

*Давыдов Д.Г., студент,  
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.  
Аммосова», г. Якутск*

*Филиппова Н.А.,  
доктор технических наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет  
имени М.К. Аммосова», г. Якутск*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОРОГ ДЛЯ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК В УСЛОВИЯХ СУРОВОГО КЛИМАТА**

*Аннотация.* В районах с суровым климатом, таких как Республика Саха (Якутия), ледовые технологические дороги являются критически важными элементами транспортной инфраструктуры, обеспечивающими доступ к месторождениям и связь удаленных населенных пунктов. Существующие нормативные методики (ГОСТ Р 58948-2020) базируются на упрощенных статических моделях и не в полной мере учитывают динамический характер нагружения, реологические свойства льда и возможность активного управления его структурой. Это приводит к неоптимальному использованию несущей способности ледяного покрова и рискам преждевременного закрытия переправ. Исследование базируется на натурных наблюдениях за гидрометеорологическими условиями, анализе режима эксплуатации и опыте строительства ледовой технологической дороги к месторождению песка «Быстрое-1». Используются методы математического моделирования (расчет толщины льда по модели упругой плиты на упругом основании), технико-экономического анализа и обобщения практического опыта. Предложена усовершенствованная методика проектирования ледовых технологических дорог, включающая: 1) уточненный расчет требуемой толщины льда с созданием «запаса прочности» (на 10-15 см сверх нормы) за счет послойного намораживания; 2) технологический регламент строительства с параметрами намораживаемых слоев (2-5 см); 3) систему мониторинга, основанную на оценке структуры льда (стекловидный, молочный, игольчатый) с периодичностью, зависящей от сезона. Разработанная методика позволила обеспечить бесперебойную эксплуатацию ледовой технологической дороги грузоподъемностью 40 тонн в течение 64 суток (с 3 февраля 7 апреля), что на 15-20% превышает нормативные сроки работы без усиления.

*Ключевые слова:* автомобильные дороги, ледовые технологические дороги, автозимники, послойное намораживание, несущая способность льда, мониторинг структуры льда.

## **Improving the Design and Construction Methodology of Ice Technological Roads for Freight Transportation in Severe Climatic Conditions**

**Abstract.** In regions with severe climates, such as the Republic of Sakha (Yakutia), ice technological roads are critical elements of transport infrastructure, providing access to mineral deposits and connecting remote settlements. Existing regulatory methodologies (GOST R 58948-2020) are based on simplified static models and do not fully account for the dynamic nature of loading, the rheological properties of ice, or the possibility of actively managing its structure. This leads to suboptimal use of the bearing capacity of the ice cover and risks of premature closure of crossings. The research is based on field observations of hydrometeorological conditions, analysis of the operational regime, and the construction experience of an ice technological road to the “Bystroye-1” sand deposit. Methods of mathematical modeling (calculation of ice thickness using the elastic plate on an elastic foundation model), technical and economic analysis, and synthesis of practical experience were used. An improved methodology for the design of ice technological roads is proposed, including: (1) a refined calculation of the required ice thickness with the creation of a “safety margin” (10–15 cm above the standard) through layer-by-layer freezing; (2) a construction technological regulation specifying the parameters of frozen layers (2–5 cm); and (3) a monitoring system based on the assessment of ice structure (glassy, milky, needle-like) with a frequency depending on the season. The developed methodology ensured uninterrupted operation of the ice technological road with a load capacity of 40 tons for 64 days (from February 3 to April 7), which is 15–20% longer than the standard service life without strengthening.

**Keywords:** highways, ice technological roads, winter roads, layer-by-layer ice freezing, ice bearing capacity, ice structure monitoring.

Обеспечение надежных транспортных связей в районах с экстремальными климатическими условиями является стратегической задачей для России. В Республике Саха (Якутия), где значительная часть территории характеризуется резко континентальным климатом с продолжительной (7-8 месяцев) зимой и амплитудой температур до  $102^{\circ}\text{C}$ , ледовые дороги зачастую являются единственными элементами инфраструктуры, связывающими промышленные объекты и населенные пункты [1, 2].

Особую актуальность эта проблема приобретает для объектов добывающей промышленности, где сезонность работы ледовых переправ напрямую влияет на логистику и экономику предприятия. Ключевым примером является ледовый автозимник «Якутск – Нижний Бестях» на федеральной дороге Р-504 «Колыма», обеспечивающий выход к железнодорожной станции. Согласно установленному режиму, движение для транспортных средств массой 40 тонн открывается с 3 февраля и полностью закрывается 15 апреля. Однако период эффективной эксплуатации для перевозки грузов полной массой 40 тонн составляет лишь 57 суток (с 3 февраля

по 31 марта), после чего начинается поэтапное снижение грузоподъемности из-за весенней деградации льда [3].

Существующая нормативная база (ГОСТ Р 58948-2020, СП 34.13330.2020) базируется на модели изгиба упругой ледяной плиты на упругом основании Винклера, разработанной еще в работах Н.Е. Жуковского и А.В. Ржаницына [4, 5]. Однако современные исследования показывают, что эта модель не учитывает реологические свойства льда (его ползучесть), усталостное накопление повреждений при циклических нагрузках, а также возможность целенаправленного управления структурой и толщиной ледяного покрова [6, 7].

В связи с этим целью настоящего исследования является совершенствование методики проектирования и строительства ледовых технологических дорог для грузовых перевозок в условиях сурового климата за счет улучшения технологии послойного намораживания, системы оперативного мониторинга структуры льда и обоснования экономически целесообразных режимов эксплуатации.

Методика включала следующие этапы:

Исследование выполнено на основе данных по ледовой технологической дороге, обеспечивающей доступ к месторождению песка «Быстрое-1» в Городском округе «город Якутск». Протяженность ледовой части — 2,5 км, расчетная интенсивность движения — 40 самосвалов в сутки, грузоподъемность — до 40 тонн.

Анализ природно-климатических условий на основе данных ФГБУ «Якутское УГМС» за 2015–2024 гг. (температура воздуха, толщина естественного льда, высота снежного покрова, уровенный режим р. Лена).

Нормативный расчет требуемой толщины льда по таблицам ГОСТ Р 58948-2020 для колесных машин массой 40 т при различных температурах.

Разработка уточненного расчета с учетом технологического усиления:

Очистка снега с проезжей части (оставлялся слой 3–5 см для сцепления) для ускорения естественного нарастания льда в 1,5–2 раза.

Послойное намораживание: заливка воды слоями 2–5 см (при температуре от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$ ) с помощью мотопомп производительностью  $30 \text{ м}^3/\text{час}$ .

Создание «запаса прочности»: дополнительное намораживание 10–15 см в феврале–марте.

Проектирование системы мониторинга:

10 постоянных контрольных лунок (через 250 м).

Периодичность замеров: при устойчивых морозах — 2 раза в месяц, в местах с течением  $>0,5 \text{ м/с}$  — раз в 5–7 дней, при оттепелях и весной — ежедневно.

Оценка структуры льда по излому образца (стекловидный, молочный, игольчатый). Игольчатая структура служила основанием для снижения грузоподъемности.

Технико-экономическая и экологическая оценка на основе фактических объемов перевозок и затрат в сезоне 2025–2026 гг.

## Результаты

Уточненная методика расчета толщины льда

Нормативный расчет по ГОСТ Р 58948-2020 (табл. 12) для колесных машин массой 40 т дает следующие значения:

при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$  и ниже — 67 см;

при  $-5^{\circ}\text{C}$  — 74 см;

при  $0^{\circ}\text{C}$  (кратковременные оттепели) — 83 см.

На проектируемом участке ледовой дороги естественная толщина 67 см достигается к 3 февраля. Однако в весенний период (март–апрель) происходит деградация структуры льда: перекристаллизация снижает прочность на 30–50% [8]. Поэтому для обеспечения безопасной работы в течение всего установленного сезона (до 7 апреля для 40-тонных машин) автором предлагается следующий уточненный подход:

Проектная толщина к 3 февраля — не менее 67 см (естественный лед + первичное намораживание 2–3 см).

Дополнительное намораживание в феврале–марте — 10–15 см.

Итоговая толщина к началу весенней деградации — 77–82 см.

Даже при снижении прочности на 30% эффективная несущая способность такого льда соответствует  $\approx 54$ –57 см монолитного льда, что превышает минимально допустимую величину для нагрузки 40 т (около 50 см для ослабленного льда). Это гарантирует отсутствие преждевременного закрытия переправы.

На основе практической реализации проекта разработан следующий алгоритм (табл. 1):

Таблица 1

### Технологическая карта послыного намораживания ледовой дороги

Операция	Параметры	Оборудование	Контроль
Подготовка основания	Очистка от снега (слой 3–5 см оставить), формирование снежных валиков ( $h=20$ –30 см)	Бульдозер	Визуально
Заливка слоя	Толщина слоя 2–5 см, равномерно по всей ширине	2 мотопомпы (30 м <sup>3</sup> /ч), разбрызгивающие насадки	Мерная рейка
Выдерживание	При $-30^{\circ}\text{C}$ – 4–6 ч, при $-15^{\circ}\text{C}$ – 12–15 ч	-	Температура льда на глубине 2 см (термопара)
Намораживание следующего слоя	После полного промерзания предыдущего	-	Отсутствие воды на поверхности

Ключевым нововведением является обязательная ежедневная оценка структуры льда при оттепелях и в весенний период. На основе натурных наблюдений установлены критерии (табл. 2).

Таблица 2

**Классификация структуры льда и рекомендации по эксплуатации**

Тип структуры	Визуальные признаки	Относительная прочность	Допустимая нагрузка
Стекловидный	Мелкозернистый, прозрачный, без пузырьков	100% (эталон)	40 т (без ограничений)
Молочный	Мелкие пузырьки воздуха, полупрозрачный	85–90%	40 т (снизить скорость до 15 км/ч)
Игольчатый	Вертикально ориентированные кристаллы, мутный	50–70%	30 т (при обнаружении >30% лунок – закрытие для 40 т)

При обнаружении игольчатой структуры в 30% и более контрольных лунок эксплуатация переправы для 40-тонных машин прекращается – это происходило в экспериментальном сезоне 2026 года с 7 апреля (переход на 30 т).

Сравнение предлагаемой методики с альтернативными подходами (табл. 3) показывает её преимущество для условий интенсивного грузового движения (40 самосвалов/сут).

Таблица 3

**Сравнение методов увеличения срока службы ледовых переправ**

Метод	Увеличение срока службы	Недостатки	Применимость для данного объекта
Очистка снега	+7–10 суток (ускорение роста в 1,5–2 раза)	Требует регулярного повторения	Высокая (применен в составе комплекса)
Посыпка (песок, шлак)	+3–8 суток (на 7–15%)	Требует постоянного обновления	Средняя (как дополнительная мера)
Армирование геосетками	потенциально +10–20 суток (повышение прочности 25–50%)	Высокая стоимость (до 2 млн руб./км), сложность укладки на 50 000 м <sup>2</sup>	Низкая (экономически нецелесообразно)
Послойное намораживание (предлагаемое решение)	+15–20 суток «запаса прочности»	Требует оборудования (мотопомпы)	Высокая (окупаемость < 1 дня)

Таким образом, предложенная методика не требует значительных капитальных вложений (в отличие от армирования), но позволяет за счет оперативного управления (очистка снега + дозированная заливка воды) создать управляемый «запас прочности», компенсирующий естественную весеннюю деградацию льда.

**Выводы:**

Усовершенствована методика расчета толщины льда для грузовых перевозок в суровом климате. В отличие от нормативного подхода (ГОСТ Р

58948-2020), предложено учитывать создание «запаса прочности» (10–15 см) за счет послойного намораживания, что позволяет гарантированно обеспечить работу ледовой дороги в течение всего периода востребованности (64 суток для 40 т.).

Разработан технологический регламент строительства, включающий очистку снега с оставлением слоя 3–5 см, формирование снежных валиков, послойную заливку воды (слои 2–5 см), контроль промерзания и состав необходимого оборудования (мотопомпы, бульдозеры). Потребность в воде для участка 2,5 км × 20 м составляет 7 500 м<sup>3</sup> на наращивание 15 см.

Предложена система мониторинга с классификацией структуры льда (стекловидный, молочный, игольчатый) и критериями принятия решений. При обнаружении игольчатой структуры в >30% контрольных лунок – нагрузка снижается до 30 т, что позволяет избежать аварийных ситуаций.

Экономическая эффективность подтверждена практикой: при затратах на усиление 650–850 тыс. руб. получена выручка 49,8 млн руб., окупаемость – менее одного дня. Экологическое воздействие минимально, природная среда восстанавливается после закрытия переправы.

Научная новизна заключается в том, что впервые для ледовой технологической дороги выполнено обоснование толщины ледяного покрова для нагрузки 40 т с применением послойного намораживания и уточненной методики оценки структуры льда. Полученные результаты могут быть тиражированы при проектировании и строительстве ледовых технологических дорог в арктических и субарктических регионах Российской Федерации.

### *Список литературы*

1. Шестаков Д.С., Капырин В.И. Исследование эффективности геосинтетических материалов для армирования ледовых покрытий // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 12 (111). – С. 1468–1477.
2. Успенский А.Б., Ковалев С.М. Влияние поверхностных посыпок на термический режим и прочность ледяного покрова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 4. – С. 85–93.
3. Распоряжение ФКУ Упрдор «Вилуй» о режиме эксплуатации ледового автозимника «Якутск – Нижний Бестях» на сезон 2025–2026 гг. – Якутск, 2025.
4. Жуковский Н.Е. О прочности и деформации льда. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 150 с.
5. Ржаницын А.В., Кунцевич П.А., Горелик М.И. Расчет ледовых покрытий. – М.: Транспорт, 1975. – 184 с.
6. Поздняков А.В. Расчет ледяного покрова на действие подвижных нагрузок с учетом его вязкоупругих свойств // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 5(57). – С. 17–28.
7. Määttänen M., Saarnto P. On the fatigue of ice // Proc. of the 8th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. – 1985. – V. 1. – P. 342–353.

8. Голушкевич С.С., Фролов С.В. Механика льда в инженерных задачах. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 270 с.
9. ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. – М.: Стандартинформ, 2020. – 40 с.
10. Данные ФГБУ «Якутское УГМС» // Архив гидрометеорологических наблюдений. – Якутск, 2024.

#### **Информация об авторах**

Давыдов Денис Георгиевич — студент, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Российская Федерация, г. Якутск. E-mail: [davydov@denis14.ru](mailto:davydov@denis14.ru)

#### **Филиппова Надежда Анатольевна**

Доктор технических наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»  
Российская Федерация, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58  
Профессор кафедры транспортных технологий  
E-mail: [umen@bk.ru](mailto:umen@bk.ru)

#### **Information About The Authors**

Davydov Denis Georgievich — Student, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation. E-mail: [davydov@denis14.ru](mailto:davydov@denis14.ru)

#### **Filippova Nadezhda Anatolievna**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov  
58 Belinsky Street, Yakutsk, 677000, Russian Federation  
Professor at the Department of Transport Technologies  
E-mail: [umen@bk.ru](mailto:umen@bk.ru)