

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

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS324 (<https://doi.org/10.15862/07SATS324>)

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)

УДК 624.139.6

Анализ эффективности взаимодействия сезонно-действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных слоев на многолетнемерзлые грунты основания транспортных сооружений

Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Зайцев А.А., Ноздрачёв А.С.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Артюшенко Игорь Александрович, e-mail: tywka351@mail.ru

Аннотация. Стабилизация многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна, сооружаемого по I принципу проектирования (с сохранением многолетнемерзлых грунтов в мерзлом состоянии), требует грамотной оценки влияния сооружаемого объекта на теплофизические показатели грунтов основания с оценкой их изменения.

Целью настоящего исследования является анализ эффективности использования сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ), взаимодействующих с теплоизоляционным материалом, на грунты основания насыпи на конкретном объекте «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка-Аям Дальневосточной железной дороги».

Авторами обосновывается применение данного конструктивно-технологического решения на Дальневосточной железной дороге, показана возникающая во времени деградация многолетнемерзлых грунтов основания. Подчеркивается, что для обоснованного выбора рациональных конструктивно-технологических решений необходимо проанализировать и учесть при проектировании инженерно-геологические и природно-климатические факторы района строительства. В соответствии с этим для участков с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) показаны

технологические этапы устройства сезонно-действующих охлаждающих устройств, рассчитано количество используемого теплоизоляционного материала и конденсаторов, обеспечивающих стабильное состояние многолетнемерзлых грунтов, смоделировано с использованием программного продукта Frost 3D влияние сезонно-действующих охлаждающих устройств на многолетнемерзлые грунты основания.

Статья подготовлена на основе исследований, выполненных в рамках гранта, предоставленного Министерством образования и науки в форме субсидии из федерального бюджета на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, тема проекта «Анализ и разработка теоретических основ с исследованием и разработкой конструктивно-технологических решений по обеспечению эксплуатационной надёжности объектов транспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов», соглашение № 075-15-2024-559 от 24.04.2024.

Ключевые слова: транспорт; многолетнемерзлые грунты; криолитозона; сезонно-действующие охлаждающие устройства; земляное полотно

Interaction effectiveness analysis between seasonally acting cooling devices and heat-insulating layers on permafrost soils of the base of transport structures

Taisia V. Shepitko, Igor A. Artyushenko, Andrey A. Zaytsev, Alexey S. Nozdrachev

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Igor A. Artyushenko, e-mail: tywka351@mail.ru

Abstract. Permafrost soils stabilisation of an earth bed base constructed according to the I principle of design (with preservation of permafrost soils in the frozen state) requires a competent assessment of the constructed object influence on the earth foundation thermophysical parameters with an estimation of their change.

The purpose of the present study is to analyse the effectiveness use of seasonally acting cooling devices (SACD), interacting with thermal insulation material, on the earth foundation of the embankment at the specific object «Kholodnikan Junction on the Zolotinka-Ayam crossing of the Far Eastern Railway».

The authors justify this design and technological solution application on the Far Eastern railway, the degradation of permafrost earth foundation soils occurring in time is shown. It is emphasised that for a reasonable choice of rational design and technological solutions it is necessary to analyse and take into account engineering-geological and natural-climatic factors of the construction area. Accordingly, the technological stages of seasonally active

cooling devices are shown for the sites with permafrost soils, the amount of heat-insulating material and condensers used to ensure the stable state of permafrost soils is calculated, the influence of seasonally active cooling devices on permafrost earth foundation soils is modelled using Frost 3D software.

The article has been prepared on the basis of the research carried out within the framework of the grant provided by the Ministry of Education and Science in the form of a subsidy from the federal budget for carrying out major scientific projects on priority directions of scientific and technological development, project topic «Analysis and development of theoretical bases with research and development of design and technological solutions to ensure the operational reliability of transport infrastructure facilities in the conditions of the spread of permafrost soils», Agreement No. 075-15-2024.

Keywords: transport; permafrost soils; cryolithozone; seasonally acting cooling devices; earth foundation

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В рамках выполнения поручений Президента Российской Федерации Правительством 20 апреля 2024 года утвержден паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (третий этап)».¹ Целью этого инвестиционного проекта, как и на предыдущих этапах, является обеспечение развития провозной и пропускной способностей железнодорожных магистралей Восточного полигона до 2035 года, в частности, достижение провозной способности по итогам 2030 года — 210 млн тонн, по итогам 2032 года — 270 млн тонн в соответствии с графиком достижения целевых показателей инвестиционного проекта. Реализация проекта будет способствовать достижению национальных целей развития России [1].

Проект предусматривает внедрение современных технологий и инновационных решений, направленных на повышение эффективности и безопасности железнодорожных перевозок. Это включает в себя модернизацию инфраструктуры, обновление подвижного состава и внедрение автоматизированных систем управления движением. Ожидается, что данные меры позволят значительно сократить время доставки грузов и повысить конкурентоспособность российских железных дорог на международном уровне.

Кроме того, проект будет способствовать социально-экономическому развитию регионов, через которые проходят магистрали, создавая новые рабочие места и улучшая транспортную доступность. В результате, модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей станет важным шагом на пути к устойчивому развитию транспортной системы России и укреплению её позиций на мировом рынке транспортных услуг.

В рамках предыдущего этапа плана развития Восточного полигона² компанией «Бамстроймеханизация», входящей в Группу компаний 1 520, на линии Тынды — Нерюнгри Дальневосточной магистрали построен рассматриваемый в настоящей статье новый разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям.

¹ Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (третий этап)». Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 апреля 2024 г. № 981-р. — Москва, 2024.

² Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р. — Москва, 2019. — 116 с.

Этот новый типовой раздельный пункт продольного типа может одновременно принимать три длинносоставных поезда. Он открыл новые возможности для пропуска угольных маршрутов из Южной Якутии, связав ее крупнейшие угольные месторождения со станцией Тында.

Благодаря увеличенной пропускной способности, значительно сократилось время доставки угля, что способствует повышению эффективности транспортировки и снижению затрат. Новый пункт также обеспечивает более гибкое управление движением поездов, что особенно важно в условиях сурового климата и сложного рельефа региона. В перспективе, это может способствовать дальнейшему развитию инфраструктуры и экономическому росту Южной Якутии.

По информации пресс-центра «Бамстроймеханизации»³, на разъезде Холодникан устроена выемка, отсыпана автомобильная дорога вдоль пути, проведена реконструкция двух железобетонных мостов и водопропускной трубы, возведены водоотводные, нагорные канавы, улавливающие траншеи, кюветы, установлены 63 металлические опоры ВЛ, устройства связи, 15 светофоров. В горловинах разъезда построены два пункта обогрева для монтеров пути, помещение для табельной дистанции пути ПЧ-23.

Климат южной части Якутии, в которой находится Нерюнгринский район, формируется под воздействием горного ландшафта и погодных процессов. Он относится к умеренно-континентальному типу и отличается довольно тёплой зимой и нежарким дождливым летом. Зима длится от 7 до 7,5 месяцев. В это время года на всей территории республики господствует отрог Сибирского антициклона, для которого характерно высокое барометрическое давление. В антициклоне формируются воздушные массы с очень низкими температурами у поверхности земли — от -40 до -50°C. Воздух в антициклоне очень сухой и отличается большой устойчивостью. При оказании действий антициклон «восточный процесс» со стороны морей Тихого океана происходит значительное потепление, которое сопровождается притоком тёплого воздуха и осадками. Исходя из данных климатических характеристик и наличием многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в основании земляного полотна, можно отнести данную местность к сложным инженерным условиям.

При строительстве транспортных объектов в таких условиях для обеспечения их надежности необходимо учитывать природно-климатические, гидрологические и мерзлотные процессы [2–6], игнорирование которых неблагоприятно сказывается на ходе строительства и на дальнейшей эксплуатации объекта. Применение современных технологий и

³ Холодникан — новая точка на карте БАМа [Электронный ресурс]: УК Бамстроймеханизация. — URL: <https://bsmuk.ru/press-center/news/kholodnikan-novaya-tochka-na-karte-bama/> (дата обращения: 28.04.2024).

материалов, а также проведение регулярного мониторинга состояния грунтов, позволяет минимизировать риски и обеспечить надежность и долговечность сооружений. Поэтому важно учитывать влияние климатических изменений и адаптировать методы строительства к новым условиям, чтобы предотвратить возможные негативные последствия.

Для обеспечения требуемой надежности рассматриваемого объекта в статье в качестве варианта рассмотрено применение сезонно-действующих охлаждающих устройств в сочетании с теплоизоляционными материалами [7–11]. Целью при этом является анализ использования предлагаемого конструктивно-технологического решения при взаимодействии сезонно-действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных слоев с оценкой их совместного воздействия на грунты основания.

Для ее достижения использовались моделирование и сравнительный анализ инженерно-геологических и природно-климатических факторов района строительства. Результатом явились технологические этапы устройства сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ) для участков с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ), расчет количества необходимого теплоизоляционного материала и конденсаторов [10].

1. Устройство сезонно-действующих охлаждающих устройств

1. Configuration of seasonally operating cooling devices

Вертикальная система термостабилизации как вариант улучшения прочностных характеристик грунтов основания, устранения условий образования талых зон или таликов на железнодорожной линии в зоне распространения ММГ с применением СОУ устраивается в 2 этапа:

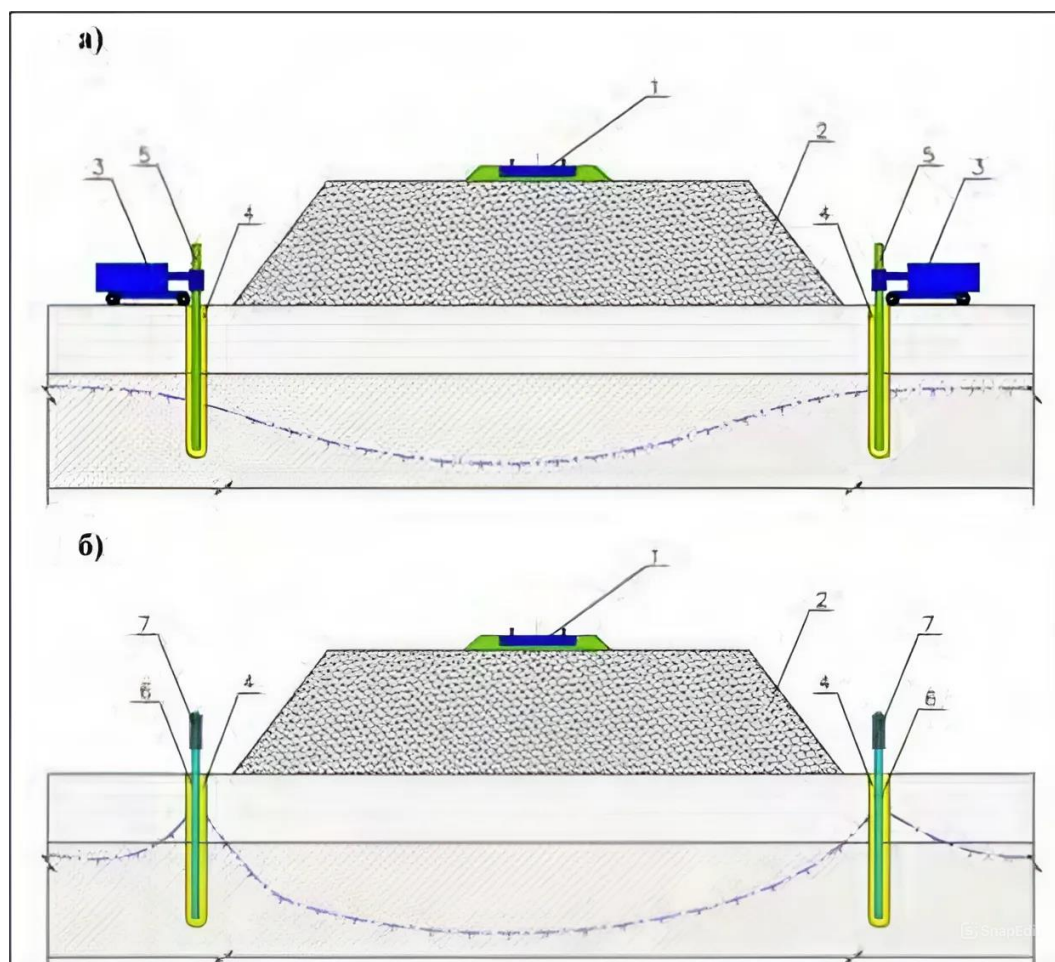
Первый этап — бурение вертикальных скважин; для этого используются технические средства, например, самоходные буровые установки «СБУ».⁴

Второй этап — погружение и монтаж термостабилизаторов. Погружение можно произвести как вручную, так и с использованием средств малой механизации.

Применение СОУ позволяет сохранить мерзлое состояние грунта, образуя замороженную зону. Простота строительно-монтажных работ

⁴ Строительство и реконструкция ООО «НПО «СЕВЕР» «Проектирование, изготовление и строительно-монтажные работы по монтажу систем температурной стабилизации грунтов линейных объектов, возводимых в районах распространения вечной мерзлоты», 24 с.

(СМР) при этом — главная особенность этой системы.⁴ Технологические этапы устройства СОУ предоставлены на рисунке 1.



1 — верхнее строение пути; 2 — земляное полотно; 3 — буровая установка; 4 — буровая скважина; 6, 7 — испаритель и конденсатор термостабилизатора, соответственно

1 — track structure; 2 — earth bed; 3 — drilling rig; 4 — borehole; 6, 7 — evaporator and condenser of the thermostabilizer, respectively

Рисунок 1. Этапы возведения СОУ: (а) бурение вертикальной скважины; (б) смонтированные термостабилизаторы [11]

Figure 1. Stages of seasonally operating cooling devices construction: (a) drilling of a vertical borehole; (b) mounted thermostabilizers [11]

2. Расчет количества СОУ для разъезда Холодникан на перегоне Золотинка-Аям Дальневосточной железной дороги

2. Calculation of the number of seasonally operating cooling devices for the Kholodnikan junction on the Zolotinka-Ayam section of the Far Eastern Railway

Расчет выполнен для участка протяженностью 500 м. Для обеспечения несущей способности земляного полотна сезонно-действующие

охлаждающие устройства устраиваются через 50 м, их количество N_{COY} на рассматриваемом участке. Каждое устройство рассчитано на поддержание оптимальных температурных условий в грунтах основания, что способствует предотвращению их деформаций и разрушений. Для повышения эффективности, были проведены расчеты необходимого количества COY с учетом инженерно-геологических и природно-климатических факторов района проектирования, что позволяет обеспечить максимальную расчетную надежность и долговечность земляного полотна:

$$N_{COY} = \frac{L_{уч}}{l_{уст}}, \quad (1)$$

где $L_{уч}$ — протяженность участка, м; $l_{уст}$ — расстояние между COY, м.

С учетом этого для рассматриваемого участка количество термостабилизаторов с одной стороны колеи железнодорожной линии составит $N_{COY} = \frac{500}{50} = 10 шт.$ Для установки по обеим сторонам пути потребуется 20 термостабилизаторов.

3. Использование теплоизоляционных материалов на участке разъезд Холодникан на перегоне Золотинка-Аям Дальневосточной железной дороги

3. Use of heat-insulating materials on the section of Kholodnikan passing-track at Zolotinka-Ayam section of the Far East Railway

Строительство транспортных объектов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов приводит к изменению сложившегося теплового режима основания, что может вызвать как поднятие уровня залегания мерзлоты в основании, так и ее деградацию. Для предотвращения или компенсации этих изменений разработаны различные методы, один из которых — устройство COY, рассмотренное выше.

Кроме того, применяются такие методы, как использование специальных материалов, устойчивых к низким температурам, регулирование водного режима и другие. Важно также учитывать климатические условия и проводить регулярный мониторинг состояния грунтов, чтобы своевременно выявлять и устранять возможные проблемы. Комплексный подход к проектированию и строительству позволяет минимизировать негативное воздействие на многолетнемерзлые грунты и обеспечить долговечность транспортных объектов.

Еще одним способом сохранения мерзлого основания является применение теплоизоляционных покрытий [12].⁵ Такими покрытиями считаются различные подушки из теплоизоляционных материалов определенной толщины. В последнее время для теплоизоляции применяются покрытия из пенопласта, толщина этих плит для конкретных условий зависит от климатических и грунтовых условий и определяется на основе теплотехнического расчета [13]. При этом плиты могут укладываться как на основной площадке под балластной призмой, так и на откосах и подошве насыпи [14].⁵

Широко используются в качестве теплоизолятора в железнодорожном строительстве и при плановых ремонтах плиты «ПЕНОПЭКС», которые имеют высокие показатели прочности, долговечности, морозоустойчивости, биологической стойкости, низкого водопоглощения (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Характеристики пенополистирольных плит «ПЕНОПЛЭКС»

Extruded foam polystyrene slabs characteristics «PENOPLEX»

Прочность на сжатие при 10 % линейной деформации, не менее <i>Compressive strength at 10 % linear deformation, not less</i>	МПа (т/м ²) <i>MPa (t/m²)</i>	0,6 (60)
Прочность на сжатие при 2 % линейной деформации, не менее <i>Compressive strength at 2 % linear deformation, not less</i>	МПа (т/м ²) <i>MPa (t/m²)</i>	19
Водопоглощение за 28 суток <i>Water absorption in 28 days</i>	% по объему <i>% by the volume</i>	0,4
Категория стойкости к огню <i>Resistance to fire performance category</i>	группа <i>group</i>	Г4
Расчетный коэффициент теплопроводности при условиях эксплуатации «Б» <i>Thermal conductivity design coefficients at operating conditions «B»</i>	Вт/(м*°C) <i>W/(m*°C)</i>	0,032
Коэффициент паропроницаемости <i>Vapour permeability coefficient</i>	мг/(м.ч.Па) <i>mg/(m.h.Pa)</i>	0,005
Плотность <i>Density</i>	кг/м ³ <i>kg/m³</i>	38–47
Модуль упругости <i>Modulus of elasticity</i>	МПа <i>MPa</i>	20
Удельная теплоемкость <i>Specific heat capacity</i>	кДж/(кг.°C) <i>kJ/(kg.°C)</i>	1,45
Предел прочности при статическом изгибе <i>Ultimate stress limit at static bending</i>	МПа <i>MPa</i>	0,35–0,7
Ширина <i>Width</i>	мм <i>mm</i>	600
Длина <i>Length</i>	мм <i>mm</i>	2 400
Толщина <i>Thickness</i>	мм <i>mm</i>	40; 50; 60; 80; 100
Температурный диапазон эксплуатации <i>Operating temperature range</i>	°C <i>°C</i>	-70 ... +75

Источник⁵ / Source⁵

⁵ Технические указания на применение пенополистирола и геотекстиля при усилении основной площадки земляного полотна без снятия рельсошпальной решетки. — Москва: МПС, 1999. — 38 с. — Текст: непосредственный.

Плиты, уложенные на глубину не менее 0,4 метра, в дождливый период предотвращают накопление воды в насыпи. Из-за практически нулевого водопоглощения теплоизоляционный слой можно считать водоупором, что уменьшает пучение, осадку и способствует доуплотнению грунта [15]. Фрагмент технологического процесса укладки плит «Пеноплэкс» приведен на рисунке 2.



Рисунок 2. Уложенные плиты «ПЕНОПЛЭКС» под будущей железной дорогой (источник: <https://timotv.livejournal.com/162194.html?noscroll>. Автор: Ямалтранстрой)

Figure 2. PENOPLEX slabs laid under the future railway (source: <https://timotv.livejournal.com/162194.html?noscroll>. Author: Yamaltranstroy)

Для рассматриваемого в настоящей статье участка железнодорожной линии протяженностью 500 м определено необходимое количество плит теплоизоляции, укладываемых на берму и откос.

Используемые плиты имеют характеристики: длина 2,4 м, ширина 0,6 м, высота 0,1 м. Суммарная ширина бермы и откоса составляет:

$$L_{\text{ш}} = (l_{\text{бер}} + l_{\text{отк}}) * 2, \quad (2)$$

где $l_{\text{бер}}$ — ширина бермы; $l_{\text{отк}}$ — ширина откоса.

Для рассматриваемого объекта:

$$L_{ш} = (3 + 2,5) * 2 = 11 \text{ м.}$$

Площадь покрытия теплоизоляционными плитами «Пеноплэкс» составит:

$$S_{п} = L_{ш} * L_{д}, \quad (3)$$

где $L_{д}$ — длина участка железнодорожной линии, м.

$$S_{п} = 11 * 500 = 5\,500 \text{ м}^2.$$

В одной стандартной упаковке содержится 4 плиты площадью 5,76 м², отсюда необходимое количество плит для 500-метрового участка составит:

$$N_{пл} = \frac{S_{п}}{5,76}, \quad (4)$$

$$N_{пл} = \frac{5\,500}{5,76} \approx 955 \text{ (упаковок).}$$

4. Моделирование теплофизических процессов с применением термостабилизации многолетнемерзлых грунтов

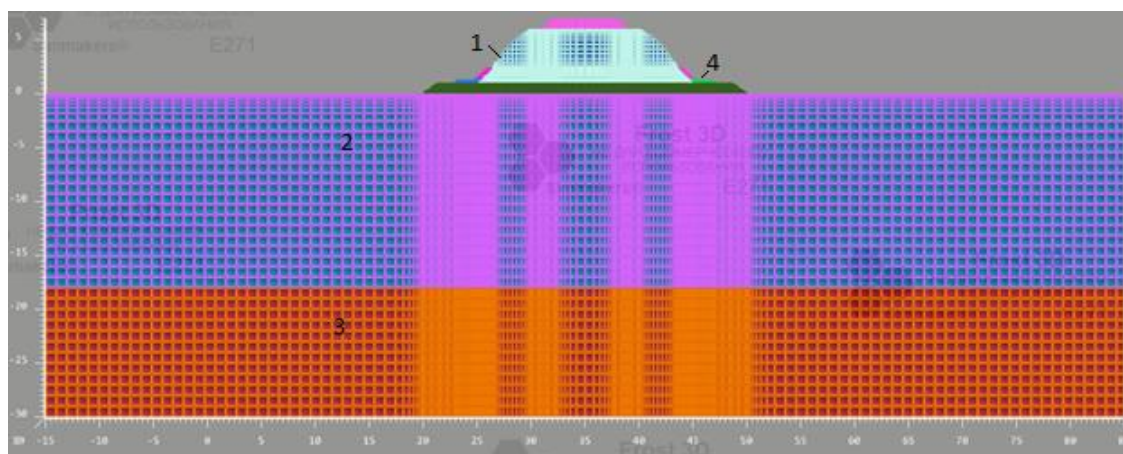
4. Modelling of thermophysical processes using thermostabilization of permafrost soils

Для оценки теплового взаимодействия насыпи с грунтами основания и влияния на них предлагаемых способов термостабилизации в программном комплексе Frost 3D выполнено теплофизическое моделирование, в основе которого лежит методика, приведенная в нормативном документе.⁶

На рисунке 3 представлена используемая модель насыпи на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61, полученная в программном комплексе Frost 3D.

В таблицах 2 и 3 приведены исходные данные для моделирования: для теплофизического моделирования для естественной поверхности (табл. 2), физические и теплофизические свойства грунтов и материалов на исследуемом участке (табл. 3).

⁶ РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечноммерзлых грунтов численными методами. — РСФСР: Госстрой, 1988. — 73 с.



1 — насыпь (песок средней крупности); 2 — суглинок; 3 — песок мелкий мерзлый; 4 — теплоизоляционный материал

1 — embankment (medium coarse sand); 2 — loam; 3 — fine frozen sand; 4 — thermal insulating material

Рисунок 3. Модель насыпи на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 3. Model of embankment at the section «Kholodnikan Junction on the Zolotinka-Ayam crossing of the Far Eastern Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors)

Таблица 2 / Table 2

Данные для теплофизического моделирования

Data for thermophysical modelling

Характеристика Characteristic	Месяцы Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C Temperature, °C	-31,10	-23,00	-12,10	-0,20	10,06	17,16	21,20	18,49	10,79	-0,80	-16,60	-28,60
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К) Convective heat exchange coefficient, W/(m²·K)	13,70	14,96	16,64	20,83	20,41	17,05	16,22	15,80	17,47	16,22	15,80	13,70
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	1,80	2,10	2,50	3,50	3,40	2,60	2,40	2,30	2,70	2,40	2,30	1,80
Высота снежного покрова, м Snow cover height, m	0,26	0,29	0,27	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,11	0,20
Теплопроводность снега, Вт/(м·К) Snow thermal conductivity, W/(m·K)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

Источник⁷ / Source⁷

⁷ Проектная документация АО «Росжелдорпроект», Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги. — 2017.

Таблица 3 / Table 3

Физические и теплофизические свойства грунтов

Physical and thermophysical properties of soils

№ ИГЭ NO. Engineering and geological element	Наименование инженерно- геологического элемента Name of engineering- geological element	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)		Объемная теплоемкость, Дж/(м³·К) Volumetric heat capacity, J/(m³·K)		Суммарная влажность, д.е. Total moisture content, d.u.	Плотность в сухом состоянии, кг/м³ Dry density, kg/m³	Температура начала замерзания, °C Ground freezing point, °C
		талого thawed	мёрзлого frozen	талого thawed	мёрзлого frozen			
1	Суглинок Loam	1,51	1,68	3 150 000	2 350 000	0,25	1 600	-0,20
2	Теплоизолятор Thermal insulator					0,00	45	0,00
3	Верх насыпи Top of embankment	1,45	1,51	2 350 000	2 180 000	0,05	1 900	-0,05
4	Песок Sand	1,57	1,79	3 130 000	2 140 000	0,38	12 20	-0,28
5	Насыпь Embankment	1,57	1,86	2 480 000	1 890 000	0,20	1 400	-0,05

Источник⁸ / Source⁸

На основании исходных данных выполнено теплофизическое моделирование влияния насыпи железнодорожного пути на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 на многолетнемерзлые грунты основания.

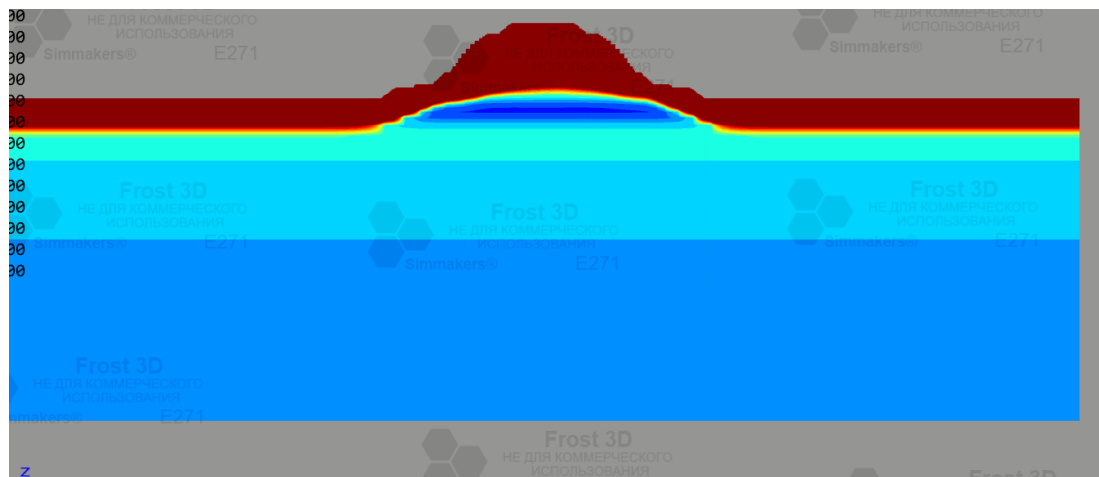


Рисунок 4. Теплофизическое моделирование состояния грунтов насыпи на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 в программе Frost 3D (по состоянию на 15.09.23) (разработано авторами)

Figure 4. Thermophysical modelling of the embankment soil condition at the section «Kholodnikan Junction on the Zolotinka-Ayam crossing of the Far Eastern Railway», software package 3266+12,61 in Frost 3D software (as of 15.09.23) (developed by the authors)

⁸ СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. — Москва, 2000. — 61 с.

Дополнительно под правым откосом запроектирована установка СОУ для сравнения с состоянием грунтов под левым откосом. Результат моделирования приведен на рисунке 4.

При моделировании принято во внимание распределение температур грунтов основания на рассматриваемом участке, приведенное на рисунке 5. Как видно из этого графика, граница нулевых температур на участке (по состоянию на 15.09.23) находится на глубине 3,6 м.

С учетом этого на рисунке 6 представлено распределение температурных полей грунтов в теле насыпи. Видно, что граница нулевых температур (по состоянию на 15.09.23) проходит через тело насыпи.

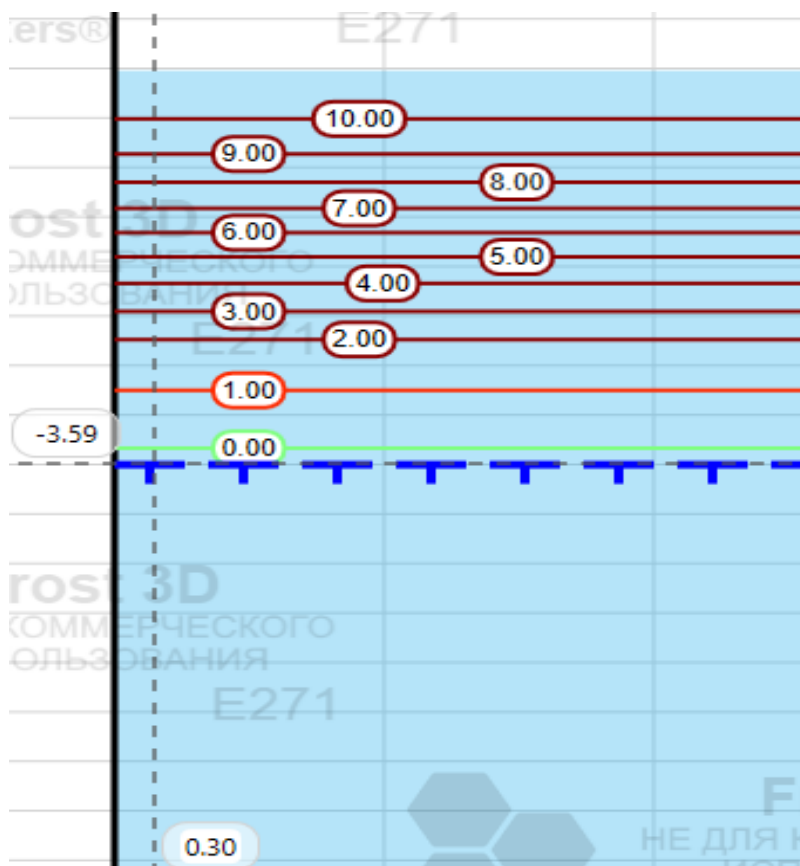


Рисунок 5. График распределения температур грунтов основания по глубине (по состоянию на 15.09.23) на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 5. Temperature distribution graph of the earth foundation by depth (as of 15.09.23) at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam of Far East Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors)

Далее в ходе исследования выполнено теплофизическое моделирование состояния грунтов основания и насыпи на исследуемом участке с учетом предложенных мероприятий по термостабилизации. На рисунке 7 представлен результат моделирования состояния грунтов в результате установки под правым откосом СОУ.

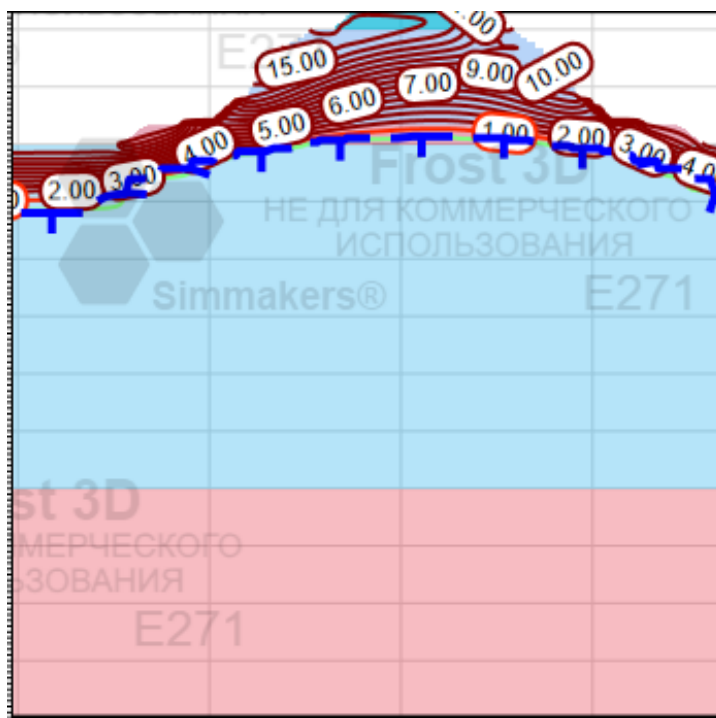


Рисунок 6. Распределение температур грунтов в теле насыпи (по состоянию на 15.09.23) на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 6. Soil temperature distribution in the mass of the embankment (as of 15.09.23) at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam of the Far East Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors)

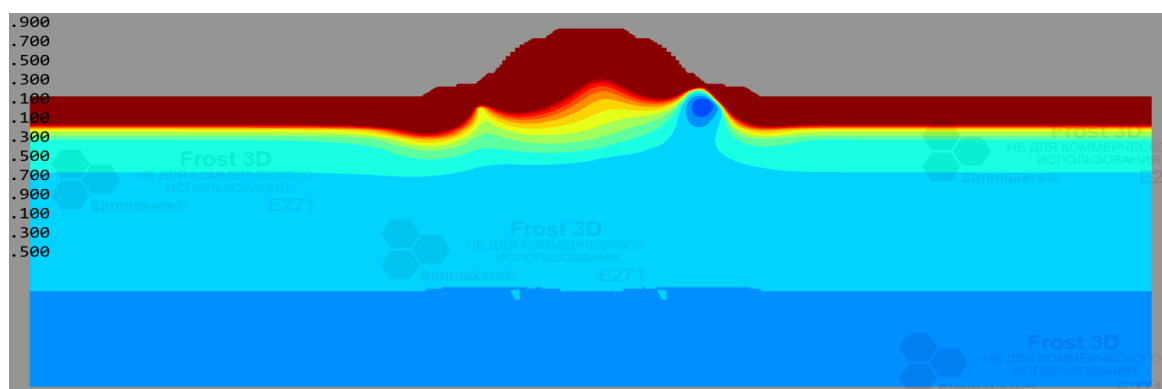


Рисунок 7. Теплофизическое моделирование в программе Frost 3D участка «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (по состоянию на 15.09.23) (разработано авторами)

Figure 7. Thermophysical modelling in Frost 3D program of the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam of Far East Railway», software package 3266+12,61 (as of 15.09.23) (developed by the authors)

Если сравнить модели состояния грунтов на рисунках 4 и 7, то видно, что граница многолетнемерзлых грунтов (синяя граница) оказывается ниже: ($-5,71^{\circ}\text{C}$ в варианте с установкой СОУ, рисунок 8, против $-3,59^{\circ}\text{C}$ без установки СОУ, см. рис. 5), то есть происходит увеличение талой зоны.

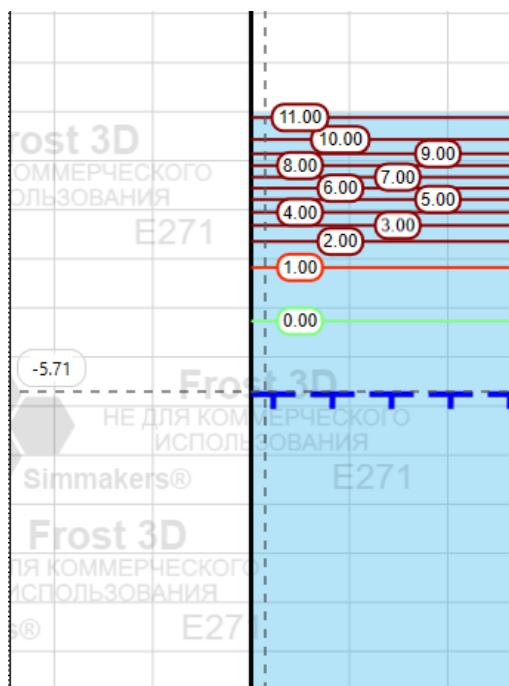


Рисунок 8. График распределения температур грунтов основания (по состоянию на 15.09.23) по глубине на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 8. Temperature distribution graph of the earth foundation (as of 15.09.23) by depth at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam crossing of the Far East Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors).

Изменившееся состояние грунтов подтверждает и график распределения температурных полей в насыпи после установки СОУ — рисунок 9. Видно, что граница нулевых температур (по состоянию на 15.09.23) уже не проходит через тело насыпи. Талая зона под насыпью также увеличивается, лишь в зоне установки СОУ она не меняется.

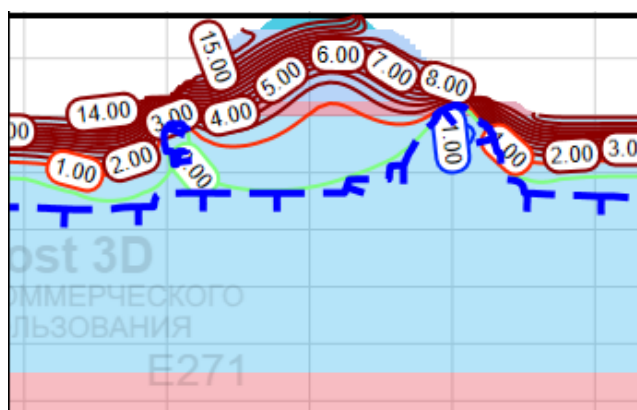


Рисунок 9. График распределения температурных полей в теле насыпи (по состоянию на 15.09.23) на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 9. Temperature fields distribution graph in the earth foundation (as of 15.09.23) at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam crossing of the Far East Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors)

В ходе дальнейших исследований в программном комплексе Frost 3D выполнено прогнозное моделирование состояния грунтов основания на рассматриваемом участке через 20 лет при установке СОУ под правым откосом земляного полотна как варианта термостабилизации. Результат моделирования представлен на рисунке 10.

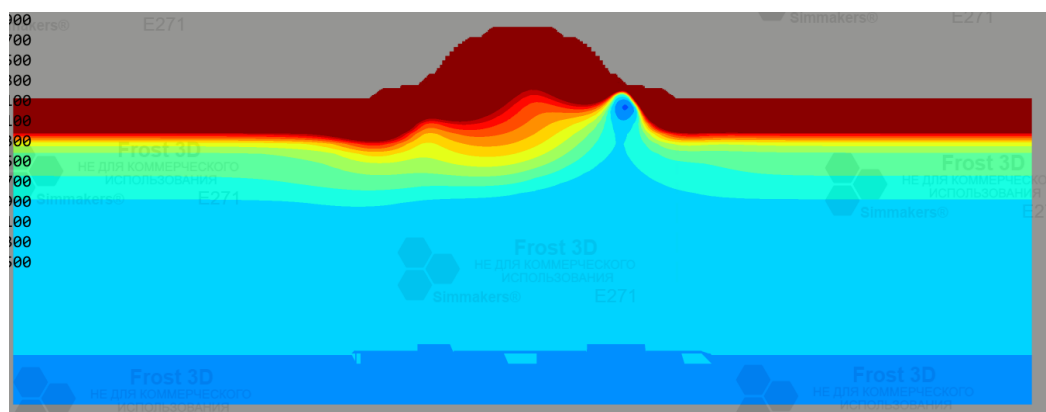


Рисунок 10. Теплофизическое моделирование состояния грунтов основания и насыпи на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (разработано авторами)

Figure 10. Earth foundation and embankment thermophysical modelling at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam of the Far East Railway», software package 3266+12,61 (developed by the authors)

Получен график распределения температур грунтов основания через 20 лет — рисунок 11. Из него видно, что отметка нулевых температур еще снизилась, теперь до уровня -8,37°C, то есть деградация многолетнемерзлых грунтов прогрессирует всё больше, но СОУ справляется со своей работой.

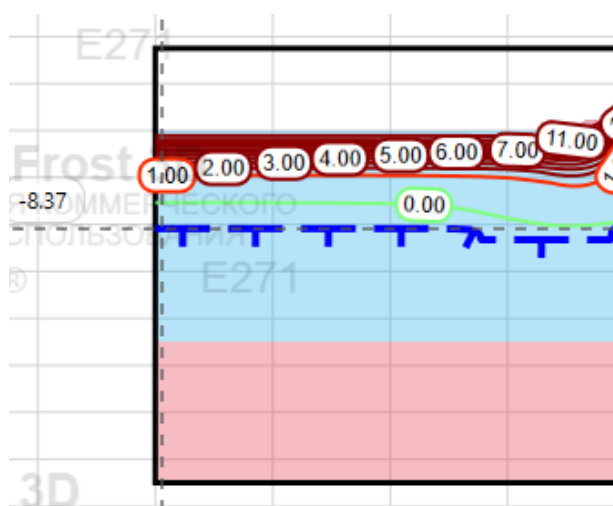


Рисунок 11. График распределения температур грунтов основания по глубине на участке «Разъезд Холодникан на перегоне Золотинка — Аям Дальневосточной железной дороги», ПК 3266+12,61 (по состоянию на 15.09.43) (разработано авторами)

Figure 11. Temperature distribution graph of the earth foundation by depth at the section «Kholodnikan Junction at Zolotinka — Ayam of the Far East Railway», software package 3266+12,61 (as of 15.09.43) (developed by the authors)

Заключение

Conclusion

Влияние, оказываемое сезонно-действующими охлаждающими устройствами (СОУ) во взаимодействии с теплоизоляционным материалом (в рассматриваемом случае экструдированный пенополистирол Пеноплэкс), на работу насыпи, сооруженной на многолетнемерзлых грунтах, проявляется сразу, уменьшая талую зону на откосах и поверхности насыпи в течение всего периода эксплуатации.

Проанализировав работу термостабилизатора выявлено положительное влияние на грунты основания и тела насыпи, происходит увеличение параметров прочностных характеристик даже в самый неблагоприятный (тёплый) месяц года в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Результаты моделирования показали, что применение СОУ способствует значительному снижению риска деформаций и разрушений насыпи, связанных с влиянием положительных температур на многолетнемерзлые грунты. Это особенно важно в условиях глобального потепления, когда стабильность многолетнемерзлых грунтов становится критически важным аспектом как для оснований линейных объектов, так и для сосредоточенных.

Таким образом, использование СОУ в сочетании с теплоизоляционными материалами не только повышает прочностные характеристики насыпи, но и обеспечивает ее долговременную эксплуатационную надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сазонов, В.Н.** Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне / В.Н. Сазонов, Е.С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. — 2015. — № 9. — С. 28–31. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?idn=ujykoh>. — EDN UJYKOH. (дата обращения: 21.05.2024).
2. **Шепитько, Т.В.** Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко, П.Г. Долгов. — DOI <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78> // Мир транспорта. — 2019. — Т 17. — № 4. — С. 68–78. — URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1707>. — EDN JZCNEW. (дата обращения: 21.05.2024).
3. **Шепитько, Т.В.** Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко. — DOI <https://doi.org/10.15862/10SATS419> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 4. — С. 10SATS419. — URL: <https://t-s.today/10SATS419.html>. — EDN ZCMKDC. (дата обращения: 21.05.2024).
4. **Haynes, F.D.** Thermosyphons and foundation design in cold regions / F.D. Haynes, J.P. Zarling // Cold Regions Science and Technology. — 1988. — № 15. — С. 251–259. — URL: <https://www.spri.cam.ac.uk/library/catalogue/records/91902/>. (дата обращения: 21.05.2024).
5. **Long, E.L.** The long thermopile / E.L. Long // Proc. of the First Intern. Conf. on Permafrost / Пердью: Purdue University, 1963. — С. 487–490. — URL: <https://www.permafrost.org/wp-content/uploads/ConferenceMaterials/01st-International-Conference-on-Permafrost-Proceedings-Lafayette-Indiana-1966.pdf>. (дата обращения: 21.05.2024).

6. **Edward, Yannak Jr.** Recent Developments in Thermosyphon Technology / Edward Yannak Jr., E.L. Long. — DOI [https://doi.org/10.1061/40621\(254\)56](https://doi.org/10.1061/40621(254)56) // Cold Regions Engineering / Анкоридж: ASCE, 2002. — С. 656–662. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40621%28254%2956>. (дата обращения: 21.05.2024).
7. **Хрусталеv, Л.Н.** Определение температурного коэффициента при расчете несущей способности вечномёрзлого основания в условиях меняющегося климата / Л.Н. Хрусталеv, Л.В. Емельянова // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 1. — С. 14–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22959073>. — EDN TIKTGR. (дата обращения: 21.05.2024).
8. **Ибрагимов, Э.В.** Экспериментальные исследования инновационных конструкций пологонаклонных термостабилизаторов грунта / Э.В. Ибрагимов, Я.А. Кроник, Е.В. Куплинова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2014. — № 4. — С. 208–220. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21830574>. — EDN SJSRMP. (дата обращения: 21.05.2024).
9. **Шепитько, Т.В.** Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко. — DOI <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-1-2> // Мир транспорта. — 2023. — Т 21. — № 1. — С. 14–21. — URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/2419>. — EDN HNMXNT. (дата обращения: 22.05.2024).
10. **Кроник, Я.А.** Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне / Я.А. Кроник // Материалы Пятой конференции геокриологов России: Пленарные доклады. Часть 1. Инженерная геокриология. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне. Часть 3. Сезонно-действующие и охлаждающие системы в криолитозоне. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве, Москва, 14–17 июня 2016 года / МГУ имени М.В. Ломоносова. Том 1, Часть 1–4 / Москва: Издательско-торговый дом "Университетская книга", 2016. — С. 104–113. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26157037>. — EDN WAKGKV. (дата обращения: 22.05.2024).
11. **Колосков, Г.В.** К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне / Г.В. Колосков, Э.В. Ибрагимов, Р.Г. Гамзаев // Геотехника. — 2015. — № 6. — С. 4–11. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26039518>. — EDN VXVJZF. (дата обращения: 22.05.2024).
12. **Чжан, А.А.** Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания / А.А. Чжан, Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталеv, Д.М. Шестернев. — DOI [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3\(67-71\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71)) // Криосфера Земли. — 2018. — Т 22. — № 3. — С. 67–71. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35085554>. — EDN XQFTRB. (дата обращения: 22.05.2024).
13. **Ашпиз, Е.С.** Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи / Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталеv, Л.В. Емельянова, М.А. Ведерникова // Криосфера Земли. — 2008. — Т 12. — № 2. — С. 84–89. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11572910>. — EDN JTGMMX. (дата обращения: 22.05.2024).
14. **Ашпиз, Е.С.** Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог / Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталеv, Л.В. Емельянова, М.А. Ведерникова. — DOI [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(45-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)) // Криосфера Земли. — 2020. — Т 24. — № 5. — С. 45–50. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44190615>. — EDN HSPPVX. (дата обращения: 22.05.2024).
15. **Кудрявцев, С.А.** Промерзание и оттаивание грунтов: практические примеры и конечноэлементные расчеты / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. — Санкт-Петербург: Институт строительного проектирования "Геореконструкция", 2014. — 248 С. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xcyhxf>. — EDN XCYHNF. (дата обращения: 22.05.2024).

Сведения об авторах:

Шепитько Таисия Васильевна — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Артюшенко Игорь Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: tywka351@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=988867

Зайцев Андрей Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail:

andrei.zaitsev2010@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Ноздрачёв Алексей Сергеевич — ассистент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail:

alex14071953@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8893-0991>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1216070

Статья получена: 29.07.2024. Принята к публикации: 25.10.2024. Опубликовано онлайн: 08.11.2024.

Работа выполнена за счет гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-559)

REFERENCES

1. Sazonov V.N., Ashpiz E.S. [Current issues of ensuring the reliability of the roadbed at the Eastern testing ground]. [Railway transport]. 2015;(9): 28–31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ujykoh> (accessed 21st May 2024). (In Russ.).
2. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. Base Soil Reinforcement with Vertical Crushed Stone Columns in Cryolithozone. *World of Transport and Transportation*. 2019;17(4): 68–78. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78>.
3. Shepitko T.V., Artyushenko I.A. The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019;6(4): 10SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/10SATS419>.
4. Haynes F.D., Zarling J.P. Thermosyphons and foundation design in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 1988;(15): 251–259. Available at: <https://www.spri.cam.ac.uk/library/catalogue/records/91902/> (accessed 21st May 2024). (In Eng.).
5. Long E.L. The long thermopile. In: *Proc. of the First Intern. Conf. on Permafrost*. Purdue: Purdue University; 1963. p. 487–490. Available at: <https://www.permafrost.org/wp-content/uploads/ConferenceMaterials/01st-International-Conference-on-Permafrost-Proceedings-Lafayette-Indiana-1966.pdf> (accessed 21st May 2024). (In Eng.).
6. Edward Yannak Jr., Long E.L. Recent Developments in Thermosyphon Technology. In: *Cold Regions Engineering*. Anchorage: ASCE; 2002. p. 656–662. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40621%28254%2956> (accessed 21st May 2024). (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/40621\(254\)56](https://doi.org/10.1061/40621(254)56).
7. Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V. Determination of the Temperature Coefficient for Calculation of the Bearing Capacity of Permafrost Beds in a Changing Climate. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013;50(1): 19–23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-013-9204-1>.
8. Ibragimov E.V., Kronik Ya.A., Kuplinova E.V. Experimental Studies of Innovative Design of Soil Heat Stabilizers. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Journal Of Construction and Architecture*. 2014;(4): 208–220. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21830574> (accessed 21st May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Shepitko T.V., Artyushenko I.A. Evaluation of Influence of Seasonally Operating Cooling Devices on Thermophysical Processes of Soils of Railway Embankment Foundation. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(1): 14–21. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-1-2>.

10. Kronik Y. Emergency Analysis and Safety of Geotechnical Systems on Permafrost. In: [Proceedings of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia: Plenary reports. Part 1. Engineering geocryology. Part 2. Linear structures in the cryolithozone. Part 3. Seasonally operating and cooling systems in the cryolithozone. Part 4. Geophysical studies in the cryolithozone during construction, Moscow, June 14–17, 2016 / Lomonosov Moscow State University. Volume 1, Part 1–4]. Moscow: Universitetskaya kniga; 2016. p. 104–113. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26157037> (accessed 22nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Koloskov G.V., Ibragimov E.V., Gamzaev R.G. On The Problem of Choosing Optimal Systems of Soil Temperature Stabilization for Construction in The Cryolithozone. *Geotechnics*. 2015;(6): 4–11. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26039518> (accessed 22nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Zhang A.A., Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Shesternev D.M. A New Way for Thermal Stabilization of Permafrost Under Railway Embankment. *Kriosfera Zemli*. 2018;22(3): 67–71. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3\(67-71\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71)).
13. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emelyanova L.V., Vedernikova M.A. Using of Synthetical Thermal Insulators for Conservation of Frozen Soil Conditions in The Base of Railway Embankment. *Kriosfera Zemli*. 2008;12(2): 84–89. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11572910> (accessed 22nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emelyanova L.V., Vedernikova M.A. Prevention of Degradation of Permafrost Soils at The Base of Railway Embankments. *Kriosfera Zemli*. 2020;24(5): 45–50. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(45-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)).
15. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. [Freezing and thawing of soils: practical examples and finite element calculations]. Saint Petersburg: Institute of Construction Design "Georekonstruktsiya"; 2014. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xcyhxf> (accessed 22nd May 2024). (In Russ.).

Information about the authors:

Taisia V. Shepitko — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Igor A. Artyushenko — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: tywka351@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=988867

Andrey A. Zaytsev — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Alexey S. Nozdrachev — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: alex14071953@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8893-0991>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1216070

Submitted: 29th July 2024. Revised: 25th October 2024. Published online: 8th November 2024.

The article has been prepared on the basis of the research carried out within the framework of the grant provided by the Ministry of Education and Science in the form of a subsidy from the federal budget Agreement No. 075-15-2024