	8,0	4.0	6.0	2.0	4.0
Плотность зимнего дорожного покрытия, P_L, кг/м^3	500	350	350	600	500	500	600
Коэффициент теплопроводности покрытия, T_L , Вт/м К.	0,28	0,23	0,21	0,31	0,25	0,36	0,31
Коэффициент сцепления, K_S	0,16	0,20	0,22	0,23	0,21	0,19	0,13
Динамический модуль упругости зимнего покрытия, M_{PA}, МПа	102,2	74,3	65,2	196,4	123,5	139,2	122,4
Многопараметрический обобщённый показатель, *МОП*	0,2632	0,2145	0,2019	0,6215	0,4836	0,4239	0,4461

Заключение. Разработанный метод повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог с продленными сроками эксплуатации на основе обобщенного многопараметрического показателя позволил найти решение с учётом неопределённости в исходных данных.

Основные зависимости влияния измельчённой древесной щепы на прочность, термическое сопротивление зимних дорожных покрытий и на коэффициент сцепления с ним были получены на основе теории нечётких множеств и нейросетевых технологий.

Было проведено обследование дорожных покрытий, обработанных различными измельчёнными древесными материалами. Производились измерения динамических прогибов, коэффициентов сцепления и теплопроводности зимних дорожных покрытий.

В результате были получены основные зависимости влияния размеров и плотности распределения измельченной древесины на прочность покрытия.

Проведенные исследования определили основные физико-механические свойства измельченных древесных материалов и выявили возможность использования древесной щепы фр. от 20 до 50 мм для обеспечения заявленной прочности зимней дороги и обладающей лучшей приживаемостью на покрытии и имеющей наибольшую структурную прочность.

Установлено, что рациональная величина динамического модуля упругости дорожного покрытия зимних лесных дорог, при плотности снега не менее 650 кг/м^3 может достигать значения в 220,9 МПа. При обработке зимнего дорожного покрытия необходимо использовать щепу древесную, с размером частиц от 20 до 50 мм и плотностью посыпки по покрытию в количестве не менее 4 м^3 на каждые 100 м^2.

Рациональное значение коэффициента теплопроводности зимнего дорожного покрытия, обработанного щепой составило от 0,255 до 0,326 Вт/м·К. При этом необходимо применять щепу с размером частиц от 20 до 50 мм и с плотностью распределения по покрытию в количестве не менее 2,5 м^3 на каждые 100 м^2.

Рациональное значение коэффициента сцепления с дорожным покрытием, обработанного щепой, составило не менее 0,244. При этом необходимо применять щепу
с размером частиц от 20 до 50 мм и с плотностью распределения по покрытию в количестве не менее 3,0 м^3 на каждые 100 м^2.

Впервые применён обобщённый многопараметрический показатель оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних лесных дорог, позволяющий проводить их комплексную оценку.

В результате исследований найдены предельные значения эксплуатации зимних лесных дорог в весенний период. Установлено, что эксплуатация зимней лесной дороги должна заканчиваться при достижении значения обобщенного многопараметрического показателя менее 0,156.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения методов оценки транспортно-эксплуатационных показателей может быть заметен при условии, что недельный объём вывозки составит более 3000 м^3. Это только в случае продления срока эксплуатации зимника на одну неделю. В случае продления эксплуатации на две–три недели значение минимального недельного объёма вывозки может значительно измениться.

Литература

1. Вырко Н.П. Сухопутный транспорт леса [Текст]: учебник для студентов вузов / Н.П. Вырко. Минск: Высш. шк., 1987. 437 с.
2. 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.
3. Кручинин И.Н. Транспортная инфраструктура лесов / И.Н. Кручинин. Екатеринбург: ФГБОУ ВО Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2022. 134 с.
4. Морозов С.И. Зимние дороги в лесной промышленности / С.И. Морозов, Ф.А. Павлов, Л.Н. Плакса, Э.Н. Савельев. М.: Лесная промышленность, 1969. 168 с.
5. Леонович И.И., Вырко Н.П., Мартынихин В.Д., Матвейко А.П. Дороги и транспорт лесной промышленности. Минск : Высшая школа, 1979. 416 с.
6. Афанасьев И.А. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона / И.А. Афанасьев, И.Н. Кручинин. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 135 с.
7. Проваторова Г.В. Зимнее содержание автомобильных дорог. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 67 с.
8. Дюнин А.К. В царстве снега / А.К. Дюнин. Наука. Новосибирск, 1983. 128 с.
9. ГОСТ Р 58948-2020 Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания.
10. 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.
11. Кручинин И.Н. Совершенствование методов проектирования оптимальных маршрутов лесных автомобильных дорог с использованием информационных систем дорог / И.Н. Кручинин, О.Н. Бурмистрова, Э.Р. Ахтямов, Я.И. Абрамов, С.В. Ченушкина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 2 (66). С. 76–77.
12. Кручинин И.Н. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесотранспортной инфраструктуры в зимний период / И.Н. Кручинин, В.В. Никитин, О.Н. Бурмистрова, Е.Н. Щербаков, Э.Р. Ахтямов, Д.В. Овсейчик // Научно-информационный журнал – Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 156–169.
13. Отев К.С. Повышение транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог / К.С. Отев, И.Н. Кручинин, Э.Р. Ахтямов, В.В. Побединский, Р.М. Демидов, М.А. Кузнецов // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. № 1. С. 3–14
14. Кручинин И.Н. Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщенному показателю транспортно-эксплуатационного состояния / И.Н. Кручинин, К.С. Отев, О.Н. Бурмистрова, Э.Р. Ахтямов, М.А. Кузнецов, Д.В. Овсейчик // Научный журнал. Системы Методы Технологии. 2024.– № 4 (64). С. 83–90.
15. Лабыкин 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.
16. Yong, R. Performance of snow under confined compression / R.N. Yong, M. Fukue // Journal of Terramechanics, April. 1977. Volume 14 (1). P.37–49.
17. Кожевников А.Н. Уравнения связи параметров состояния снега и зависимости их от деформации снежного покрова / А.Н. Кожевников, В.В. Беляков, В.А. Малыгин, и др. // Проектирвание, испытания, эксплуаатация и маркетинг автотракторной техники. Н.Новгород: НГТУ, 1997. С. 121–129.
18. Shoop S. et al. Finite Element Modeling of Tires on Snow / S. Shoop, K. Kesler, R. Haehnel // Tire Science and Technology. TSTCA. 2006. V.34 (1). P. 2–37.
19. Вуори А.Ф. Механические свойства снега как строительного материала / А.Ф. Вуори // Физические методы исследования льда и снега: сборник трудов. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 118
20. СП 318.1325800.2017 Дороги лесные. Правила эксплуатации. М.: ФАУ «ФЦС». 2017. 85 с.
21. Кручинин И.Н. Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог / И.Н. Кручинин, О.Н. Бурмистрова, В. Ю. Задворнов, К. С. Отев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 73–85.
22. Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и её использование. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1992. 230 с
23. Lee J. An improved slip-based model for tire–snow interaction // SAE Int. J. Mater. Manuf., 2011, v. 4 (1), pp. 278–288.
24. ГОСТ 23246-78. Древесина измельчённая. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.
25. Пат. № 236240. Устройство для формирования зимнего эксплуатационного дорожного покрытия И.Н. Кручинин, Э.Р. Ахтямов, К.С. Отев, М.А. Кузнецов, А.А. Кунгуров, А.И. Шкаленко, Д.В. Овсейчик; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛТУ, RU . – № 2025111559 заявл. 05.05.2025 г. опубл. 04.08.2025 г.
26. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2014a. URL: http://www.mathworks.com.
27. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables/ Andrzej Piegat. –Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 с.
28. 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.
29. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025616328. Российская Федерация. Программа для определения сроков эксплуатации зимней лесовозной дороги по статистике климатических данных / О.Н. Бурмистрова, И.Н. Кручинин, А.П. Мохирев, К.С. Отев. Заявитель и правообладатель Отев К.С. № 2025614643 от 04.03.2025.; зарегистрировано 14.03.2025.

References

1. Vyrko N.P. Land Transport of Timber [Text]: textbook for university students / N.P. Vyrko. Minsk: Higher. school, 1987. 437 p.
2. Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. Analysis of Operating Conditions and Substantiation of Transport Schemes in the Conditions of Construction of Timber Roads // Systems. Methods. Technologies, 2020. No. 3 (47). Pp. 81–87.
3. Kruchinin I.N. Forest Transport Infrastructure / I.N. Kruchinin // Textbook. Yekaterinburg: FGBOU VO Ural. State Forest Engineering University, 2022. 134 p.
4. Morozov S.I. Winter Roads in the Forest Industry / S.I. Morozov, F.A. Pavlov, L.N. Plaksa, E.N. Savelyev. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1969, 168 p.
5. Leonovich I.I., Vyrko N.P., Martynikhin V.D., Matveyko A.P. Roads and Transport of the Forest Industry. Minsk: Vysshaya Shkola, 1979, 416 p.

6. Afanasyev I.A. Winter Maintenance of Timber Roads in the Ural Region: Scientific Publication / I.A. Afanasyev, I.N. Kruchinin. Perm: Perm State Technical University Publishing House, 2006, 135 p.
7. Provatorova G.V. Winter Maintenance of Roads. Vladimir: VlSU Publishing House, 2021, 67 p.
8. Dyunin A.K. In the Kingdom of Snow / A.K. Dyunin. Science. Novosibirsk, 1983. 128 p.
9. GOST R 58948-2020 Winter automobile roads and ice crossings. Technical rules for their construction and maintenance.
10. Kozlov V.G., Skripnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichy S.A., Mogutnov R.V. Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads // IzVUZ Lesnoy Zhurnal, 2018. No. 6 (366). P. 117–127.
11. Kruchinin I.N. Improving methods for designing optimal routes for forest roads using road information systems / I.N. Kruchinin, O.N. Burmistrova, E.R. Akhtyamov, Ya.I. Abramov, S.V. Chenushkina // Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2025. No. 2 (66). Pp. 76–77.
12. Kruchinin I.N. Improving the transport and operational indicators of forest transport infrastructure in winter / I.N. Kruchinin, V.V. Nikitin, O.N. Burmistrova, E.N. Shcherbakov, E.R. Akhtyamov, D.V. Ovseychik // Scientific and information journal - Forestry Bulletin, 2025. Vol. 29. No. 4. Pp. 156–169.
13. Otev K.S. Improving the transport and operational indicators of winter forest roads / K.S. Otev, I.N. Kruchinin, E.R. Akhtyamov, V.V. Pobedinsky, R.M. Demidov, M.A. Kuznetsov // Woodworking industry. 2025. No. 1. pp. 3–14
14. Kruchinin I.N. Development of methods for assessing winter road surfaces of forest roads based on a generalized indicator of transport and operational condition / I.N. Kruchinin, K.S. Otev, O.N. Burmistrova, E.R. Akhtyamov, M.A. Kuznetsov, D.V. Ovseychik // Scientific journal. Systems Methods Technologies. 2024. No. 4 (64). pp. 83–90.
15. Labykin A.A., Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Akhtyamov E.R. Assessment of the transport and operational state of compacted snow cover on winter forest roads using neural networks // Woodworking industry, 2023. No. 3. pp. 3–10.
16. Yong, R. Performance of snow under confined compression / R.N. Yong, M. Fukue // Journal of Terramechanics, April. 1977. Volume 14 (1). P. 37–49.
17. Kozhevnikov A.N. Equations for the relationship between snow state parameters and their dependence on snow cover deformation / A.N. Kozhevnikov, V.V. Belyakov, V.A. Malygin, et al. // Design, testing, operation and marketing of automotive and tractor equipment. N. Novgorod: NSTU, 1997. pp. 121–129.
18. Shoop S. et al. Finite Element Modeling of Tires on Snow / S. Shoop, K. Kesler, R. Haehnel // Tire Science and Technology. TSTCA. 2006. V. 34 (1). P. 2–37.
19. Vuori A.F. Mechanical Properties of Snow as a Building Material / A.F. Vuori // Physical Methods for Studying Ice and Snow: Collection of Papers. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 118
20. SP 318.1325800.2017 Forest Roads. Operating Rules. Moscow: FAU "FTSS". 2017. 85 p.
21. Kruchinin I.N., Burmistrova O.N., Zadvornov V.Yu., Otev K.S. Development of Methods for Assessing Winter Road Pavements on Forest Roads // Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2025. No. 1 (65). pp. 73–85.
22. Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. Wood Biomass and Its Use. Petrozavodsk: KSC RAS, 1992. 230 p.
23. Lee J. An Improved Slip-Based Model for Tire–Snow Interaction // SAE Int. J. Mater. Manuf., 2011, v. 4 (1), pp. 278–288.
24. GOST 23246-78. Wood chips. Terms and definitions. Moscow: Publishing House of Standards, 1986. 8 p.
25. Patent No. 236240. Device for forming winter operational road surfaces. I.N. Kruchinin, E.R. Akhtyamov, K.S. Otev, M.A. Kuznetsov, A.A. Kungurov, A.I. Shkalenko, D.V. Ovseychik; applicant and patent holder FSBEI HE USLTU, RU. No. 2025111559 filed 05.05.2025 published 04.08.2025
26. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2014a. – URL: http://www.mathworks.com.
27. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables/ Andrzej Piegat. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 p.
28. Sablin S.YU., Skrypnikov A.V., Vysockaya I.A., Boltnev D.E., Nikitin V.V., ZHuk A.YU. Metodika vychisleniya transportno-ekspluatacionnyh zatrat na soderzhanie lesovoznoj avtomobil'noj dorogi // Sistemy. Metody. Tekhnologii, 2021. № 1 (49). S. 78–81.
29. Certificate of registration for a computer program RU 2025616328. Russian Federation. Program for determining the operational period of a winter logging road based on climate data statistics / O.N. Burmistrova, I.N. Kruchinin, A.P. Mokhirev, K.S. Otev. Applicant and rights holder: K.S. Otev. No. 2025614643 dated March 4, 2025; registered on March 14, 2025.