

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/07SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS226 (<https://doi.org/10.15862/07SATS226>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Маковская, М. М. Оценка влияния горизонтальной естественнодействующей трубчатой системы на температурный режим основания автомобильной дороги в криолитозоне / М. М. Маковская, В. В. Воронцов // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/07SATS226.

For citation:

Makovskaya M.M., Vorontsov V.V. Assessment of the influence of a horizontal naturally acting tubular system on the temperature regime of the highway foundation in the cryolithozone. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 07SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/07SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.139

Маковская Мария Михайловна

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия

E-mail: mashulya-makovskaya@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1566-160X>

Воронцов Вячеслав Викторович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Доцент кафедры «Строительные конструкции», заведующий базовой кафедрой «Газпром нефть»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: variyyg08@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546740

Оценка влияния горизонтальной естественнодействующей трубчатой системы на температурный режим основания автомобильной дороги в криолитозоне

Аннотация. Особая значимость освоения северных районов для России определяется концентрацией на этих территориях стратегических ресурсов, формирующих экономический фундамент государства. Основной проблемой освоения таких областей с характерными климатическими особенностями является неразвитость инфраструктуры и транспортного сообщения. Следовательно, разработка и внедрение технологий строительства устойчивых дорожных покрытий в криолитозоне является фундаментальной инженерно-технической проблемой, требующей безотлагательного решения. Статья посвящена проблемам проектирования и строительства автомобильных дорог в криолитозоне на примере Ямало-Ненецкого автономного округа. Отмечается, что многолетнемерзлые грунты занимают около 65 % территории России, а развитие Арктической зоны является приоритетным направлением государственной политики. Авторы акцентируют внимание на деградации мерзлоты и изменении свойств грунтов. На основе климатических данных показано, что фактическое потепление опережает корректировки нормативных документов, что приводит к занижению температур при расчётах. В настоящей работе выполнено численное моделирование

температурного режима автомобильной дороги в программном комплексе Frost 3D. Рассмотрены два варианта конструктивного решения: теплоизоляция насыпи и применение горизонтальной естественнодействующей трубчатой системы (ГЕТ). На примере участка автомобильной дороги проведен сравнительный анализ эффективности термостабилизации грунтов основания. Полученные результаты позволяют обосновать оптимальные инженерные решения для обеспечения долговременной устойчивости дорожных сооружений в условиях изменяющегося климата, а также сформировать научно-практические рекомендации по актуализации действующих строительных норм с учётом прогнозируемых температурных сдвигов.

Ключевые слова: Арктика; многолетнемерзлые грунты; земляное полотно; автомобильная дорога; изменение климата; система ГЕТ; численное моделирование

Введение

Многолетнемерзлые грунты занимают около 65 % территории России, что составляет более 10 миллионов квадратных километров. Область распространения многолетнемерзлых пород (криолитозона) является наиболее перспективной ресурсной территорией страны, без освоения природных богатств которой невозможно представить устойчивое развитие России и мира в целом.

В последние годы развитие Арктической зоны Российской Федерации (далее — АЗРФ) становится одним из ключевых направлений государственной политики, что подтверждается рядом стратегических документов. Из них следует поставить на первое место — Указ Президента РФ № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» от 2014 года, с учетом изменений, на данный момент времени включает в себя 10 регионов нашей страны, а также земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане (рис. 1). Наполняют его смыслами и целеполаганием Указы Президента РФ «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» и «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». В практической плоскости реализация определяется Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2021 года № 996-р, где для каждого субъекта определены конкретные задачи и сроки выполнения. Эти инициативы подчеркивают важность комплексного подхода к развитию северных территорий.

26-27 марта 2025 года, в Мурманске прошел 6-й международный арктический форум «Арктика — территория диалога», на котором были приняты ряд значимых решений, касающихся развития транспортной инфраструктуры в Арктике. АЗРФ значительно отличается экстремальными природно-климатическими условиями, включая постоянный ледовый покров или дрейфующие льды в арктических морях, очаговым характером промышленно-хозяйственного освоения территорий и низкой плотностью населения (1–2 чел. на 10 км²), удаленностью от основных промышленных центров, высокой ресурсоемкостью и зависимостью хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от поставок топлива, продовольствия и товаров первой необходимости из других регионов России.

В своей работе сконцентрируем внимание на одном из субъектов Арктической зоны Российской Федерации — Ямало-Ненецком автономном округе (далее — ЯНАО). Регион является богатым источником природных ресурсов, таких как нефть и газ, бурый уголь, железные руды, хром, свинец и цинк, медь, молибден, ниобий и тантал, золото и серебро.¹

¹ Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Администрация ЯНАО. Салехард: Тюменский государственный университет. Эколого-географический факультет. Тюмень: пред. редколлегии И. Л. Левинзон. Гл. ред. С. И. Ларин. Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2004.

Строительство автомобильных дорог в регионе представляет собой сложную задачу, требующую применения специальных технологий для повышения устойчивости оснований и земляного полотна. Проблема, с которой сталкиваются проектировщики и строители, заключается в деградации мерзлоты и изменении физико-механических свойств грунтов, что может привести к деформациям и разрушениям дорожного покрытия.

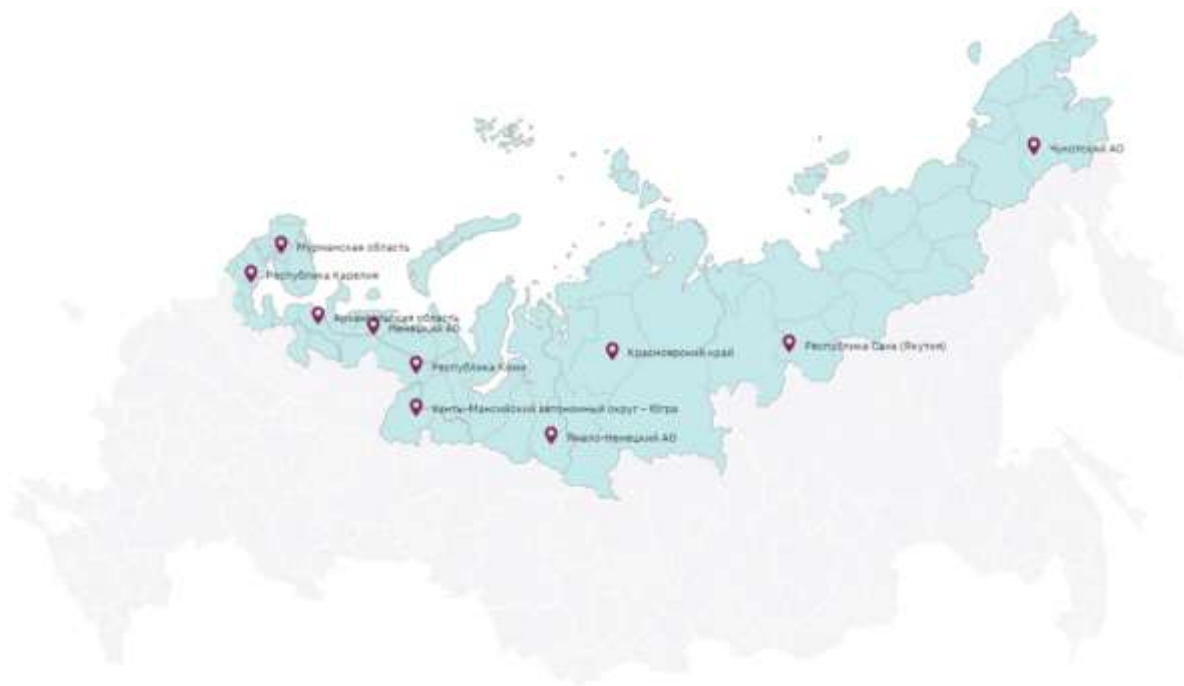


Рисунок 1. Арктическая зона РФ (источник: <https://erdc.ru/about-azrf/>.
Автор: Министерство РФ по развитию Дальнего Востока и Арктики)

В работе [1] подчеркивается, что строительство железных и автомобильных дорог предусматривается во всех стратегических документах, определяющих развитие транспортной системы страны на период до 2030 г. и утвержденных распоряжениями Правительства Российской Федерации. В частности, в Ямало-Ненецком автономном округе, который полностью входит в арктическую зону РФ, наблюдается необходимость в адаптации типовых конструкций дорог к местным условиям.

В своей работе А. Г. Алексеев [2] говорит о том, что одним из главных направлений обеспечения безопасного строительства является развитие отечественной нормативной базы. В последнее время разработаны следующие нормативные документы: СП 313.1325800.2017 «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства»², СП 431.1325800.2019 «Дороги промышленные автомобильные. Правила проектирования и строительства в Арктической зоне»³, СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования»⁴.

Важным фактором при проектировании и строительстве являются климатические характеристики. Л. Н. Хрусталева и Б. А. Ревич в своих работах [3; 4] утверждают, что в Арктике среднегодовая температура растёт в два раза быстрее общемировых темпов. На территории Ямало-Ненецкого АО за 50 лет она выросла на 3,5°C, а сезонное протаивание

² СП 313.1325800.2017 «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства».

³ СП 431.1325800.2019 «Дороги промышленные автомобильные. Правила проектирования и строительства в Арктической зоне».

⁴ СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования».

мерзлоты усилилось. Очевидно, что проектирование и строительство новых дорог, а также реконструкция существующих сооружений должны вестись с учетом этих климатических особенностей.

Методология исследования базируется на комплексном подходе, включающем детальный анализ действующих нормативно-технических документов, регламентирующих проектирование и строительство в криолитозоне, а также оценку климатических и инженерно-геологических условий района изысканий. Ключевым этапом работы стало численное моделирование теплофизических процессов в основании и теле земляного полотна автомобильной дороги в специализированном программном комплексе Frost 3D. Использование данного программного обеспечения позволило создать трехмерную модель взаимодействия дорожной конструкции с многолетнемерзлыми грунтами, спрогнозировать изменение их температурного режима во времени, что обеспечило научную обоснованность принимаемых проектных решений и повышение надежности дорожной конструкции в условиях вечной мерзлоты.

Основная часть

Опыт строительства дорожного полотна на заторфованных грунтах Ямала показывает, что срок службы дорог значительно меньше нормативного, что влечет за собой увеличение затрат на ремонт и содержание дорог. Рассмотрим основные факторы, которые влияют на сложившуюся ситуацию.

Инженерно-геологические условия являются одним из важнейших аспектов при проектировании. Выделим следующие характерные особенности на примере г. Салехарда. Водовмещающие породы представлены суглинками, супесями, песками, глинами, торфом, в талом состоянии глинистые грунты зачастую имеют текучепластичную консистенцию. Район расположения города относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых грунтов — массивы криогенной толщи занимают от 50 до 95 % площади, мощностью от 50 до 100 м, сливающегося и несливающегося типа [5]. Промерзание грунтов в пределах города начинается в конце сентября и достигает своего максимума в конце марта. Наибольшая скорость промерзания (до 1 м/месяц) фиксируется в ноябре — декабре. Интенсивность промерзания неодинакова и в значительной степени зависит от режима накопления и высоты снега. Грунты, залегающие в слое сезонного оттаивания и промерзания, подвержены процессам пучения. Для этой зоны характерны сквозные талики в днищах речных долин, чему способствует гидрографическая обстановка Салехарда. Таким образом, инженерно-геологические условия Салехарда характеризуются сложной и неоднородной криогенной обстановкой. Наличие островного распространения ММГ мощностью до 100 м в сочетании с глинистыми и заторфованными грунтами создают высокие риски неравномерных деформаций оснований. Дополнительным усложняющим фактором выступает наличие сквозных таликов под речными долинами, что требует при проектировании особого учета изменчивости грунтовых условий и режима теплового взаимодействия сооружений с основанием.

Климатические условия рассматриваемого региона проанализированы на основе данных метеорологической станции Салехард за период с 2006 по 2025 год (рис. 2). Пилообразный график среднегодовых температур, цифра 1, показывает характерные скачки от «холодной зимы» $-7,6^{\circ}\text{C}$ в 2006 к «теплой зиме» $-3,5^{\circ}\text{C}$ в 2007, разница $4,2^{\circ}\text{C}$, максимальный перепад в $4,4^{\circ}\text{C}$ по соседним годам пришелся на «теплый» $-1,1^{\circ}\text{C}$ в 2020 и «холодный» $-5,5^{\circ}\text{C}$ в 2021 годах. По большинству соседних среднегодовых температур колебания составляют в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$, однако «пилообразность» дают двух-трехлетнее понижение к «холодному году» с последующим двух-трехлетним повышением к «теплому», далее следующий цикл с понижением температур в течение двух-трех лет либо годовым скачком. Общую динамику

среднегодовых температур за рассматриваемый период, характеризует линия тренда, цифра 2, демонстрирующая устойчивый рост температурных показателей. Как можно заметить, разница среднегодовых температур за рассматриваемый период (всего 19 лет) в соответствии с линией тренда составляет 2,8°C.

Согласно СНиП 23-01-99 (актуализация 2006 г.)⁵, нормативная температура для Салехарда составляла -7°C. Однако, в период его действия с 2006 по 2012 год фактические температуры в основном превышали это значение, максимум в 2007 году, разница составила 3,5°C, лишь в 2006 и 2009 годах наблюдалось снижение ниже нормы на 0,6°C и 0,1°C соответственно. Средняя температура (по линии тренда) в этот период сместилась с -5,7°C до -4,8°C, на 0,9°C, превышая нормативное значение в 2006 году на 1,3°C, а в 2012 уже на 2,2°C.

В 2012 вступает в силу СП 131.13330.2012⁶, действует по 2020 год, где норматив был повышен на 0,8°C и составил -6,2°C. Несмотря на это, ни одна из фактических среднегодовых температур за указанный период не достигла данного значения. Средняя температура (по линии тренда) в этот период сместилась с -4,8°C до -3,5°C, на 1,3°C, разница с нормативным значением составляет на 2012 год 1,4°C, на конец периода действия в 2020 году на 2,7°C.

Согласно СП 131.13330.2020⁷, действует по 2025 год, нормативное значение снова повышается, в этот раз на 0,3°C и составляет -5,9°C. Средняя температура (по линии тренда) с 2020 по 2024 смещается с -3,5°C до -2,9°C, на 0,6°C, разница с нормативным значением составляет на начало периода 2,4°C, а на конец 3°C.

В действующей редакции СП 131.13330.2025⁸ норматив был повышен на 0,4°C и составляет -5,5°C. Проследим хронологию актуализации основного нормативного документа, СП 131. В 1955 году выходит СНиП II-A.6-55⁹, через 7 лет в 1962 году актуализируется, далее один раз в 10 лет в 1972 и 1982 годах, следует «большой» перерыв в 17 лет и переименование в СНиП 23-01-99. Затем периоды актуализации сокращаются: 4 года в 2003, 3 года в 2006, 6 лет в 2012 и переименование в СП 131, 8 лет в 2020 и, наконец, 5 лет в 2025 году. При этом мы наблюдаем картину постоянного опережающего тренда фактических среднегодовых температур над нормативными значениями. Таким образом, за исследуемый период фиксируем четыре изменения (актуализации) нормативных значений среднегодовых температур, повышение составило 1,5°C. По линии тренда, как выше отмечалось, повышение температур составляет 2,8°C. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, даже более частые актуализации СП 131 остаются недостаточными, поскольку климатические изменения опережают нормативные корректировки. Следует отдельно отметить, что в рассмотренном временном периоде при проектировании объектов в г. Салехард при геотехнических расчетах закладывались значения температур, которые ниже фактических, что при проектировании фундаментов по принципу I является негативным фактором.

С учетом специфики климатических и геокриологических условий региона, проектирование автомобильных дорог в ЯНАО регламентируется комплексом нормативных документов. В частности, СП 313.1325800¹⁰ введен впервые в 2017 году и устанавливает требования к проектированию, строительству, реконструкции и эксплуатации автомобильных дорог в сложных инженерно-геокриологических условиях.

⁵ СНиП 23-01-99 (актуализация 2006 г.) «Строительная климатология».

⁶ СП 131.13330.2012 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

⁷ СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

⁸ СП 131.13330.2025 «СНиП 23-01-99 * Строительная климатология».

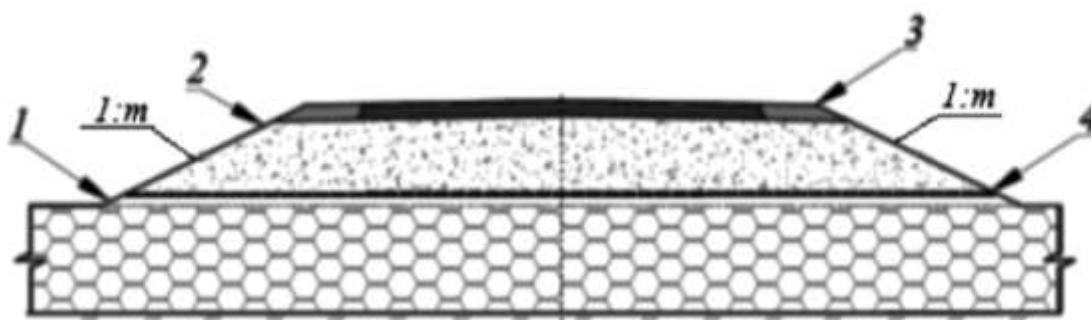
⁹ СНиП II-A.6-55 «Строительная климатология и геофизика».

¹⁰ СП 313.1325800.2017 «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства».



Рисунок 2. Среднегодовая температура воздуха в г. Салехард (разработан авторами)

Документ регламентирует принципы использования вечномёрзлых грунтов в качестве оснований (принципы I и II), методы обеспечения устойчивости земляного полотна (охлаждение грунтов, применение термостабилизаторов, использование теплоизоляционных слоев), а также требования к организации поверхностного стока и защите дорог от опасных криогенных процессов (термокарст, морозное пучение, наледеобразование). Основной научно-технической задачей свода правил является обеспечение надежности и долговечности дорожных конструкций при сохранении или прогнозируемом изменении мерзлотно-грунтовых условий в течение всего срока службы объекта. В ходе анализа СП 313.1325800 были рассмотрены различные конструкции автомобильных дорог на торфяных грунтах (рис. 3). Было установлено, что данные своды правил регламентируют преимущественно принципы использования грунтов в насыпях с учетом сохранения мерзлого состояния основания (принцип I) или допуская его оттаивание (принцип II), где торфяные грунты рассматриваются главным образом как слабое основание, требующее выторфовывания или замены.



1 — слабый грунт; 2 — грунт тела насыпи; 3 — дорожное покрытие; 4 — тканое геополотно

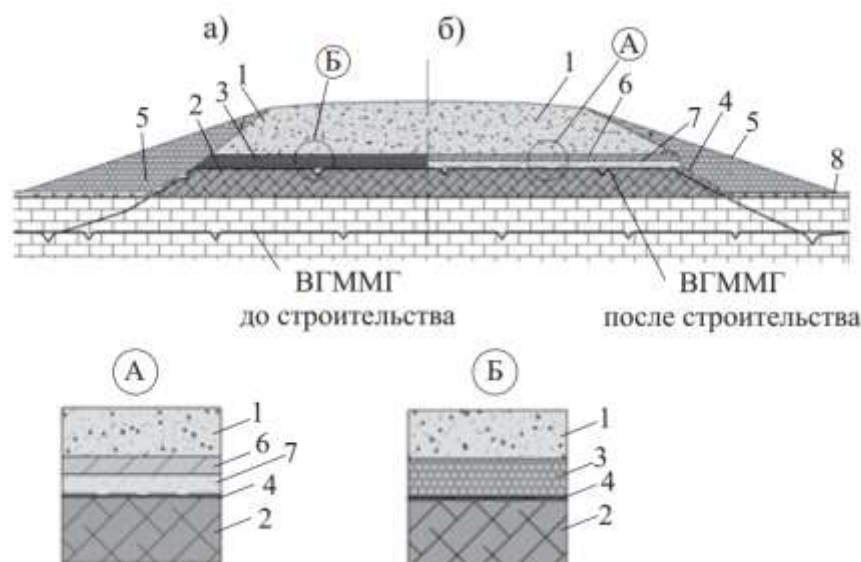
Рисунок 3. Поперечный профиль насыпи на слабых грунтах и болотах I типа с применением тканого геополотна (источник: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/16437/>.
Автор: Авторский коллектив ЗАО «ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ»)

Отдельного внимания заслуживает СП 431.1325800¹¹, который введен впервые в 2019 году и устанавливает специальные требования к созданию и эксплуатации автомобильных дорог промышленного назначения, предназначенных для обслуживания месторождений

¹¹ СП 431.1325800.2019 «Дороги промышленные автомобильные. Правила проектирования и строительства в Арктической зоне».

и производственных объектов в экстремальных условиях Крайнего Севера. Документ регламентирует принципы проектирования дорожных одежд и земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением сезонно-действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных слоев из пенополистирола. Свод правил определяет особенности трассирования дорог с учетом снегопереноса и ветрового режима, требования к обеспечению транспортной доступности в период распутицы, а также специфику организации строительных работ при низких температурах, включая зимнее бетонирование и уплотнение мерзлых грунтов. Основной целью документа является обеспечение надежности и безопасности промышленных транспортных коммуникаций в условиях арктического климата при минимизации техногенного воздействия на хрупкую природную среду высоких широт. Нормативным документом СП 431.1325800 рассматривается конструкция земляного полотна с теплоизолятором основания и откосных частей насыпи.

При анализе ОДМ-218-2-094-2018 «Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов»¹² выделим другие конструкции, базирующиеся на современных методах инженерной подготовки оснований. В отличие от СП, данный отраслевой документ делает акцент на возможности использования торфа в теле насыпи (например, в составе комбинированных конструкций с армирующими геосинтетическими материалами) и детально рассматривает методы осушения и консолидации торфяных залежей без их полной выемки. Конструкция земляного полотна по первому принципу проектирования с использованием глинистых грунтов в нижней части насыпи (с сохранением их в мерзлом состоянии) представлена на рисунке 4.



1 — песчаный грунт; 2 — мерзло-комковатый грунт; 3 — торф уплотненный; 4 — полубойма из гидроизолирующего материала; 5 — теплоизолирующий слой из торфа; 6 — пенопласт; 7 — песчаный выравнивающий слой; 8 — мохорастительный покров)

Рисунок 4. Насыпь из мерзло-комковатого грунта с теплоизолирующими слоями (а — теплоизолирующий слой из торфа; б — то же, из пенопласта (источник: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/218odm-2182094-2018.pdf>. Автор: Авторский коллектив ООО «Центр стратегических автодорожных исследований»)

¹² ОДМ-218-2-094-2018 «Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов».

Практика строительства свидетельствует о том, что большая часть автомобильных и железных дорог, возведенных в северных регионах, построена по I принципу. Основная задача при таком варианте — это сохранение расчетного температурного режима мерзлых грунтов оснований в течение строительства и эксплуатации. Для этого необходимо охлаждение или замораживание грунтовых массивов оснований дорог. В настоящее время это достигается несколькими способами:

Самый распространённый способ — высокая, проветриваемая насыпь [6]. В её теле создают слой из крупного щебня или валунов. Зимой холодный воздух проникает в поры и способствует отводу тепла из основания, создавая естественную вентиляцию насыпи. Летом процесс почти замирает, и слой работает как теплоизоляция.

Охлаждающая каменная наброска на откосах дорог на мерзлоте — это технология термостабилизации грунтов, где откосы насыпей покрывают крупным камнем для усиления естественного охлаждения в зимний период, что предотвращает оттаивание вечной мерзлоты и деформации пути, эффективно работая на БАМе и других северных ж/д, благодаря циркуляции воздуха между камнями и защите от солнечной радиации [7].

Конструкции консольных солнцезащитных навесов применены в Китае на Цинхай-Тибетской железной дороге [8]. Они исключают прогрев земляного полотна прямой солнечной радиацией, теплыми летними осадками, что уменьшает растепление грунтов. По данным натурных наблюдений навес на откосах насыпи может понижать температуру грунтов на 3–5 градусов и обеспечивать стабильность земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Этот способ позволяет предохранять оттаивание на протяжении всего периода эксплуатации дороги. Результаты исследований показали, что солнцезащитный навес способен стать основным противодеформационным устройством для земляного полотна на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов [9].

Также существуют и другие примеры охлаждения насыпей, например, поперечные вентилируемые трубы с регулируемыми заслонками [9]. Вентилируемые трубы с регулируемыми заслонками используются для активного охлаждения насыпей (ж/д насыпей или грунтов) путем пропускания холодного воздуха. Система включает пластиковые или железобетонные трубы, проложенные в теле насыпи, с автоматическими или ручными заслонками для управления потоком воздуха, предотвращая перегрев и разрушение.

Экструдированный пенополистирол может использоваться при теплоизоляции автомобильных дорог, железнодорожных путей, а также при ремонте и реконструкции городских улиц [10]. В ходе работ материал может применяться в качестве теплоизоляции или как альтернатива повышенных насыпей на территории распространения вечной мерзлоты. Конструкция и технология производства дорожных одежд с применением экструдированного пенополистирола варьируются, в зависимости от условий строительства и назначения дороги.

Если земляное полотно состоит из опасно пучинистых и текуче-пластичных грунтов (глинистые или суглинистые), то важно сохранить их в мерзлом состоянии, так как в этом состоянии они представляют собой надежное основание. А для этого эффективной технологией является устройство сезонно охлаждающих устройств [11]. Термостабилизаторы представляют собой герметичные трубы, заполненные хладагентом, которые устанавливаются вдоль насыпей автодорог, железнодорожных путей, вокруг свай и опор. Применение СОУ позволяет поддерживать отрицательную температуру грунтов, что гарантирует стабильность дорожного полотна [12]. В статьях Т. В. Шепитько рассматриваются проблемы строительства на многолетнемерзлых грунтах в Арктической зоне РФ [13; 14]. На примере участка железнодорожной линии «Северный широтный ход» (Салехард-Надым) авторы анализируют эффективность применения сезонно-действующих охлаждающих устройств.

С помощью программного комплекса Frost 3D было выполнено моделирование теплофизических процессов. Результаты показали, что использование СОУ в сочетании с теплоизоляцией позволяет уменьшить размеры талых зон в теле насыпи, сохранить грунты в мерзлом состоянии и повысить устойчивость сооружения.

Отдельного внимания заслуживают работы Якова Борисовича Горелика с соавторами. Результаты исследования эффективности применения одиночных оребренных и неоребранных термостабилизаторов, а также использования их в системе, показывают удовлетворительные результаты [15].

Причем отмечается, что система неоребранных термостабилизаторов позволяет достичь необходимых параметров температурного режима — твердомерзлого состояния уже после первого года применения для ряда незасоленных грунтов. В работе детально продемонстрированы результаты расчетов с применением современных вычислительных методов, что убедительно показывает перспективность использования систем вертикальных термостабилизаторов, при этом технико-экономические расчеты должны обосновывать необходимость применения оребренных термостабилизаторов. Применение одиночных термостабилизаторов, по мнению авторов, недостаточно для круглогодичного поддержания грунта в твердомерзлом состоянии, что обуславливается низким коэффициентом теплопроводности грунта. Техническая и научная новизна защищается оригинальным решением [16], позволяющим совместную работу неоребранных термостабилизатора и полый трубчатый свай.

Для автомобильных дорог несомненный интерес представляют горизонтальные естественно действующие трубчатые системы (ГЕТ). В состав системы ГЕТ входят два основных элемента: горизонтальные охлаждающие трубы, которые располагаются в грунте основания (предназначены для циркуляции хладагента и последующего замораживания грунта) и конденсаторный блок, который располагается на поверхности грунта (в конденсаторном блоке за счет естественной конвекции и силы тяжести происходит конденсация паров хладагента и дальнейшая перекачка его по системе).

В основе принципа действия заложено то, что в охлаждающих трубах осуществляется перенос тепла грунта к хладагенту. При этом хладагент переходит из жидкой в парообразную фазу и перемещается в сторону конденсаторного блока, где конденсируется в жидкую фазу, отдавая тепло через оребрение в атмосферу. Охлажденный и сконденсированный хладагент вновь стекает в испарительную систему и повторяет цикл движения.

Системы ГЕТ обладают следующим преимуществом по сравнению с выше рассмотренными системами: возможность осуществлять температурную стабилизацию грунтов в самых недоступных местах или тех местах, где размещение надземных элементов нежелательно или невозможно, так как все охлаждающие элементы расположены ниже поверхности грунта, а конденсаторный блок может быть вынесен на удаление от сооружения до 70 м (рис. 5). Например, компания Фундаментстройаркос успешно применила системы ГЕТ в строительстве резервуарного парка на Бованенковском, Ванкорском, Харасавейском, Уренгойском, Юбилейном, Ямбургском, Заполярном и Самбургском месторождениях [17].

Также система ГЕТ была успешно применена в 2019 году для спасения двух многоэтажных домов в г. Норильске и в 2021 году в г. Салехарде системы были заранее запроектированы и применены под гражданским объектом — новой станцией скорой помощи.

Эффективность горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы рассматривается в научной статье [18], получены расчеты температурных полей в основании здания, аргументирована эффективность применения принудительного охлаждения основания в летний период, что особенно актуально с учетом температурных трендов.

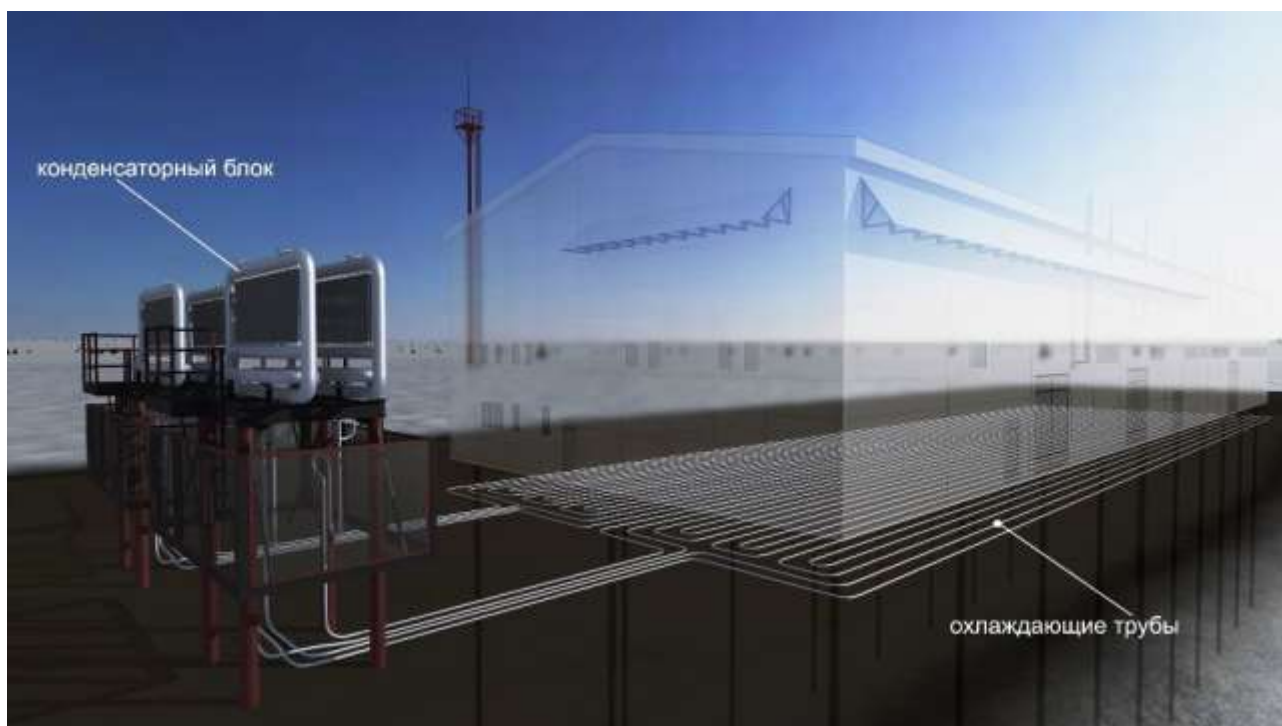


Рисунок 5. Система ГЕТ (источник: <https://www.npo-fsa.ru/gorizontalnaya-estestvennodeystvuyushchaya-trubchataya-sistema-get>. Автор: Г.М. Долгих)

Целью расчетов являлась оценка влияния системы ГЕТ на температурный режим грунтов основания в сравнении с классическим методом теплоизоляции. Исходные данные (геологический разрез, теплофизические характеристики грунтов), были приняты в соответствии с результатами инженерных изысканий для разработки проектной документации на автомобильную дорогу Сургут-Салехард. Типовая конструкция дороги взята из нормативного документа (рис. 6).

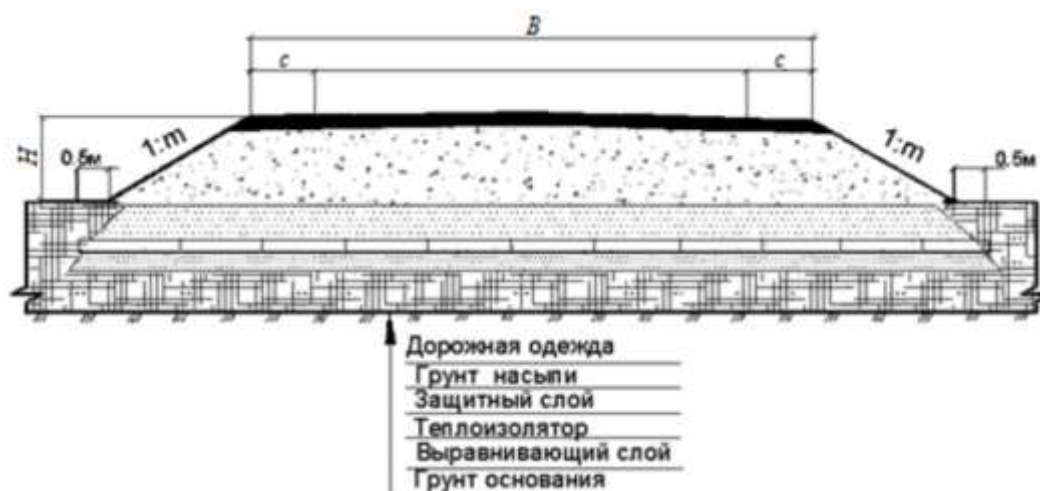


Рисунок 6. Поперечный профиль насыпи (источник: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18466/>. Автор: Авторский коллектив ЗАО «ПРОМТРАНСИИПРОЕКТ»)

Для расчёта теплофизических свойств и последующего моделирования температурного режима грунтов использовались данные, полученные по результатам инженерно-геологических изысканий (табл. 1).

Таблица 1

**Инженерно-геологические элементы и теплофизические свойства
грунтов, используемые при моделировании геокриологического прогноза**

Наименование	Температура грунта $T_0, ^\circ\text{C}$	Теплопроводность		Удельная теплоёмкость		Влажность W_{tot} , д.е.	Плотность сухого грунта ρ_d , кг/м ³	Температура начала замерзания $T_{\text{bf}}, ^\circ\text{C}$	Глубина слоя, м
		таялая λ_{th} , Вт/м ³ *К	мерзлая λ_{f} , Вт/м ³ *К	таялая C_{th} , М*Дж/м ³ *К	мерзлая C_{f} , М*Дж/м ³ *К				
Песок средний твердомерзлый	-1,2	1,45	1,51	2,04	1,89	0,07	1,88	-0,32	2,9
Торф мерзлый сильноразложившийся	-1	0,81	1,33	3,78	2,4	4,66	0,18	-0,35	3,2
Песок пылеватый твердомерзлый	-1,2	1,57	1,86	2,48	1,89	0,23	1,48	-0,32	3,4
Песок мелкий твердомерзлый	-1,2	2,15	2,37	2,31	2,14	0,21	1,57	-0,32	15,5

Разработано авторами

Значения данных о температуре взяты за 2024 год и представлены в таблице 2. Расчётный период теплофизических свойств составил 15 лет (с 15.01.2024 г. по 15.01.2039 г.), который показал изменения температурных полей.

Таблица 2

Климатические параметры

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, $^\circ\text{C}$	-23,8	-17,1	-17,3	-10,5	-2,3	8,9	15,8	13,1	9,8	-0,6	-9,1	-14,4
Скорость ветра, м/с	0,5	1	2	3,1	3,5	2,9	2,7	3	2,6	2,5	2,7	2,1
Высота снежного покрова, м	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0	0	0	0	0,18	0,25	0,38

Разработано авторами

В нормативном документе была предусмотрена конструкция дорожной одежды с устройством теплоизоляции слоя. В ходе моделирования установлено, что применение теплоизоляции, заложенной в типовой конструкции, не позволяет полностью исключить риски деградации мерзлоты. Теплофизические модели, полученные при моделировании в программном комплексе «Frost. Термо», представлены на рисунке 7. Сравнительный анализ серии геокриологических моделей с пятилетним шагом прогноза выявил устойчивую тенденцию к деградации мерзлотных условий в теле насыпи и её основании. Если в начальный период эксплуатации (15.10.2024) температура под насыпью составляла $+2^\circ\text{C}$ у поверхности и $+1^\circ\text{C}$ в глубине, то к 15.10.2039 эти показатели возросли до $+5^\circ\text{C}$ и $+4^\circ\text{C}$ соответственно, что свидетельствует о значительном растеплении грунта. Ключевым индикатором изменений выступает динамика границы многолетнемерзлой толщи (ММГ): за 15 лет её уровень опустился на 2 метра, что закономерно привело к расширению области талых грунтов. Как показано на распределении температурных полей, изначально локальная талая зона в теле насыпи постепенно увеличивается в объёме, распространяясь в центральной части сооружения и в зоне откосов, где фиксируются устойчивые положительные температуры (до $+5^\circ\text{C}$ к концу рассматриваемого периода).

Данный факт свидетельствует о значительном растеплении многолетнемерзлого основания. Такое повышение температуры влечет за собой потерю несущей способности грунтов при оттаивании, что напрямую указывает на потерю устойчивости дорожного полотна и создает угрозу его долговечности и безопасности эксплуатации.

В качестве альтернативного решения была рассмотрена установка системы ГЕТ (рис. 8). При проектировании и монтаже системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ расстояние между трубами испарителя, как правило, составляет 0,5 м [19]. Система ГЕТ заглублена относительно верха насыпи на 1,5 метра.

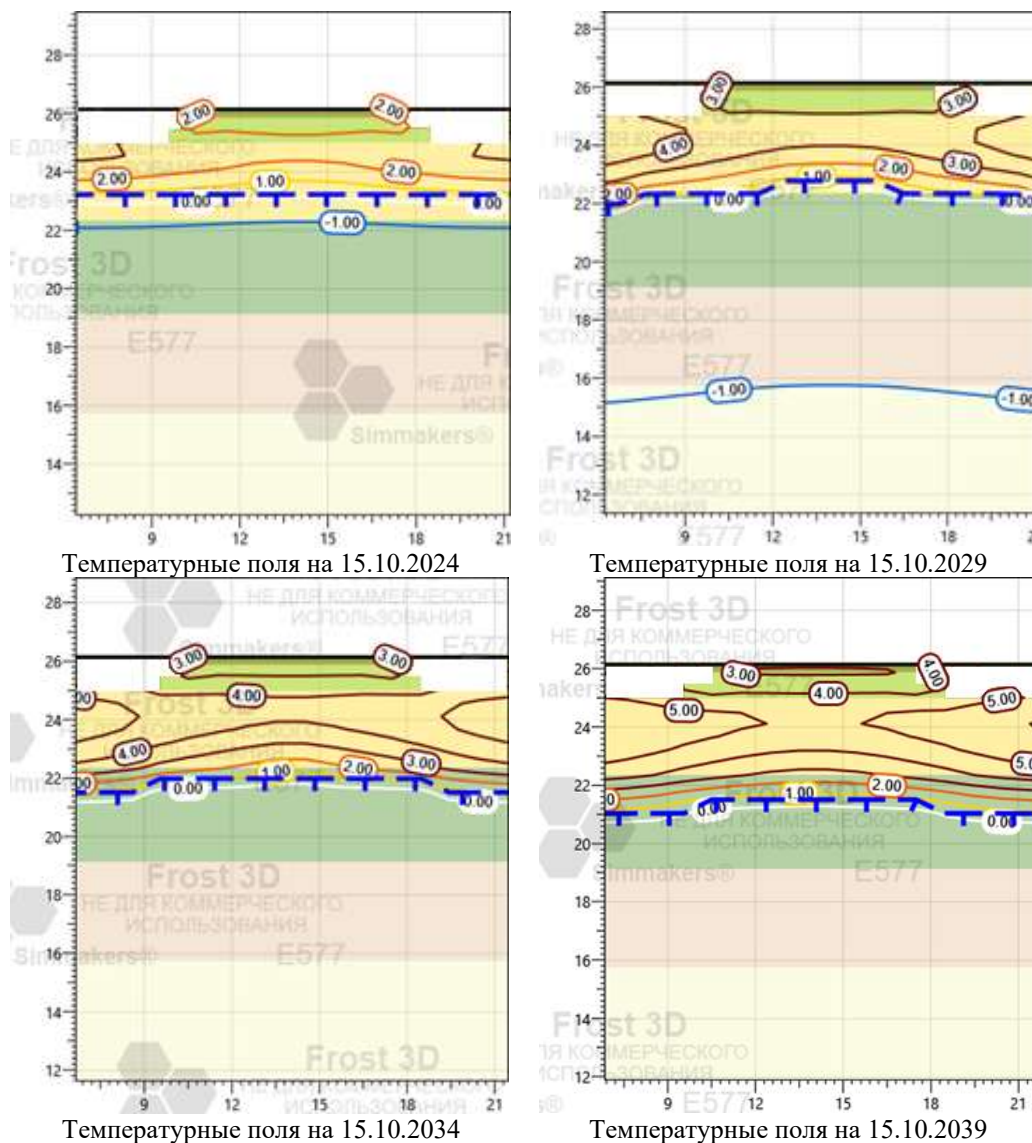


Рисунок 7. Температурные поля при моделировании дорожной конструкции с теплоизоляцией (разработано авторами)

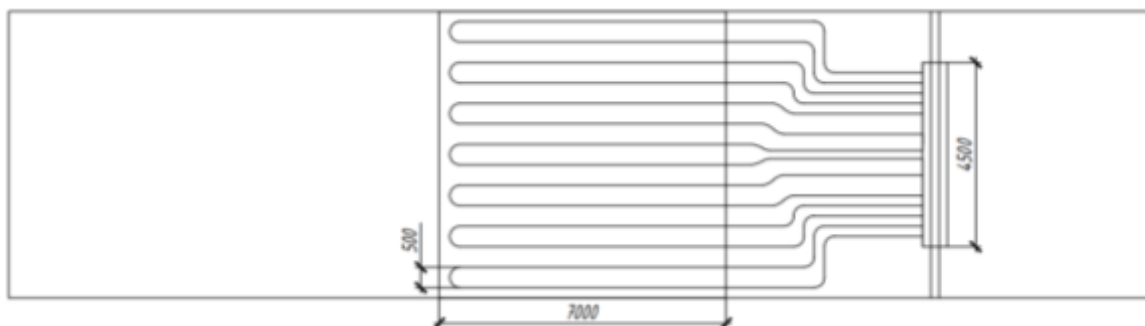


Рисунок 8. Термостабилизирующая система ГЕТ (разработано авторами)

Применение в конструктивном решении термостабилизации грунта показывает кардинальное улучшение ситуации. Анализ результатов расчета демонстрирует, что применение системы ГЕТ позволило добиться устойчивого отрицательного температурного режима грунтов. Теплофизические модели, полученные при моделировании, представлены на рисунке 9. Сравнительный анализ моделей через каждые 5 лет выявил направленную трансформацию температурных полей основания насыпного сооружения.

На начальный период (15.10.2024) в теле насыпи фиксировалась талая зона с положительными температурами: $+2^{\circ}\text{C}$ под центром насыпи и $+1^{\circ}\text{C}$ в зоне откосов. Уже через 5 лет эксплуатации (15.10.2029) торф в основании насыпи перешёл в твёрдомерзлое состояние, что стало первым признаком устойчивого промораживания. К 15.10.2039 произошло полное промораживание верхней части насыпи, приведшее к исчезновению талой зоны.

Температура под центром насыпи снизилась до -3°C , а на откосах — до -2°C , что однозначно свидетельствует о переходе грунтов в мёрзлое состояние. Характерной особенностью является подъём границы многолетнемёрзлой толщи на 1,5 м за 15 лет, вследствие чего талая зона не только сократилась, но и была полностью замещена мёрзлым массивом. Кроме того, под центральной частью насыпи сформировалось устойчивое мерзлотное ядро, которое выступает в роли термического барьера. Полученные распределения температурных полей наглядно демонстрируют замедление процессов сезонного оттаивания и общее нарастание криогенной стабильности сооружения.

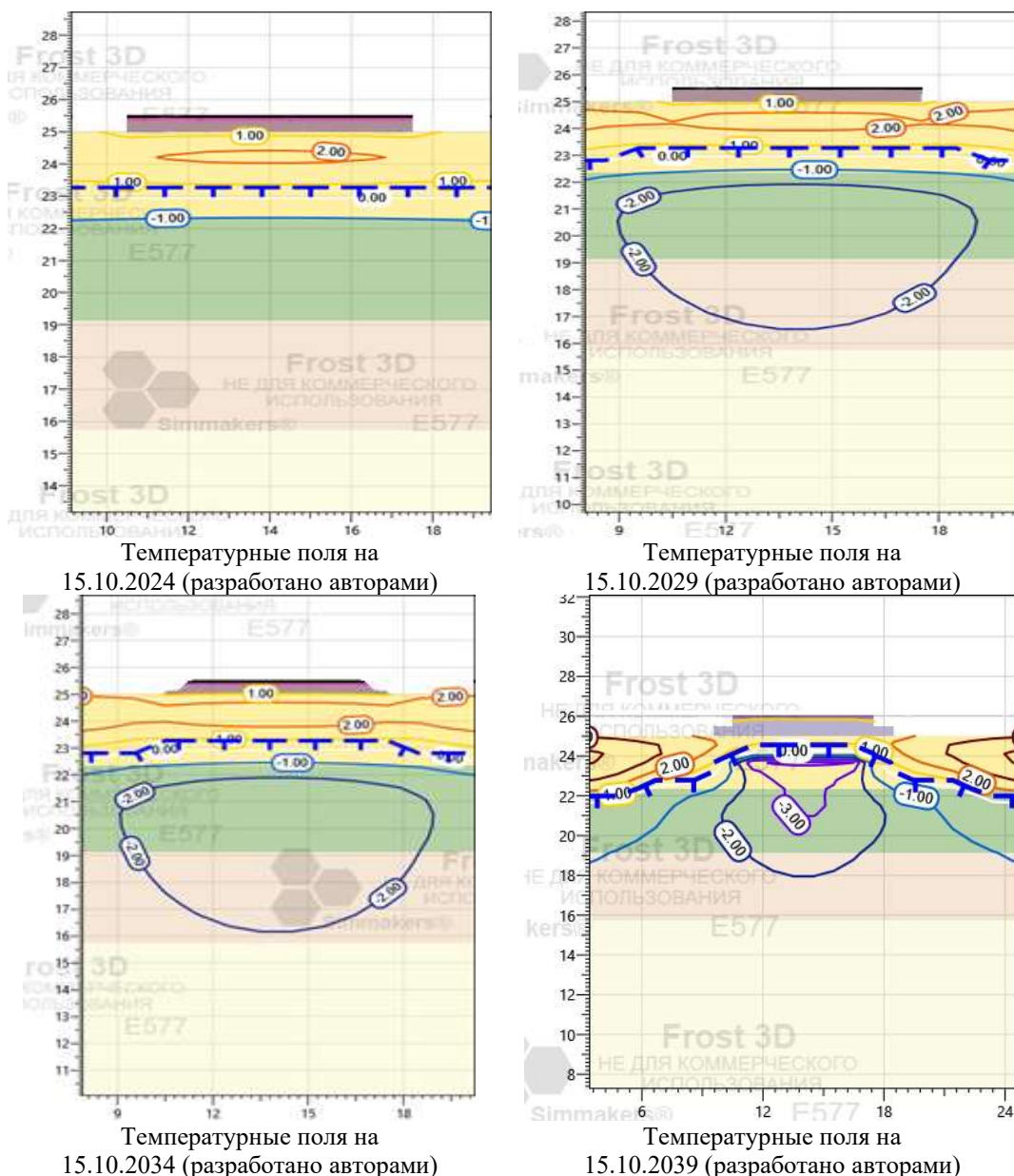


Рисунок 9. Температурные поля при моделировании дорожной конструкции с системой ГЕТ (разработано авторами)

В данном случае многолетнемерзлое основание сохраняет твердомерзлое состояние на протяжении всего расчетного периода, что исключает риск растепления и, как следствие, предотвращает развитие неравномерных деформаций (просадок) дорожного полотна.

С практической точки зрения, систему ГЕТ целесообразно применять на локальных заторфованных участках, под мостовыми переходами, в местах с очень льдистыми, просадочными грунтами, где её высокая цена будет оправдана предотвращением критических просадок и необходимостью обеспечить долговечность.

Заключение

Важным вектором развития Российской Федерации является освоение Арктической зоны, что подтверждается рядом стратегических документов государственного планирования. Арктическая зона занимает около 30 % территории России, богата ценными полезными ископаемыми и биоресурсами. Для успешного достижения поставленных целей необходима развитая сеть дорог различного назначения.

Инженерно-геологические условия Салехарда сложны из-за островной мерзлоты мощностью до 100 м, неоднородных грунтов (глины, торфы, пески) и наличия сквозных таликов под речными долинами. Это создает риски неравномерных деформаций оснований.

Среднегодовые температуры на протяжении 19 лет превышали значения нормативных по СП. Повышение температуры на 2,8°C за данный период приводит к увеличению глубины протаивания многолетнемерзлых пород. Это вызывает развитие инженерно-геокриологических процессов, что в свою очередь приводит к деформациям автомобильных дорог. За последние двадцать лет наблюдается устойчивый рост числа аварийных ситуаций в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Актуализации СП фиксируют повышение нормативного значения на 1,5°C за 19 лет, в то время как климатические изменения опережают нормативные корректировки.

Проектирование дорог в условиях вечной мерзлоты не теряет своей актуальности. Строить в криолитозоне технически очень сложно. С одной стороны, мерзлые грунты плохо поддаются разработке, а с другой, на фоне потепления, деградируют, и применяемые ранее решения теперь могут оказаться источником больших проблем.

Технологии повышения устойчивости оснований в криолитозоне (высокая насыпь, каменная наброска, солнцезащитные навесы, вентилируемые трубы, теплоизоляция, сезонно-охлаждающие устройства) применяются достаточно широко. Адаптация системы ГЕТ, используемой под площадными объектами, для применения под дорожной насыпью является технически обоснованным решением. Данный подход позволяет обеспечить устойчивое состояние многолетнемерзлых грунтов на линейных объектах, что подтверждено результатами теплотехнического моделирования. За 15 лет эксплуатации граница ММГ поднялась на 1,5 м, что привело к полному замещению талой зоны мерзлым массивом. Под центральной частью насыпи сформировалось устойчивое мерзлотное ядро, выполняющее роль термического барьера. Температура под центром насыпи снизилась до -3°C, а в зоне откосов — до -2°C, при этом уже через 5 лет эксплуатации торф в основании перешёл в твердомерзлое состояние. Полученные показатели исключают риск растепления и развитие неравномерных деформаций.

Ключевыми преимуществами предложенного решения являются: отсутствие необходимости в источниках энергии, равномерное поддержание отрицательных температур по всей ширине основания, снижение рисков неравномерных деформаций дорожного полотна и увеличение межремонтных сроков эксплуатации. Несмотря на более высокие первоначальные затраты применение систем ГЕТ на сложных участках является оправданным за счет обеспечения долговечности и надежности сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашпиз Е. С. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог / Е. С. Ашпиз, Л. Н. Хрусталева // Криосфера Земли. — 2020. — Т. 24, № 5. — С. 45–50. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44190615>. — DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(45-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)). — EDN: [HSPPVX](https://www.edn.ru/HSPPVX). (дата обращения: 18.01.2026).
2. Алексеев А. Г. Проблемы строительства зданий и сооружений в Арктике / А. Г. Алексеев // Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство: сборник тезисов докладов, Москва, 11–13 апреля 2023 года. — Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2023. — С. 56–57. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54330672>. — DOI: [10.37538/2949-219X-2023-56-57](https://doi.org/10.37538/2949-219X-2023-56-57). — EDN: [DEOQUJ](https://www.edn.ru/DEOQUJ). (дата обращения: 18.01.2026).
3. Хрусталева Л. Н. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечноммерзлых грунтах / Л. Н. Хрусталева, И. В. Давыдова // Криосфера Земли. — 2007. — Т. 11, № 2. — С. 68–75. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9544154&ysclid=mls1fz5myo222001432>. — EDN: [IAWFSL](https://www.edn.ru/IAWFSL). (дата обращения: 18.01.2026).
4. Ревич Б. А. Климатические риски социального развития Ямало-Ненецкого автономного округа / Б. А. Ревич, Т. Л. Харькова // Проблемы прогнозирования. — 2023. — № 4(199). — С. 157–167. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54187572>. — DOI: [10.47711/0868-6351-199-157-167](https://doi.org/10.47711/0868-6351-199-157-167). — EDN: [ZDMOKM](https://www.edn.ru/ZDMOKM). (дата обращения: 18.01.2026).
5. Колесников Р. А. Почвы Ямало-Ненецкого автономного округа (морфология и разнообразие) / Р. А. Колесников, А. С. Печкин, Е. Н. Моргун; ГАУ ЯНАО "Научный центр изучения Арктики". — Салехард; Санкт-Петербург: [б. и.]; ГеоГраф, 2022. — 98, [1] с. — ISBN 978-5-902211-62-4.
6. Saboundjian S. Air Convection Embankment for Roadways: Field Experimental Study in Alaska / S. Saboundjian, D. Goering // Transportation Research Record. — 2003. — Т. 1821. — С. 474–6141. — URL: https://www.researchgate.net/publication/228918832_Air_Convection_Embankment_for_Roadways_Field_Experimental_Study_in_Alaska. — DOI: [10.3141/1821-03](https://doi.org/10.3141/1821-03). (дата обращения: 18.01.2026).
7. Патент № 2583107 Российская Федерация, МПК E01C 3/06 (2006.01). Охлаждающая конструкция для земляных сооружений на вечноммерзлых грунтах и способ ее возведения: № 2014151072/03; заявл. 16.12.2014; опубл. 10.05.2016 / А. А. Пиотрович, О. И. Пакушева, А. Б. Ким; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный государственный университет путей сообщения" (ДВГУПС). — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2583107C1/ru>. (дата обращения: 18.01.2026).
8. Тимошук Е. С. Проблемы строительства железной дороги в условиях вечной мерзлоты и пути их решения / Е. С. Тимошук, Ф. С. Фролов // Специальная техника и технологии транспорта. — 2022. — № 14. — С. 37–48. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49064916>. — EDN: [TIONKM](https://www.edn.ru/TIONKM). (дата обращения: 18.01.2026).

9. Чудинов С. А. К вопросу ремонта земляного полотна автомобильных дорог в зонах многолетнемерзлых грунтов / С. А. Чудинов, К. В. Ладейщиков // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XIV международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08–09 февраля 2023 года. — Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет", 2023. — С. 365–371. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50492594>. — EDN: [QQYGMS](https://elibrary.ru/item.asp?id=50492594). (дата обращения: 18.01.2026).
10. Патент № 2324032 С1 Российская Федерация, МПК E02D 17/18. Дорожная насыпь на вечноммерзлых грунтах: № 2006133640/03: заявл. 21.09.2006: опубл. 10.05.2008 / Е. С. Ашпиз, И. П. Лукин, Л. Н. Хрусталева, В. В. Шолин; заявитель Открытое акционерное общество Проектно-изыскательский институт транспортного строительства (ОАО Проекттрансстрой). — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37653648>. — EDN: [YYSGXK](https://elibrary.ru/item.asp?id=37653648). (дата обращения: 18.01.2026).
11. Кравченко Е. А. Проблемы стабилизации земляного полотна железных и автомобильных дорог в холодных регионах Китая / Е. А. Кравченко, А. Л. Исаков, Ц. Лю, С. Ли // Известия Транссиба. — 2021. — № 2(46). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-stabilizatsii-zemlyanogo-polotna-zheleznyh-i-avtomobilnyh-dorog-v-holodnyh-regionah-kitaya>. (дата обращения: 06.02.2026).
12. Алексеева О. И. Опыт применения сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) / О. И. Алексеева // Наука и техника в Якутии. — 2024. — № 2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-sezonnodeystvuyuschih-ohlazhdayuschih-ustroystv-sou>. (дата обращения: 07.02.2026).
13. Шепитько Т. В. Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи / Т. В. Шепитько, И. А. Артюшенко // Мир транспорта. — 2023. — Т. 21, № 1. — С. 14–21. — DOI: [10.30932/1992-3252-2023-1-2](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-1-2). (дата обращения: 18.01.2026).
14. Комплексные технологии строительства транспортных сооружений в Арктике / Т. В. Шепитько, С. Я. Луцкий, А. М. Черкасов [и др.] // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12, № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS425.pdf>. — DOI: [10.15862/03SATS425](https://doi.org/10.15862/03SATS425). — EDN: [SDTYGD](https://elibrary.ru/item.asp?id=41430021). (дата обращения: 06.04.2026).
15. Горелик Я. Б. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, А. Х. Хабитов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2019. — Т. 5, № 3. — С. 25–46. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41430021>. — EDN: [OICVYB](https://elibrary.ru/item.asp?id=41430021). (дата обращения: 18.01.2026).
16. Патент на полезную модель № RU 150908 U1. Устройство для термостабилизации грунтов / Я. Б. Горелик, В. П. Мельников, И. З. Фахретдинов [и др.]. — 2015. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38369313>. — EDN: [DDNHJZ](https://elibrary.ru/item.asp?id=38369313). (дата обращения: 18.01.2026).
17. Долгих Г. М. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечноммерзлых грунтов оснований зданий и сооружений / Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, Л. С. Поденко, В. Н. Феклистов // Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне... / М. Долгих; НПО "Фундаментстройаркос". — Новосибирск: Академическое издательство "Гео", 2014.

18. Горелик Я. Б. Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых оснований с применением агрегата принудительной циркуляции хладагента / Я. Б. Горелик, А. Х. Хабитов, И. В. Земеров // Криосфера Земли. — 2021. — Т. 25, № 4. — С. 36–46. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46420321>. — EDN: [KJWHAR](#). (дата обращения: 18.01.2026).
19. Ишков А. А. Определение оптимального шага укладки между трубами испарителя и количества конденсаторных блоков системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ / А. А. Ишков, Г. В. Аникин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2020. — Т. 6, № 1(21). — С. 100–117. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42736299>. — DOI: [10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117](https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117). — EDN: [CMQQR](#)Y. (дата обращения: 18.01.2026).

Makovskaya Mariya Mikhailovna

Tyumen State University, Tyumen, Russia

E-mail: mashulya-makovskaya@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1566-160X>

Vorontsov Vyacheslav Viktorovich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: variog08@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546740

Assessment of the influence of a horizontal naturally acting tubular system on the temperature regime of the highway foundation in the cryolithozone

Abstract. The special importance of the development of the northern regions for Russia is determined by the concentration of strategic resources in these territories, which form the economic foundation of the state. The main problem of developing such areas with characteristic climatic features is the underdevelopment of infrastructure and transport links. Therefore, the development and implementation of technologies for the construction of sustainable road surfaces in the cryolithozone is a fundamental engineering and technical problem that requires urgent solutions. The article is devoted to the problems of designing and building highways in the cryolithozone using the example of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. It is noted that permafrost soils occupy about 65 % of Russia's territory, and the development of the Arctic zone is a priority area of state policy. The authors focus on permafrost degradation and changes in soil properties. Based on the climatic data, it is shown that the actual warming outstrips the adjustments of regulatory documents, which leads to an underestimation of temperatures in calculations. In this paper, numerical simulation of the temperature regime of a highway in the Frost 3D software package is performed. Two design options are considered: thermal insulation of the embankment and the use of a horizontal naturally acting tubular system (HET). Using the example of a highway section, a comparative analysis of the effectiveness of thermal stabilization of the foundation soils was carried out. The results obtained make it possible to substantiate optimal engineering solutions to ensure the long-term stability of road structures in a changing climate, as well as to form scientific and practical recommendations for updating existing building codes, taking into account projected temperature shifts.

Keywords: Arctic; permafrost; roadbed; highway; climate change; GET system; numerical modeling