

*Белова К.С.,  
студент, кафедра «Трубопроводный транспорт»,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Россия, г. Самара*

## **ОСОБЕННОСТИ И ВЫЗОВЫ СТРОИТЕЛЬСТВА В КРИОЛИТОЗОНЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

***Аннотация:** в статье представлены основные методы строительства на ММГ, предложены современные подходы и инновационные технологии, включая интеллектуальный мониторинг, искусственный интеллект (ИИ), для обеспечения безопасности и эффективной эксплуатации объектов. Подчеркивается важность точных изысканий и адаптации к деградации мерзлоты.*

***Ключевые слова:** строительство на ММГ, криолитозона, инновационные технологии, стабилизация грунтов, свайные фундаменты, надземная прокладка, мониторинг строительства, деградация мерзлоты*

***Abstract:** This article outlines the principal construction methods for permafrost regions, offering contemporary approaches and innovative technologies—such as intelligent monitoring, artificial intelligence, and blockchain—to ensure structural safety and longevity. The critical importance of accurate geotechnical surveys and adapting to permafrost degradation is underscored.*

***Keywords:** Construction on icy permafrost, cryolithozone, innovative technologies, ground stabilization, pile foundations, elevated utility routing, construction monitoring, permafrost degradation.*

Активное освоение районов Крайнего Севера и Арктической зоны в нефтегазовой сфере, обусловленное стратегическими и экономическими интересами, связано с необходимостью возведения сложной и критически важной инфраструктуры. Однако, вынужденное проектирование и строительство на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) – это процессы, которые требуют не просто особого внимания, а комплексного подхода. Особая сложность обусловлена не только экстремальными природно-климатическими условиями, но и критической важностью обеспечения многофакторной безопасности.

Речь идет не только о промышленной безопасности самих объектов и персонала, но и об экологической безопасности, которая приобретает глобальное значение. Растепление ММГ, вызванное как техногенным воздействием от строительства и эксплуатации, так и естественными климатическими изменениями, напрямую влияет на ключевые климатические процессы, усиливая глобальное потепление. Скорость деградации криолитозоны в настоящее время значительно превосходит темпы, которые наблюдались 100 или даже 20 лет назад, что создает серьезные вызовы для инженеров и строителей.

Таким образом, ключевым подходом становится обеспечение многофакторной безопасности и устойчивости на каждом этапе жизненного цикла проекта строительства – от инженерных изысканий и проектирования до возведения, эксплуатации и последующей ликвидации, что требует не только строгого соблюдения существующих норм, но и активного внедрения инновационных технологий и методов.

В данной статье будет предложен комплекс современных подходов к проектированию и строительству объектов инфраструктуры на ММГ, направленных на минимизацию рисков и повышение надежности в условиях ускоренной деградации криолитозоны. Несмотря на развитые методы проектирования, качество и долговечность объектов напрямую зависят от

применяемых строительных технологий и строгого соблюдения принципов работы с ММГ.

Можно выделить следующие основные вызовы и трудности строительства на ММГ обусловленные, как спецификой мерзлых грунтов, так и суровыми природно-климатическими условиями, которые ограничивают многие аспекты строительства, а так же возрастающей скоростью деградации мерзлоты:

1. Деградация мерзлоты в процессе строительства. Тепловые и механические воздействия от строительных работ (отрывка котлованов, движение техники, тепловыделение оборудования) нарушают естественный тепловой баланс ММГ, что приводит к ускоренному таянию, потере несущей способности, неравномерным осадкам, морозному пучению и термокарсту, что может вызвать аварийные ситуации уже на стадии возведения объекта. Хрупкость арктических экосистем и их медленное восстановление диктуют строгие требования к сохранению природной среды. Любое нарушение растительного покрова, уплотнение грунта или загрязнение территории может спровоцировать необратимые процессы деградации мерзлоты, эрозию и долгосрочные экологические последствия.

2. Проблемы контроля качества строительных работ. Обеспечение надлежащего качества в условиях низких температур и нестабильных грунтов затруднено. Свойства материалов меняются, точность монтажа может снижаться, а скрытые дефекты, вызванные нестабильностью основания или нарушениями технологий, могут проявиться позже, приводя к авариям, что требует внедрения непрерывного геокриологического и технологического контроля.

3. Сложные логистические условия и короткий строительный сезон. Удаленность, отсутствие развитой инфраструктуры и зависимость от сезонных путей сообщения (зимники, навигация) значительно удорожают и усложняют доставку ресурсов. Экстремальные погодные условия (низкие температуры,

сильные ветры, полярная ночь) резко сокращают эффективный период для проведения строительных работ, требуя тщательного планирования и высокой интенсивности, а так же подходящих материалов и оборудования.

Преодоление перечисленных вызовов, которые являются основными и наиболее значимыми, однако не полностью охватывают все ограничения строительства на ММГ, требует не только глубокого понимания процессов, происходящих в криолитозоне, но и стратегического подхода к выбору методов и технологий строительства.

Успешное строительство на ММГ базируется на двух фундаментальных принципах (I принцип и II принцип), выбор и применение которых определяются инженерно-геологическими условиями, типом сооружения и прогнозом изменения криолитозоны. Эти принципы, регламентированные в том числе СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах», являются основой для всех проектных и строительных решений. Грамотный выбор и применение этих принципов, подкрепленные актуальными изысканиями и инновационными технологиями, являются залогом безопасной и долговечной реализации проектов в условиях криолитозоны.

Для наглядной демонстрации современных подходов и их соответствия вышеуказанным принципам, а также для оценки их инновационного уровня и потенциала к развитию, включая интеграцию передовых инновационных решений, приведена следующая сводная таблица 1.

*Таблица 1.*

**Сравнительная оценка современных подходов**

<b>Метод/технология строительства</b>	<b>Основные особенности</b>	<b>Инновационность /возможность интеграции</b>
<b>Принцип I - сохранение основания в мерзлом состоянии</b>		
Свайные фундаменты с термостабилизаторами (ТСТ) (метод активного	Высокая несущая способность, предотвращение деградации грунта. Высокая стоимость,	Интеллектуальные системы для управления ТСТ (в том числе на основе искусственного

<b>Метод/технология строительства</b>	<b>Основные особенности</b>	<b>Иновационность /возможность интеграции</b>
охлаждения)	зависимость от климата	интеллекта (ИИ)), оптимизация режимов охлаждения. Интеграция датчиков для мониторинга.
Подземная прокладка с термоизолирующей обсыпкой/футлярами (метод пассивной теплоизоляции)	Защита от повреждений, снижение теплового воздействия, сохранение ландшафта. Сложность земляных работ, риск нарушения изоляции.	Новые высокоэффективные материалы (с улучшенными термоизоляционными свойствами). Датчики температуры/влажности внутри изоляции.
<b>Принцип II - основания в оттаивающем или оттаянном состоянии</b>		
Надземная прокладка трубопроводов на регулируемых опорах (метод адаптации к оттаиванию)	Минимизация теплового воздействия, компенсация деформаций, ремонтпригодность. Уязвимость к внешним воздействиям, необходимость мониторинга.	Дистанционный мониторинг деформаций, цифровые двойники и ИИ для прогнозирования деформаций. Автоматизированные системы регулировки опор на основе данных мониторинга.
<b>Принцип I/II</b>		
Модульное строительство объектов инфраструктуры	Метод направлен на снижение времени и интенсивности работ на площадке. Сокращение сроков, повышение качества (заводская сборка), снижение трудозатрат на месте. Высокие транспортные расходы, ограничения по габаритам.	Интеграция BIM-технологий, блокчейн для прозрачного отслеживания цепочки поставок и контроля качества. Цифровое проектирование модулей.

Таблица 1 систематизирует и предлагает современные подходы к строительству и проектированию на ММГ. Каждый метод имеет свои уникальные особенности, преимущества и недостатки (например, с экономической точки зрения, с точки зрения возможности реализации технических решений, уязвимости технологий в экстремальных природных

условиях). Таким образом, выбор технологических решений основывается на конкретике проектных условий.

Следует отметить, что при любом принципе строительства особенно важным становится этап проведения инженерных изысканий и подготовительных работ: раннее выявление проблем, достоверность исходных данных за счет внедрение систем искусственного интеллекта, интеллектуального мониторинга и высокоточных изысканий. Раннее обнаружение деградаций способствует оптимизации эксплуатации, повешению безопасности, корректности исходных данных для проектирования. Однако внедрение инновационных технологий сопряжено с высокой стоимостью и требует соответствующей квалификации персонала. При этом крайне важна постоянная оценка изменений с учетом накопленного опыта и техногенного развития территорий.

Таким образом, проектирование, строительство и эксплуатация объектов в криолитозоне представляют собой одну из наиболее сложных и ответственных задач современного инжиниринга.

#### **Использованные источники:**

1. СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах»;
2. СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах»;
3. Кожаева К.В., Аликов С.А., Ахчурина Э.А. «Обеспечение стабилизации проектного положения подземных трубопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов» // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 3. С. 77-81;
4. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and

Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02