
Исследование условий, влияющих на продолжительность эксплуатации ледовых автозимников

Я.М. Рудакова

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: В статье исследуются ключевые природно-климатические и эксплуатационные факторы, определяющие продолжительность безопасной эксплуатации ледовых автозимников в северных регионах России. На основе анализа температурного режима, осадков и динамических нагрузок от транспорта выявлены закономерности изменения прочности и деформации ледового покрова. Разработаны практические рекомендации по мониторингу, армированию льда и управлению нагрузками для продления срока службы переправ и минимизации рисков.

Ключевые слова: ледовый автозимник, прочность льда, срок эксплуатации, температурный режим, динамические нагрузки, снежный покров, гидрологические факторы, безопасность переправ, мониторинг льда.

В Российской Федерации некоторые районы находятся в условиях сурового северного климата, где зима длится около восьми-девяти месяцев, а снежное покрытие сохраняется практически весь год. Единственным способом связи этих районов с остальной частью страны служат временные дороги — автозимники. Транспортировка пассажиров и грузоперевозки через водные препятствия в зимний период времени в северных регионах России преимущественно осуществляются посредством временных ледовых автозимников [1]. Эти сооружения играют ключевую роль в обеспечении устойчивого функционирования транспортной системы, поддержании экономической активности и социальной стабильности в труднодоступные районы страны.

Ледовые автозимники существенно отличаются от обычных автодорог низкой скоростью передвижения и небольшой интенсивностью транспортного потока. По таким маршрутам часто перевозят грузы большой массы. Чтобы обеспечить безопасный проезд автомобилей весом 30–40 тонн, необходим достаточно толстый слой льда – не менее 70 сантиметров – с минимальным количеством трещин [2].

Несмотря на накопленный опыт строительства и эксплуатации ледовых автозимников, проблемы оптимизации продолжительности срока службы остаются недостаточно изученными. Необходимость объективного анализа процессов и детальное исследование динамики изменения структуры ледяного покрова, выявление закономерностей поведения льда под воздействием внешних факторов приобретают особую значимость.

Одним из важнейших факторов, влияющих на безопасное функционирование ледовых автозимников выступает климат конкретной местности расположения автозимника. Важнейшими климатическими показателями является:

- **Температурный режим.** Температура воздуха непосредственно воздействует на толщину и прочность льда. Чем ниже средняя температура зимой, тем прочнее образуется ледяной покров, увеличивающий допустимую грузоподъемность транспортных средств и улучшающий безопасность передвижения. Однако экстремально низкие температуры приводят к снижению пластичности льда, повышая риск образования крупных трещин и к снижению общей надежности дорожной полосы. Быстрые изменения температуры создают дополнительные напряжения внутри льда, провоцируя появление микротрещин и общее ослабление покрытия автозимника. Зависимость нарастания льда от температуры воздуха выражается следующей формулой

$$V = k \cdot (-T)^{0,5} \quad (1)$$

где k – коэффициент для пресной воды, равен 1,5; T – температура воздуха, °С.

Повышение температуры воздуха в зимний период приводит к таянию верхних слоев льда, снижению его несущей способности на 15–20% и образованию водяных линз. Длительные оттепели (>48 часов) с температурой около 0°С вызывают формирование сквозных талых каналов и

полную потерю несущей способности участка автозимника. Экстремально низкие температуры ($< -35^{\circ}\text{C}$) увеличивают хрупкость льда, повышая риск образования магистральных трещин [3].

Осадки. Снег, накапливающийся на поверхности льда, играет двойственную роль. С одной стороны, он выступает как теплоизолятор, замедляющий промерзание водоема [4]. С другой – его вес увеличивает нагрузку на лед, особенно опасную в период формирования ледового покрова. Снег создает теплоизоляционный эффект, например, снег толщиной 15 см снижает теплопотери воды в три раза.

Помимо климатических факторов на сроки эксплуатации ледовых автозимников влияют технологические факторы:

- **Динамические нагрузки от транспорта.** Прочность ледовых сооружений напрямую зависит от характера и частоты нагрузок. Вес транспортных средств, проезжающих по льду, создают вертикальную нагрузку, а движение автомобилей создает горизонтальные колебания. Частота, с которой эти нагрузки действуют на ледовый автозимник, важна для оценки износостойкости льда. Например, частота колебаний в диапазоне 2–5 Гц, означает, что лед будет испытывать колебания этой частоты каждый раз, когда проезжает автомобиль. Эти колебания могут приводить к образованию усталостных микротрещин — небольших трещин, возникающих из-за циклических напряжений [5]. Во время эксплуатации по истечении времени эти микротрещины могут накапливаться и приводить к более крупным повреждениям, что в свою очередь снижает прочность ледового сооружения.

При интенсивности движения >100 автомобилей/сутки срок службы переправы сокращается на 25%. Это связано с тем, что большее количество автомобилей ведёт к большему количеству колебаний и, следовательно, к более быстрому накоплению усталостных повреждений [6]. В таблице 1

представлены допустимые нагрузки при движении по ледовым автозимникам.

Проход тяжелой техники создает давление 400–500 кПа, что требует минимальной толщины льда 50 см. Зависимость толщины льда от массы транспортных средств представлена в таблице 2.

Таблица №1

Допустимые нагрузки при движении по ледовым автозимникам

Тип транспорта	Максимальная скорость, км/ч	Минимальное расстояние между машинами, м
Легковой автомобиль	20	50
Грузовой автомобиль	15	100
Автопоезд	10	200

Таблица №2

Зависимость толщины льда от массы транспорта

Тип транспорта	Масса, т	Минимальная толщина льда, см
Пешеходы	0,1	10
Легковые автомобили	2-3	30
Грузовые автомобили	20	50
Спецтехника	40	70

Таким образом, прочность ледовых сооружений зависит не только от их первоначальных характеристик, но и от условий эксплуатации, таких как частота и характер нагрузок. Увеличение интенсивности движения значительно ускоряет процесс износа, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ледовых переправ.

На сроки эксплуатации ледовых автозимников влияют гидрогеологические факторы, которые определяют скорость формирования,

прочность и разрушение ледового покрова [7]. Основные гидрогеологические факторы представлены в таблице 3.

Таблица №3

Основные гидрологические факторы

Гидрологический фактор	Характеристика гидрологического фактора
Скорость течения водоема	Медленное течение (до 0,1 м/с) способствует равномерному нарастанию льда и формированию прочного монолитного покрова
	Среднее течение (0,1–0,5 м/с) замедляет замерзание, приводит к образованию неровной поверхности льда и локальных зон пониженной прочности
	Быстрое течение (более 0,5 м/с) может полностью препятствовать образованию льда или приводить к формированию тонкого, нестабильного слоя с высоким риском провалов
Глубина водоема	Мелководье (до 2 м). Лед образуется быстрее, но сильнее подвержен температурным колебаниям из-за близости дна (аккумуляция тепла от грунта)
	Глубокие водоемы (более 5 м). Лед нарастает медленнее, но обладает большей устойчивостью к кратковременным оттепелям
Минерализация и состав воды	Пресная вода замерзает при 0°C, формируя более однородный и прочный лед
	Соленая вода имеет более низкую температуру замерзания, а лед отличается слоистой структурой и пониженной прочностью

Факторы, представленные в статье, напрямую влияют на сроки эксплуатации ледовых автозимников и на безопасность передвижения по ним, для минимизации негативного воздействия и для укрепления ледовых автозимников необходимо применять комплекс мер. Рекомендации по повышению долговечности ледовых автозимников:

– Проводить регулярный мониторинг (2 раза в сутки в стабильный период и каждые 5 часов в период оттепелей/похолоданий) толщины льда с помощью ультразвуковых датчиков или бурения [8]; контролировать температуру воздуха и льда.

– Проводить очистку трассы от снега. Снежный покров толщиной более 10 см должен удаляться для ускорения промерзания, предотвращения образования теплоизоляционного слоя и снижения статистической нагрузки.

– Регламентировать движение транспортных средств в соответствии с таблицей 1 и 2. Ограничение скорости движения (>20 км/ч недопустимо для грузового транспорта), обеспечение минимальной дистанции.

– Применять методы армирования. Использование синтетических материалов (например, геотекстиля) или естественных армирующих элементов (ветки, доски) позволяет увеличить прочность льда на 20–30% [9]. Армирование особенно эффективно в зонах с высокой интенсивностью движения или в местах с повышенным риском образования трещин.

– Применять прогностические модели. Для прогнозирования износа необходимо проводить моделирование инженерного сооружения, используя метод конечных элементов в программных комплексах [10,11]. Модель учитывает локальные напряжения, которые возникают в точках контакта колес со льдом, а также учитывает накопление повреждений при циклических нагрузках.

Ледовые автозимники являются важными элементами транспортной инфраструктуры северных регионов России. Их безопасная и долговременная эксплуатация зависит от учета природно-климатических факторов, управления нагрузками и применения современных технологий мониторинга и укрепления. Предложенные меры позволят минимизировать риски и продлить срок службы переправ, что особенно актуально в условиях изменения климата и роста транспортной нагрузки.

Литература

1. Киселев П.В., Понятов А.Г., Федотова Е.А. Основы проектирования конструкции ледовых переправ. Тюмень: ТИУ, 2016. С. 118-122.
2. Дубровский С.В. Эффективные методы контроля за состоянием ледовых переправ: определение толщины и структуры льда, поиск дефектов // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», М.: Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации, 2019. С. 346.
3. Огар П.М., Гусев Н.М. О сокращении сроков ввода в эксплуатацию ледовых переправ // Механики XXI века. 2005. №4. С. 57-60.
4. Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Климатические факторы, влияющие на толщину льда каспийского моря и методические указания по прогнозированию его нарастания // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020. С. 202-203.
5. Goldstein R.V. Fracture mechanics in modeling of icebreaking capability / R.V. Goldstein, N.M. Osipenko // J. Cold Regions Eng. 1993. V. 7. № 2. pp. 33-43.
6. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Вопросы механики разрушения льда и ледяного покрова при анализе ледовых нагрузок // Научно-технический сборник вести газовой науки. 2013. №3(14). С. 104-112.
7. Козлов Д.В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: Изд-во МГУП, 2000. 263 с.
8. Sattar S., Li S., Chapman M. Road surface monitoring using smartphone sensors: A review. Sensors. 2018. T. 18. No. 11. P. 3845.

9. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Армирование ледовых переправ // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 88–91.

10. Бескопыльный А.Н., Кадомцев М.И., Ляпин А.А. Методика исследования динамических воздействий на перекрытия пешеходного перехода при проезде транспорта // Инженерный вестник Дона, 2011. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/702.

11. Быков Д.В., Лихачёв Д.В. Имитационное моделирование как средство модернизации участка транспортной сети // Инженерный вестник Дона, 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

References

1. Kiselev P.V., Ponyatov A.G., Fedotova E.A. Osnovy` proektirovaniya konstrukcii ledovy`x pereprav. Tyumen`: TIU, 2016. pp. 118-122.

2. Dubrovskij S.V. Materialy` XV Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy` razvitiya inzhenerny`x izy`skanij v stroitel`stve v Rossijskoj Federacii», M.: Perspektivy` razvitiya inzhenerny`x izy`skanij v stroitel`stve v Rossijskoj Federacii, 2019. 346 p.

3. Ogar P.M., Gusev N.M. Mexaniki XXI veku. 2005. №4. pp. 57-60.

4. Naurozbaeva Zh.K., Lobanov V.A. Sovremenny`e problemy` gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushhej sredy` na prostranstve SNG. SPb.: Rossijskij gosudarstvenny`j gidrometeorologicheskij universitet, 2020. pp. 202-203.

5. Goldstein R.V., Osipenko N.M., J. Cold Regions Eng. 1993. V. 7. № 2. pp. 33-43.

6. Gol`dshtejn R.V., Osipenko N.M. Nauchno-texnicheskij sbornik vesti gazovoj nauki. 2013. №3(14). pp. 104-112.

7. Kozlov D.V. Led presnovodny`x vodoemov i vodotokov [Ice of freshwater reservoirs and watercourses]. M.: Izd-vo MGUP, 2000. 263 p.



8. Sattar S., Li S., Chapman M. Road surface monitoring using smartphone sensors: A review. Sensors. 2018. T. 18. No. 11. p. 3845.
9. Yakimenko O.V., Sirotuk V.V. Armirovanie ledovy`x pereprav Kriosfera Zemli, 2014, t. XVIII, № 1, pp. 88-91.
10. Beskopy`l`ny`j A.N., Kadomcev M.I., Lyapin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/702.
11. By`kov D.V., Lixachyov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

Дата поступления: 24.06.2025

Дата публикации: 25.08.2025