

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/16SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/16SATS226 (<https://doi.org/10.15862/16SATS226>)

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:

Артюшенко, И. А. Анализ влияния технологии каменной наброски на теплофизические процессы в основании земляного полотна, сложенного многолетнемерзлыми грунтами / И. А. Артюшенко, Т. М. Пантелеев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/16SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/16SATS226.

For citation:

Artyushenko I.A., Pantelev T.M. Analysis of the influence of rockfill (stone blanket) technology on thermophysical processes in the subgrade base composed of permafrost soils. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 16SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/16SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/16SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.139.7

Артюшенко Игорь Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Проектирование и строительство железных дорог»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: tywka351@mail.ru

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

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

Пантелеев Тимур Михайлович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Старший лаборант

E-mail: pantelev-tm@rut-miit.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1345574

Анализ влияния технологии каменной наброски на теплофизические процессы в основании земляного полотна, сложенного многолетнемерзлыми грунтами

Аннотация. Строительство объектов транспортной инфраструктуры в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов является сложной инженерной задачей. В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, ключевыми приоритетами развития являются повышение пространственной связанности территорий, увеличение объёмов и скорости транзита грузов, а также цифровая и низкоуглеродная трансформация отрасли. В рамках реализации этих задач особое значение приобретает развитие восточного полигона железных дорог, Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, где значительная их часть проходит в сложных инженерно-геологических условиях.

В статье рассматривается анализ технологии устройства каменной наброски как эффективное с точки зрения термостабилизации конструктивно-технологическое решение, её виды, а также её влияние на физико-механические и термостабилизирующие процессы при использовании её в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (на примере участка Дальневосточной железной дороги).

За основу демонстрации эффективности каменной наброски (с точки зрения устойчивости, способности сопротивления деформациям земляного полотна, происходящим как из-за постоянной и временной нагрузок, так и из-за динамики изменения температуры грунтов внутри и снаружи земляного полотна) был взят участок Дальневосточной железной дороги «Разъезд Окурдан». В статье приведены результаты расчётов цифровых моделей железнодорожной насыпи на разъезде Окурдан, произведённые в программном комплексе «Frost 3D» (расчёт на эффективность термостабилизации тела земляного полотна в долгосрочной перспективе). В целях сравнения результатов расчётов было выполнено теплофизическое моделирование как с использованием каменной наброски, так и без неё.

Ключевые слова: транспорт; термостабилизация грунтов; многолетнемерзлые грунты; строительство; железная дорога; земляное полотно; криолитозона; каменная наброска

Введение

Значительная часть территории Российской Федерации характеризуется распространением многолетнемерзлых грунтов. При проектировании и строительстве железных дорог в этих регионах критически необходимо учитывать особенности влияния возводимых сооружений на многолетнемерзлые грунты, а именно на их физико-механические и теплофизические характеристики. В зависимости от характера восприятия различными видами грунтов климатических характеристик региона строительства очень важно сопоставить такие процессы, как: результаты инженерно-геологических, гидрологических и геодезических изысканий, существующие и перспективные объекты транспортного строительства, возможности привлечённых техники и рабочих, существующие места для разработки нужных видов грунтов, при том, чтобы после возведения земляного полотна, при минимальных строительных и эксплуатационных затратах, оно удовлетворяло условиям прочности, надёжности и устойчивости к физико-механическим и теплофизическим воздействиям внешней среды в долгосрочной перспективе.

Основная причина деформаций земляного полотна, сооружаемого в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, является нарушение естественного теплового баланса.¹ Именно деградация многолетней мерзлоты в основании из-за замены естественного теплоизолирующего покрова (мха, торфа) на тело насыпи приводит к наиболее серьёзным и долговременным деформациям [1]. Второй принцип проектирования на многолетнемерзлых грунтах не подразумевает полной термостабилизации, поэтому в данном случае будем руководствоваться первым принципом — сохранением мерзлоты внутри тела железнодорожной насыпи [2].

¹ Жданова, С. М. Особенности принятия проектных решений по обеспечению устойчивости оснований железнодорожных насыпей на высокотемпературных вечномёрзлых грунтах: специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жданова Светлана Мирзахановна. — Санкт-Петербург, 1999. — 174 с.

Помимо температурных факторов, на стабильность основания существенно влияют технологические нагрузки в строительный период, в частности виброуплотнение грунтов тяжёлыми катками, что требует учёта вероятностного характера прочностных характеристик грунтов [3; 4].

В современных условиях для обоснования выбора конструктивно-технологических решений при строительстве земляного полотна на многолетнемёрзлых грунтах всё более широкое применение находят методы интеллектуальной поддержки принятия решений.

Использование экспертных систем на основе продукционной модели знаний и графовых моделей конструктивных элементов позволяет формализовать технологические связи и автоматизировать генерацию номенклатуры строительных работ, что существенно снижает вероятность ошибок и сокращает время проектирования. Предложенная в [5] методология включает декомпозицию земляного полотна на конструктивные элементы с последующей интеллектуальной генерацией перечня работ с привязкой к нормативной базе (государственные элементные сметные нормы — ГЭСН), что создаёт основу для оптимизации технологических процессов и календарного планирования.

В СП 25.13330.2020² указано, что сезонно-охлаждающие устройства (СОУ) необходимо применять в случаях практической невозможности или недостаточной эффективности других решений для поддержания на весь период эксплуатации сооружений температуры грунтов, требуемой по расчёту несущей способности оснований.

Исследования показали [6], что в целях сохранения многолетней мерзлоты в теле земляного полотна в некоторых случаях можно обойтись без устройства дорогостоящих сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) [7], нивелировав их термостабилизирующее воздействие путём устройства каменной наброски на откосах. Анализ многолетнего опыта эксплуатации железных дорог в криолитозоне показывает, что традиционные методы термостабилизации, включая сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) и охлаждающие наброски из фракционного камня, в условиях интенсивного снегопереноса и при использовании снегоуборочной техники часто оказываются малоэффективными. Надземные части СОУ загромождаются снегом, повреждаются при очистке пути, а продукты вентилируемых конструкций забиваются снегом, что приводит к утечке теплоносителя и потере функциональности устройств. Авторы подчёркивают, что в Северном регионе, где среднегодовые температуры воздуха за последние 50 лет повысились на 3–4°C, а количество осадков в холодный период увеличивается на 12 мм / 10 лет, попытки сохранить многолетнюю мерзлоту только за счёт охлаждающих устройств оказались безуспешными [8]. В зависимости от местных условий имеется возможность избежать затрат на устройство и обслуживание СОУ, так как каменная наброска, применённая на таких объектах, как: разъезд Окурдан Дальневосточной железной дороги, а также при строительстве других объектов Восточного полигона, — имеет ряд природных положительных термостабилизирующих свойств, не требующих пристального внимания со стороны эксплуатационного персонала железной дороги: при определённом характере устройства и отборе грунта каменная наброска работает как «тепловой диод», аккумулируя холодный воздух внутри пор в холодное время года, а также сохраняя его в летний период.³ Помимо наличия пор внутри каменной наброски, материал обладает пониженными теплопроводностью и теплоёмкостью, что обуславливает его эффективность при решении задачи сохранения тела земляного полотна в мёрзлом состоянии.

² СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88: дата введения 2020-06-27. — Москва: Стандартинформ, 2020. — 143 с. — Текст: непосредственный.

³ Хрусталёв, Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник / Л. Н. Хрусталёв. — М.: Издательство МГУ, 2005. — 542 с. — ISBN 5-211-05022-3. — Текст: непосредственный.

Основная часть

Теоретическое описание процесса взаимодействия каменной наброски с откосом земляного полотна в криолитозоне

В 2017 году Челябинский проектно-изыскательский институт «Челябжелдорпроект» — филиал АО «Росжелдорпроект» на основании плана мероприятий по реализации инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей», утвержденного Президентом ОАО «РЖД» Олегом Валентиновичем Белозёровым, разработал проект технологических и конструктивных решений в рамках модернизации железнодорожной инфраструктуры, цель которого — увеличение пропускной и провозной способностей железнодорожной линии с устройством третьего пути, а также увеличения проектного срока эксплуатации линии с помощью нового конструктивно-технологического решения, позволяющего нейтрализовать или минимизировать распространение тепла в теле насыпи.

Откосы насыпей и выемок оказывают большое отепляющее воздействие на грунты вследствие их повышенной инсоляции (облучение поверхностей солнечным светом), а также скопления на них снегового покрова.

Охлаждающий эффект достигается за счёт циркуляции холодного воздуха в зимний период в порах наброски. В работах Г. П. Минайлова⁴ описано охлаждающее влияние такого процесса: в летней период наброска работает как теплоизоляционный экран, препятствующий поступлению тепла к поверхности сооружения. Кроме того, нагретый в порах воздух, как более лёгкий, поднимается вверх и выходит наружу, а его место занимает более холодный наружный воздух, что нивелирует отепляющее влияние солнечной радиации. В зимний период сплошной снежный покров на наброске не образует сплошного утепляющего слоя благодаря крупным порам и шероховатости поверхности. Холодный, более тяжелый воздух свободно проникает в толщу наброски и, опускаясь вниз, вытесняет более тёплый воздух из подошвы откоса, создавая конвекцию. Это обеспечивает эффект «теплового диода», существенно снижая отепляющее влияние снега.

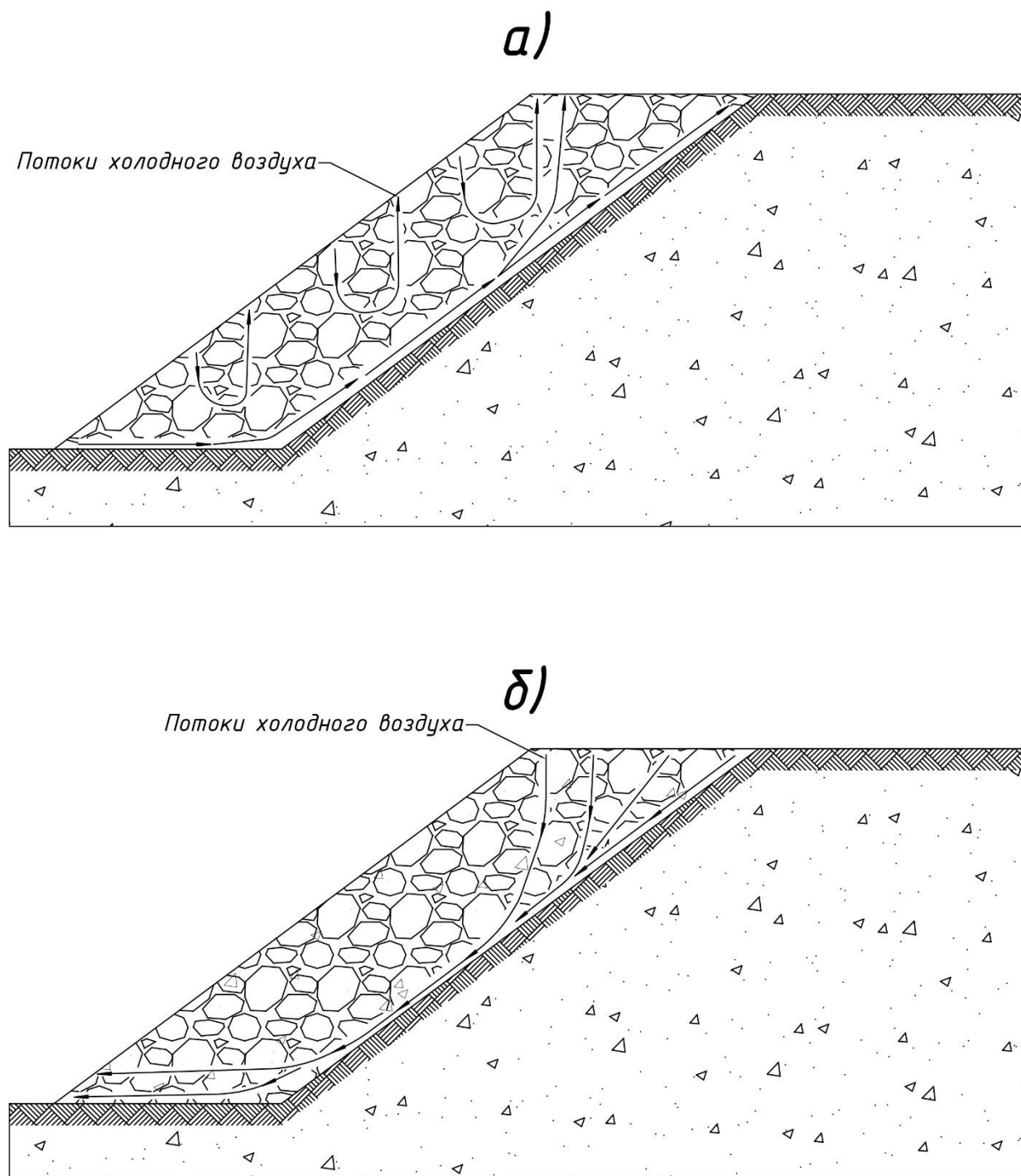
Помимо теплофизических свойств, важную роль играют и технологические аспекты: для обеспечения долговременной и эффективной работы такой конструкции критически важны правильный подбор фракции камня (обеспечение пустотности для конвекции), его морозостойкость и способы укладки [9].

Каменная наброска является одним из наиболее рациональных и доступных способов термостабилизации, особенно в условиях сурового климата, где применение активных методов (струйная цементация, термостабилизаторы) может быть ограничено из-за высокой стоимости, энергозатратности или сложности эксплуатации [10].

Технология устройства каменной наброски, в отличие от других методов усиления оснований (вертикальные столбы из щебня, струйная цементация), не нарушает естественный тепловой баланс грунта в процессе строительства и не требует дополнительного энергоснабжения в период эксплуатации.

На рисунке 1 представлены два варианта потоков холодного воздуха.

⁴ Минайлов, Г. П. Способы понижения температуры вечномерзлых грунтов на железных и автомобильных дорогах путем применения каменной наброски: специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минайлов Гавриил Павлович; научный руководитель Пассек В. В. — Москва, 2003. — 193 с. — Текст: непосредственный.



а — при условии, что температура воздуха ниже температуры грунтового основания наброски; б — при условии, что температура воздуха выше грунтового основания наброски

Рисунок 1. Варианты потоков холодного воздуха в порах каменной наброски (разработано автором)

Наброска состоит из отборного камня фракции не менее 200 мм слабых выветривающихся пород (курумы). Толщина наброски должна составлять от 0,8 до 1,2 м. Согласно⁴ это является оптимальной толщиной для проявления конвективных процессов в порах скального грунта.

Каменная наброска представляет собой крупнопористое покрытие, принцип работы которого отличается от обычных грунтовых массивов, из которых сооружаются железнодорожные насыпи.

В поперечном профиле она является слоем скалистого грунта, устроенного вдоль откосов насыпи. Различают три вида устройства каменной наброски, представленные на рисунке 2.

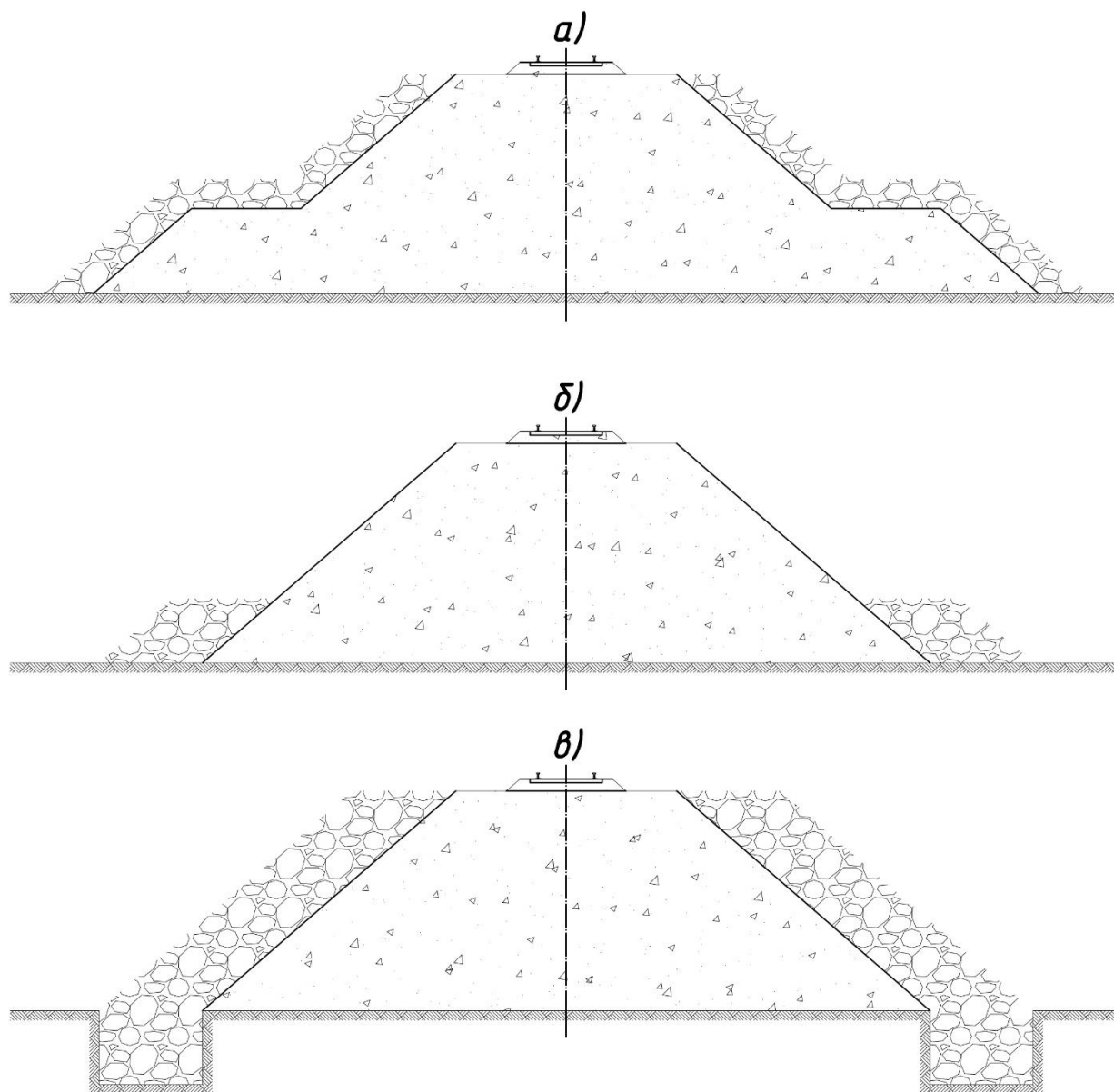


Рисунок 2. Виды устройства каменной наброски: а — наброска на откосах; б — скальная берма; в — клещевидная обойма (разработано автором)

В проектной документации по участку был принят вариант «а». В дальнейших расчётах будут представлены варианты «а» и «в». В последнем случае одновременно с использованием термостабилизирующего эффекта преследуется цель создания механического препятствия выдавливанию слабого слоя грунта из-под земляного полотна. Высота и ширина дополнительных коробов принимается двойной и тройной (соответственно) высоте снегового покрова в районе строительства, которая составляет 0,51 м. Поскольку в проектной документации ширина каменной наброски на правом откосе не соответствует ширине дополнительного короба (1,53 м), — ширину слоя скалистого грунта на правом откосе пришлось увеличить на 0,54 м, что в свою очередь приведёт к увеличению продолжительности земляных работ, общей продолжительности строительных работ и затрат на строительство.

Вариант устройства наброски в виде скальной бермы в статье не рассматривается, поскольку ожидается минимальный термостабилизирующий эффект от её применения. Особенно нецелесообразно её рассчитывать, поскольку этот вариант не был принят в проектной документации.

Для оценки теплового взаимодействия насыпи с грунтами основания, а также эффективности применения каменной наброски в качестве конструктивно-технологического решения (КТР) по термостабилизации были проведены расчёты с использованием программного комплекса «Frost 3D». Данный комплекс предназначен для выполнения трёхмерных нестационарных теплотехнических расчётов и основан на решении задачи Стефана с учётом фазовых переходов поровой влаги [11].

Теплофизическое моделирование в программном комплексе Frost 3D

Программный комплекс «Frost 3D», в котором велись теплофизические расчёты, основан на методе конечных разностей, в нём заложены основные уравнения теплопроводности и термодинамики. Данный программный комплекс входит в белые списки российского программного обеспечения.

Решение задачи о распределении температур в промерзающих и оттаивающих грунтах выполняется в два этапа: сначала определяются температурно-влажностные поля основания, затем — напряжённо-деформированное состояние системы «сооружение — многолетнемёрзлое основание» с учётом процессов промерзания, морозного пучения и оттаивания [12].

Выбор конкретного КТР для термостабилизации, должен базироваться на предварительном анализе типа многолетнемёрзлых грунтов (низкотемпературные или высокотемпературные), их распространения (сплошная, прерывистая, островная) и данных геотемпературного мониторинга. В настоящем исследовании для участка Дальневосточной железной дороги, исходя из анализа этих факторов и проектной документации, в качестве основного КТР была выбрана каменная наброска.

Процесс распространения тепла в грунте в трёхмерном пространстве описывается с помощью дифференциального уравнения⁵:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \partial \omega (\lambda \text{grad } \mu) + F, \quad (1)$$

где:

μ — температура грунта в точке $M(x, y, z)$ в момент τ ;

H — энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объёма грунта;

λ — коэффициент теплопроводности грунта в точке $M(x, y, z)$ в момент τ ;

F — плотность тепловых внутренних источников и стоков к единице объёма в точке $M(x, y, z)$.

Начало работы в программном комплексе представляет собой ввод данных инженерно-геологических изысканий при проектировании, а именно:

⁵ РСН 67-87 Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами: ведомственные строительные нормы РСФСР. — РСФСР: Госстрой, 1988. — 73 с. — Текст: непосредственный.

- заполнение базы данных материалов, физических свойств и условий теплообмена (температура начального состояния грунта, теплоёмкость в талом и мёрзлом состояниях, теплопроводность в талом и мёрзлом состояниях, содержание незамёрзшей воды, температуру фазового перехода, коэффициент фильтрации (табл. 1);
- граничные условия (температура воздуха, высота снегового покрова и его теплопроводность);
- климатические граничные условия (температура воздуха, коэффициент теплообмена, скорость ветра, высота снегового покрова и его теплопроводность, высота снегонакопления).

При определении физико-механических характеристик грунтов основания для участков, расположенных в криолитозоне, необходимо учитывать результаты инженерно-геологических изысканий. На примере мостового перехода через р. Юрибей (линия «Обская — Бованенково») показано, что пылеватые пески в условиях полуострова Ямал при влажности 8–12 % характеризуются пониженным углом внутреннего трения (16–20°) и повышенным сцеплением (18–20 кПа), что сопоставимо с характеристиками суглинков. В [13] предложена семантическая схема организации библиотеки цифрового информационного моделирования, позволяющая актуализировать данные инженерных изысканий на этапе эксплуатации сооружения.

Таблица 1

Физические и теплофизические свойства грунтов

№ ИГЭ	Наименование ИГЭ	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость, МДж/(м³·К)		Суммарная весовая влажность, д.е.	Плотность скелета (сухого) грунта, кг/м³	Температура начала замерзания, °С
		талого	мёрзлого	талого	мёрзлого			
1	Щебень насыпи (ИГЭ-2)	1,57	1,86	2,48	1,86	0,20	1 750,00	-0,35
2	Суглинок (ИГЭ-8)	1,45	1,55	3,02	2,18	0,29	1 450,00	-0,31
3	Супесь (ИГЭ-7)	1,62	2,20	2,30	2,14	0,21	1 750,00	-0,32
4	Скальник (ИГЭ-9)	3,50	4,00	0,92	0,75	0,20	2 300,00	-0,10
5	Суглинок (ИГЭ-6)	1,55	1,80	3,16	2,41	0,18	1 750,00	-0,38
6	Щебень насыпи (ИГЭ-3)	1,57	1,86	2,48	1,86	0,20	2 200,00	-0,35
7	Щебень насыпи (ИГЭ-4)	1,40	2,05	1,76	1,59	0,10	1 600,00	-0,35
8	Щебень насыпи (ИГЭ-5)	1,85	2,20	2,26	1,89	0,10	1 800,00	-0,35
10	Насыпь (скальная)	2,00	2,35	1,84	1,68	0,10	1 800,00	-0,10
11	Почва	0,81	1,34	4,00	2,31	3,47	80,00	-0,35

Разработано автором

Термостабилизирующие свойства каменной наброски, а также утепляющие воздействия внешней среды на грунты были учтены как раз в создании дополнительных граничных условий, применённых к расчётной модели железнодорожной насыпи.

При создании расчётной модели особое внимание следует уделить теплопередаче внутри каменной наброски (конвекции), выражающейся в движении порового воздуха. Конвекция определяется проявлением гравитационных сил при плотностной стратификации воздушной среды, с чем связана свободная (естественная) конвекция, и ветровым воздействием, обуславливающим в основном вынужденную конвекцию.⁴

Охлаждающее влияние наброски в теплотехнических расчётах учитывается заменой температуры воздуха на расчётную температуру на подошве наброски:

$$t_k = K_k \cdot t_v + 273,1 \cdot (K_k - 1), \quad (2)$$

где:

K_k — коэффициент приведения температуры воздуха к температуре на подошве наброски (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента приведения K_k

Наброска	Месяц												Средне годовое
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Фракционный камень	1,051	1,013	0,988	0,979	0,977	0,979	0,983	0,991	0,999	1,036	1,051	1,055	1,008
Камень с мелкозёмом	1,072	1,046	1,022	0,998	0,983	0,979	0,985	0,994	1,007	1,050	1,084	1,090	1,026

Источник⁶

Принятые значения температуры на подошве каменной наброски приведены в таблице 3.

Таблица 3

Температуры воздуха и соответствующие температуры на подошве каменной наброски (°C)

Температура	-30	-27	-22	-10	1	10	17	14	5	-14	-20	-28
t_k	-18	-24	-25	-16	-5	4	12	11	5	-5	-7	-15

Разработано автором

Как известно, температура воздуха, предоставляемая в результате инженерно-климатических изысканий, определяется по ближайшей метеостанции. Замеры температуры на метеостанции производятся в тени, то есть не учитывается прямое воздействие солнечной радиации. Учёт воздействия солнечной радиации особенно актуален при расчёте дорожных насыпей, в случаях, когда происходит постоянная очистка дорожного полотна от снегового покрова или длительное затенение одного из откосов насыпи.

Согласно СП 447.1325800.2019⁷ при отсутствии достаточных данных допускается учитывать суммарную поправку путём прибавления к среднемесячным значениям температуры воздуха с апреля по сентябрь температурной добавки $\Delta T = 3^\circ\text{C}$.

Для учёта этой поправки вводится дополнительное климатическое граничное условие для правого откоса насыпи (табл. 4).

Таблица 4

Климатическое граничное условие для правого откоса насыпи

Температура	-30	-27	-22	-10	1	10	17	14	5	-14	-20	-28
$t_{\text{гуп}}$	-30	-27	-22	-7	4	13	20	17	5	-14	-20	-28

Разработано автором

Итого с учётом конвекции имеем следующие климатические граничные условия для откосов насыпи (табл. 5):

Таблица 5

Климатические граничные условия для откосов насыпи

Температура	-30	-27	-22	-10	1	10	17	14	5	-14	-20	-28
$t_{\text{гуЛ}}$	-18	-24	-25	-18	-5	4	12	11	5	-5	-7	-15
$t_{\text{гуп}}$	-18	-24	-25	-13	-2	7	15	14	5	-5	-7	-15

Разработано автором

⁶ Технические указания по стабилизации деформирующихся насыпей железных дорог, расположенных на протаивающих основаниях из вечномерзлых грунтов. — М.: Главное управление пути МПС РФ, 1993. — 52 с. — Текст: непосредственный.

⁷ СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования: дата введения 2019-08-05. — М.: Стандартинформ, 2019. — 40 с. — Текст: непосредственный.

Такие характеристики как коэффициент теплообмена, скорость ветра, высота снегового покрова, высота снегонакопления и теплопроводность снегового покрова — не менялись для различных вводимых в программу граничных условий (табл. 6).

Таблица 6

Общие граничные условия

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	зависит от вида поверхности (табл. 7–9)											
Коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К)	15,80	14,96	14,96	16,22	16,22	14,96	13,70	13,70	14,12	15,80	15,80	16,22
Скорость ветра, м/с	2,30	2,10	2,10	2,40	2,40	2,10	1,80	1,80	1,90	2,30	2,30	2,40
Высота снегового покрова, м	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,25	0,38
Высота снегонакопления, м	0,94	0,98	1,02	0,94	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,50	0,76
Теплопроводность снегового покрова, Вт/(м·К)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,23	0,23	0,23	0,23	0,30	0,30	0,30

Разработано автором

Граничные условия для грунта представлены в таблице 7. Граничные условия, учитывающие конвекцию в порах каменной наброски, представлены в таблице 8. Граничные условия, учитывающие конвекцию, а также воздействие солнечной радиации на поверхность правого откоса железнодорожной насыпи, представлены в таблице 9.

Таблица 7

Граничные условия для грунта

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	-30,00	-27,00	-22,00	-10,00	1,00	10,00	17,00	14,00	5,00	-14,00	-20,00	-28,00

Разработано автором

Таблица 8

Граничные условия (левый откос каменной наброски)

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	-18,00	-24,00	-25,00	-18,00	-5,00	4,00	12,00	11,00	5,00	-5,00	-7,00	-15,00

Разработано автором

Таблица 9

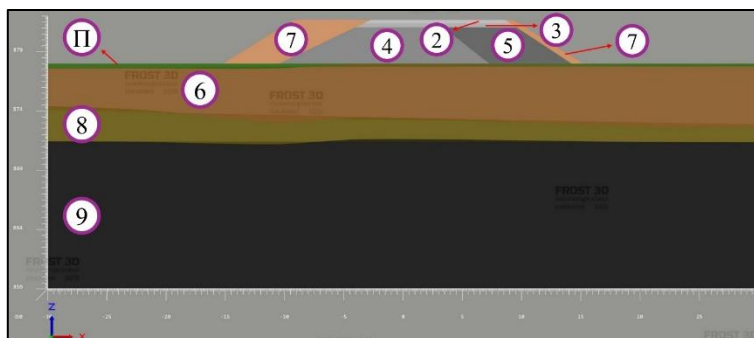
Граничные условия (правый откос каменной наброски)

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	-18,00	-24,00	-25,00	-13,00	-2,00	7,00	15,00	14,00	5,00	-5,00	-7,00	-15,00

Разработано автором

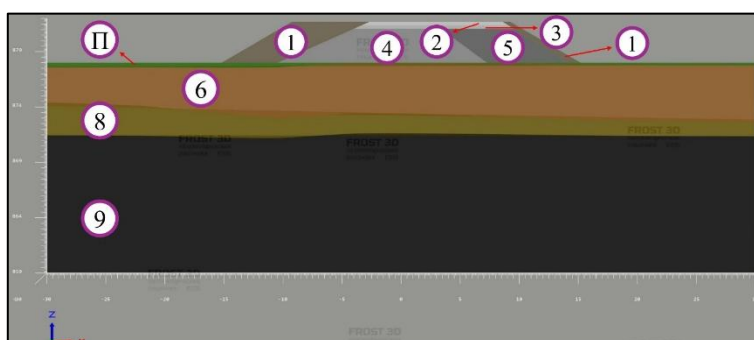
Расчётная модель была создана для поперечного профиля на ПК 3567+83,99. На рисунках 3, 4 и 5 представлен трёхмерный вид модели и её поперечное сечение с цветовым разделением всех инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

Первой расчётной моделью (рис. 3) является упрощённая (с точки зрения геометрии) модель поперечного профиля на пикете 3567+83,99 развязки «Окурдан», с единственным существенным отличием — вместо материала каменной наброски в объекте была принята супесь — инженерно-геологический элемент под номером 7 (супесь пластичная, с включениями мелкой гальки кварцевого состава). Вторая расчётная модель (рис. 4) максимально близко эмитирует принятое конструктивно-технологическое решение «Челябжелдорпроект'а» — здесь на откосах материалом является каменная наброска. Третья расчётная модель (рис. 5) представляет собой более усложнённый вариант использования каменной наброски — с устройством коробов для засыпки скальными породами.



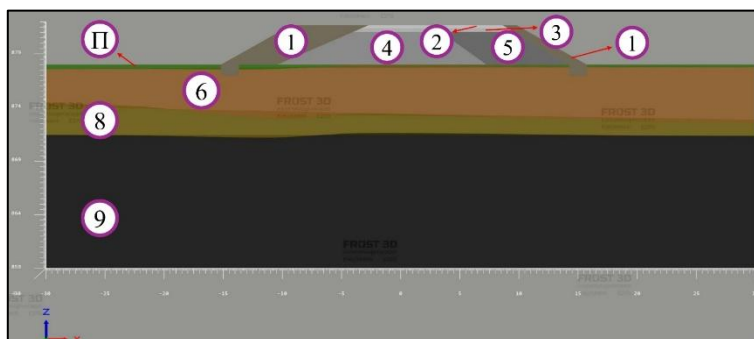
2 — щебень средний, крупный, гранитов, мигматитов, с песчаным заполнителем до 40 %; 3 — галечниковый грунт; 4 — щебенистый грунт с суглинистым твёрдым заполнителем более 30 %, с включением единичным глыб; 5 — глыбы, валуны, щебень с песчано-гравийным заполнителем; 6 — суглинок дресвяный, тугопластичный, с примесью органического вещества; 7 — супесь пластичная, с включением мелкой гальки кварцевого состава; 8 — суглинок дресвяный, тугопластичный; 9 — скальный грунт-алевролит с прослоями пластов каменных углей; П — почва

Рисунок 3. Цифровая расчётная модель поперечного профиля насыпи на ПК 3567+83,99, каменная наброска заменена на песок (ИГЭ-7) (разработано автором)



1 — каменная наброска; 2 — щебень средний, крупный, гранитов, мигматитов, с песчаным заполнителем до 40 %; 3 — галечниковый грунт; 4 — щебенистый грунт с суглинистым твёрдым заполнителем более 30 %, с включением единичным глыб; 5 — глыбы, валуны, щебень, с песчано-гравийным заполнителем; 6 — суглинок дресвяный, тугопластичный, с примесью органического вещества; 8 — суглинок дресвяный, тугопластичный; 9 — скальный грунт-алевролит с прослоями пластов каменных углей; П — почва

Рисунок 4. Цифровая расчётная модель поперечного профиля насыпи на ПК 3567+83,99, каменная наброска (принята в проекте) (разработано автором)



1 — каменная наброска; 2 — щебень средний, крупный, гранитов, мигматитов, с песчаным заполнителем до 40 %; 3 — галечниковый грунт; 4 — щебенистый грунт с суглинистым твёрдым заполнителем более 30 %, с включением единичным глыб; 5 — глыбы, валуны, щебень, с песчано-гравийным заполнителем; 6 — суглинок дресвяный, тугопластичный, с примесью органического вещества; 8 — суглинок дресвяный, тугопластичный; 9 — скальный грунт-алевролит с прослоями пластов каменных углей; П — почва

Рисунок 5. Цифровая расчётная модель поперечного профиля насыпи на ПК 3567+83,99, каменная наброска заменена клецевидной обоймой (разработано автором)

После заполнения базы данных материалов, физико-механических характеристик грунтов и создания расчётных моделей переходим к расчёту. В проектной документации указано, что все конструктивно-технологические решения приняты из условий эксплуатации железнодорожной линии на срок 49 лет, но мы заглянем чуть дальше. В расчётах дата ввода линии в эксплуатацию принята 15 января 2026 г., а крайняя расчётная дата — 15 июля 2076 г.

Перед получением результатов расчётов необходимо проанализировать графики изменений температур в некоторых точках. В качестве таких точек были взяты точки в середине насыпи с высотами от бермы:

- 0 метров;
- 9 метров;
- 19 метров.

На рисунке 6–8 представлены графики зависимости температуры от времени в вышеуказанных точках под первым путём (вариант с каменной наброской).

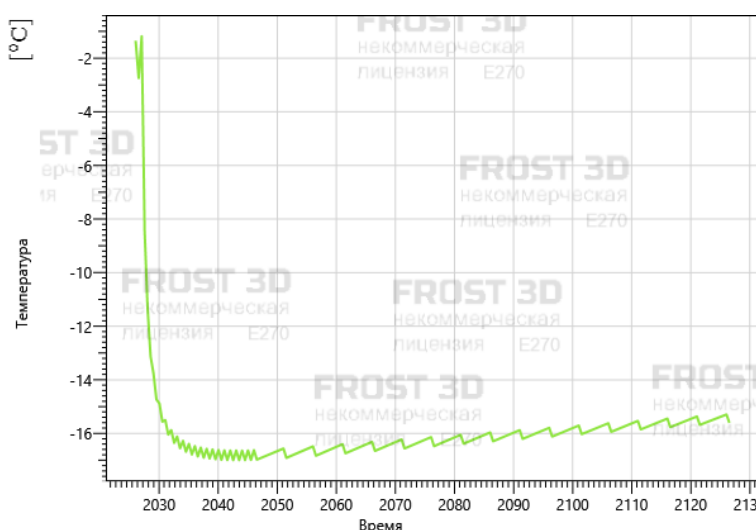


Рисунок 6. Изменение температуры со временем в точке (0 м; -30 м; 878 м). 0 м от бермы (разработано автором)

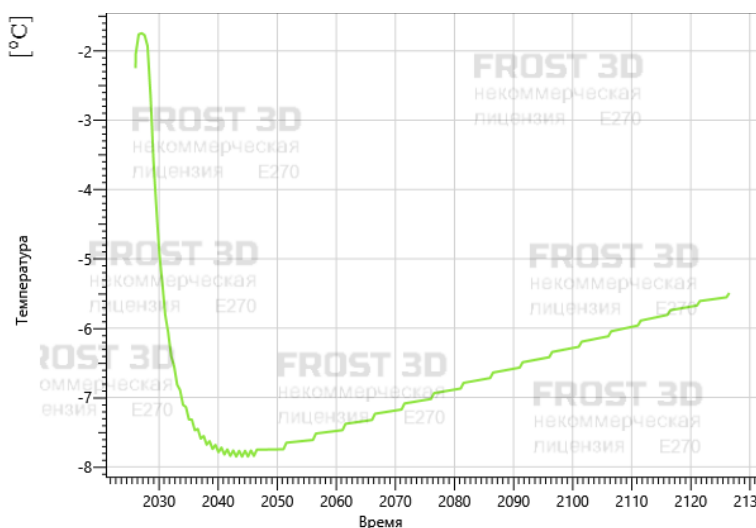


Рисунок 7. Изменение температуры со временем в точке (0 м; -30 м; 869 м). 9 м от бермы (разработано автором)

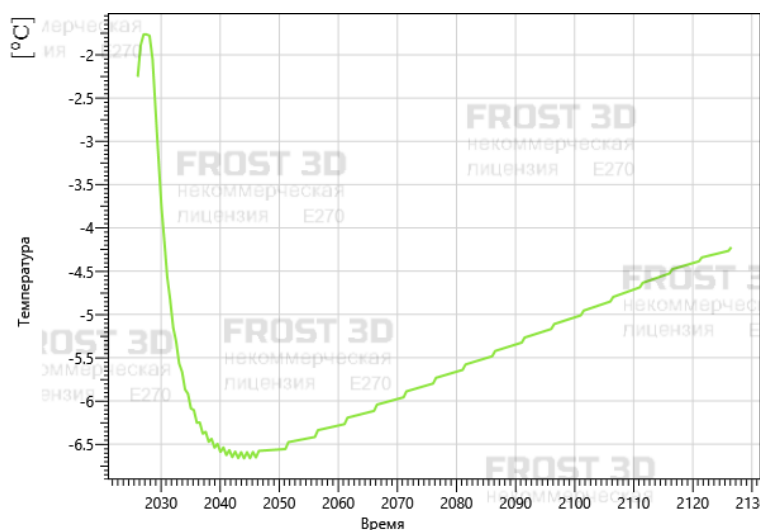


Рисунок 8. Изменение температуры со временем
в точке (0 м; -30 м; 859 м). 19 м от бермы (разработано автором)

По виду и характеру графиков можно сделать выводы, что характер отношения температуры ко времени идентичен во всех точках во всех вариантах КТР; а также, что во всех девяти случаях есть характерные точки (даты) состояния температуры. Такими датами являются:

- 15 января 2026 г. — начальное состояние;
- 15 января 2027 г. — начало понижения температуры;
- 15 января 2033 г. — начало стабилизации разницы температур;
- 15 января 2042 г. — достигнута полная стабилизация разницы температур;
- 15 января 2051 г. — начало потепления с постоянной скоростью $+0,15^{\circ}\text{C}$ за 5 лет;
- 15 июля 2076 г. — конец расчётного периода (скорость потепления осталась такой же).

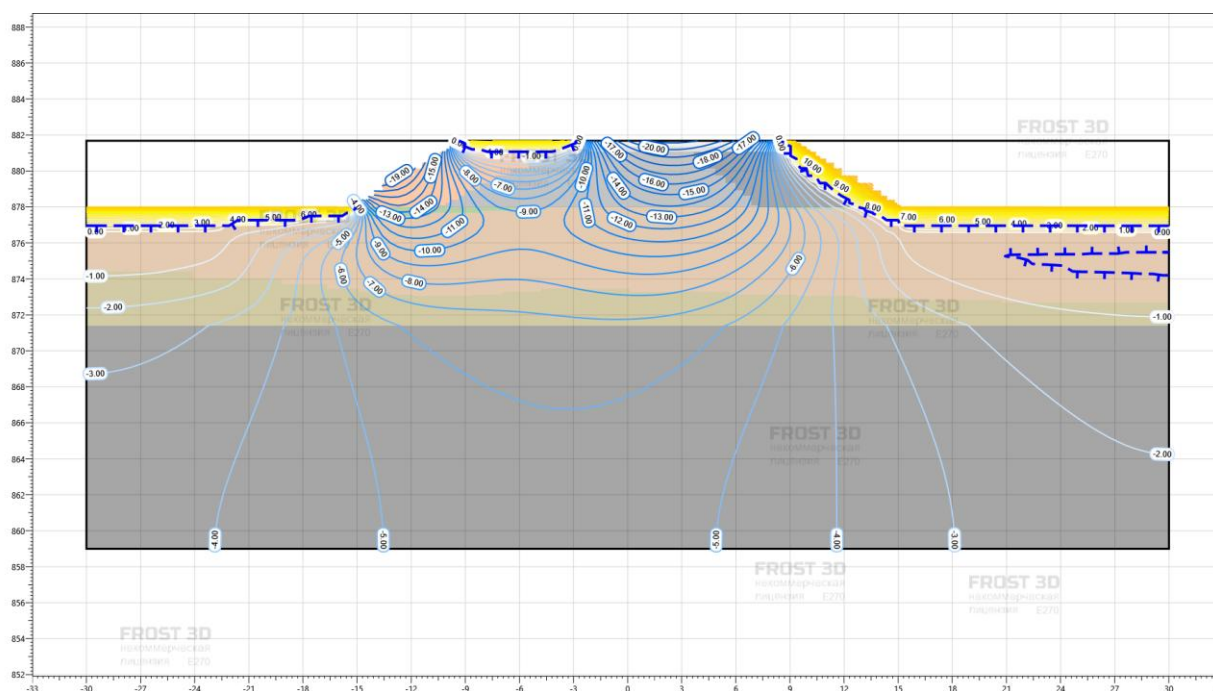
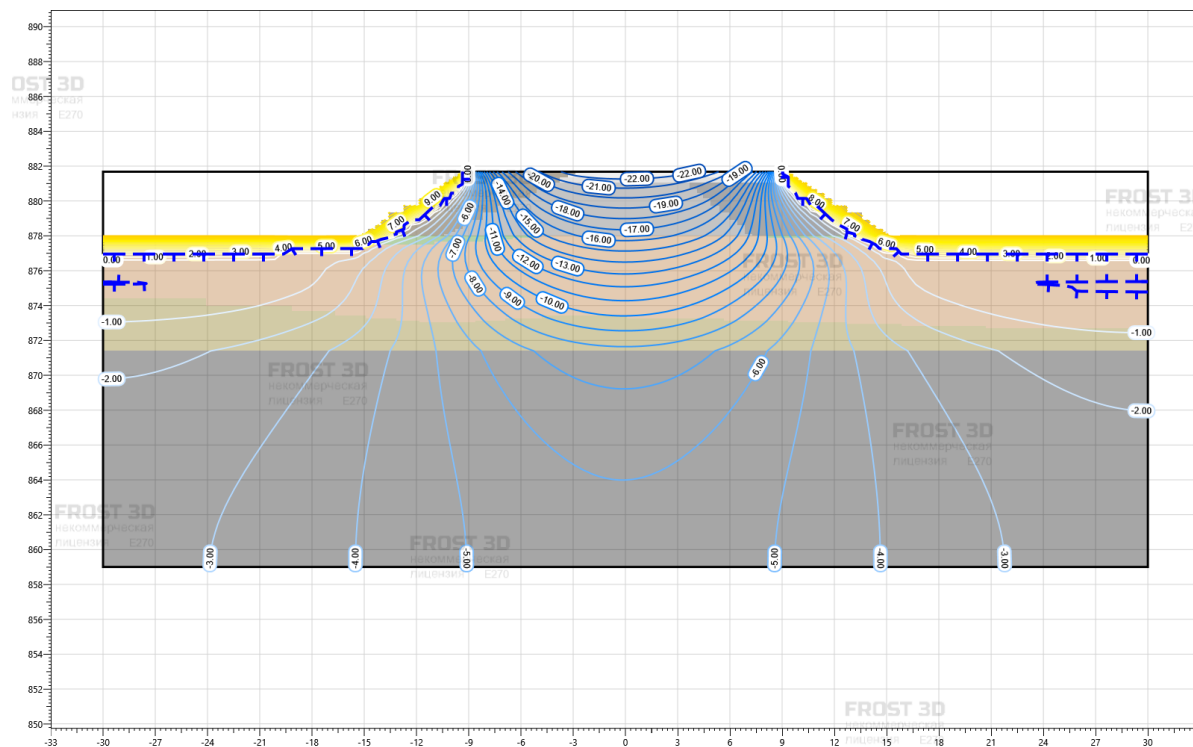
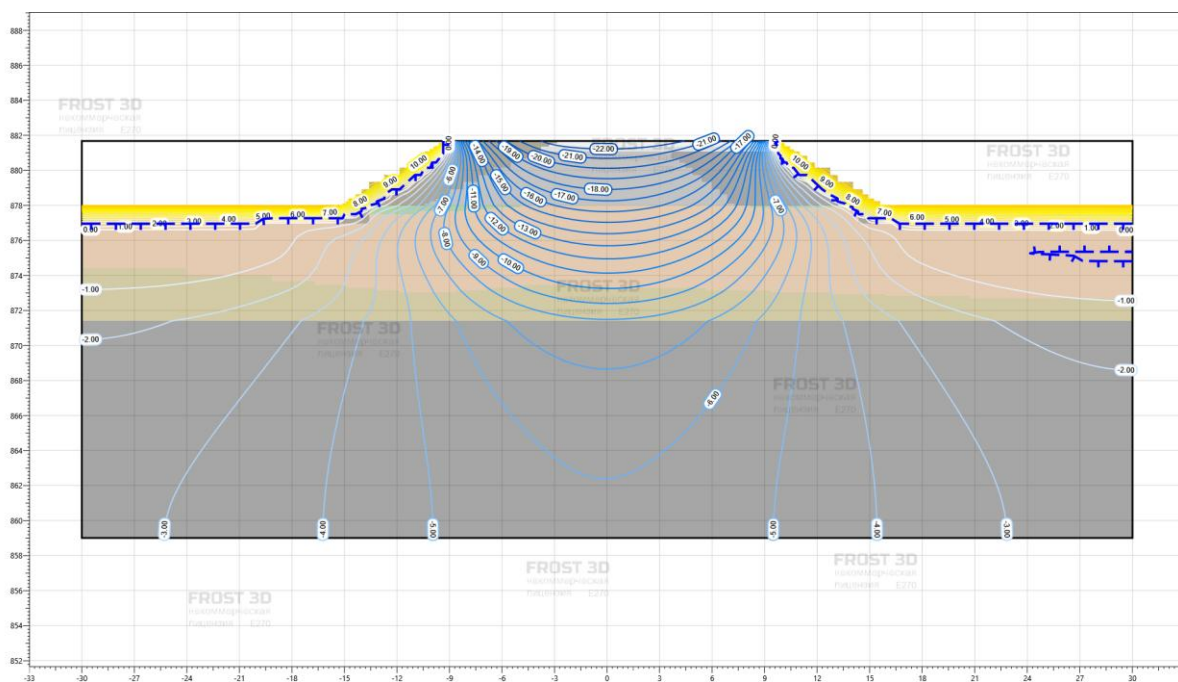


Рисунок 9. Распределение температуры (песок) на 15.07.2076 (разработано автором)

По этим датам будем ориентироваться для выявления представляемых результатов расчёта. На рисунке 9 представлено температурное распределение поперечного профиля железнодорожной насыпи на ПК 3567+83,99 для варианта с заменой каменной наброски на песок. На рисунке 10 представлено температурное распределение для варианта с каменной наброской. На рисунке 11 представлено температурное распределение для варианта с клещевидной обоймой.



*Рисунок 10. Распределение температуры
(каменная наброска) на 15.07.2076 (разработано автором)*



*Рисунок 11. Распределение температуры
(клещевидная обойма) на 15.07.2076 (разработано автором)*

Как мы видим из представленных изображений, по термостабилизации вариант с заменой каменной наброски на песок (ИГЭ-7) сильно проигрывает остальным вариантам. Визуально можем наблюдать отсутствие симметричности изолиний. При условии, что насыпь проектируется с расчётом на относительную симметричность постоянных и временных нагрузок — такое температурное распределение может категорически негативно сказаться на способности насыпи выдерживать вес рельсошпальной решётки и подвижного состава.

Помимо термостабилизации, важным аспектом обеспечения надёжности земляного полотна на многолетнемёрзлых грунтах является механическое усиление грунтов основания. Как показано в работе [14], применение технологий струйной цементации и устройства вертикальных столбов из щебня позволяет существенно повысить коэффициент устойчивости откосов (с 1,251 до 1,446 и 1,314 соответственно) и снизить вертикальные перемещения конструкции. При этом, для участков с высокими требованиями к несущей способности предпочтительнее струйная цементация, тогда как вертикальные столбы из щебня являются более универсальным и экономичным решением, особенно для негрузонапряжённых участков.

Как показывают современные исследования, для выявления полной картины формирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) и зон локализации деформаций, особенно в выемках и насыпях, необходимо использовать численные методы, например, метод конечных элементов (МКЭ) [15]. Для более детального анализа гидрогеомеханических процессов, характерных для криолитозоны (фильтрация, консолидация, долговременные деформации), а также для корректного прогноза осадок во времени, необходимо учитывать процессы консолидации оттаивающих грунтов основания [16].

В целях рассмотрения возможного решения проблемы нарушения температурного режима внутри тела железнодорожной насыпи, где на откосах использовался песок, — был выполнен аналогичный расчёт, но с устройством двух СОУ по бокам, на расстоянии 16 м и 17 м слева и справа от оси первого пути соответственно. Результаты данного расчёта могли бы прояснить характер действия СОУ, а также целесообразность его использования при данном выборе КТР [17].

В качестве сезоннодействующего устройства выступает вертикальный термостабилизатор (термоколонка), технические характеристики которого представлены в таблице 10.

Таблица 10

Технические характеристики термостабилизатора

Конденсатор	
Диаметр, мм	34
Длина надземной части, м	1,5
Оребрение конденсатора	
Тип оребрения	поперечное, круглое
Диаметр рёбер, мм	70
Шаг рёбер, мм	2,5
Число рёбер, шт.	300
Толщина рёбер, мм	1
Материал рёбер	Алюминий
Теплопроводность, Вт/(м·К)	203,5
Испаритель	
Диаметр, мм	34
Длина подземной части, м	12
Длина теплоизолированного участка, м	2

Разработано автором

После проведённого расчёта можно сделать вывод, что графики зависимости температур (рис. 12) имеют тот же вид, что и в других расчётах. Характер температурного распределения представлен на рисунке 13.

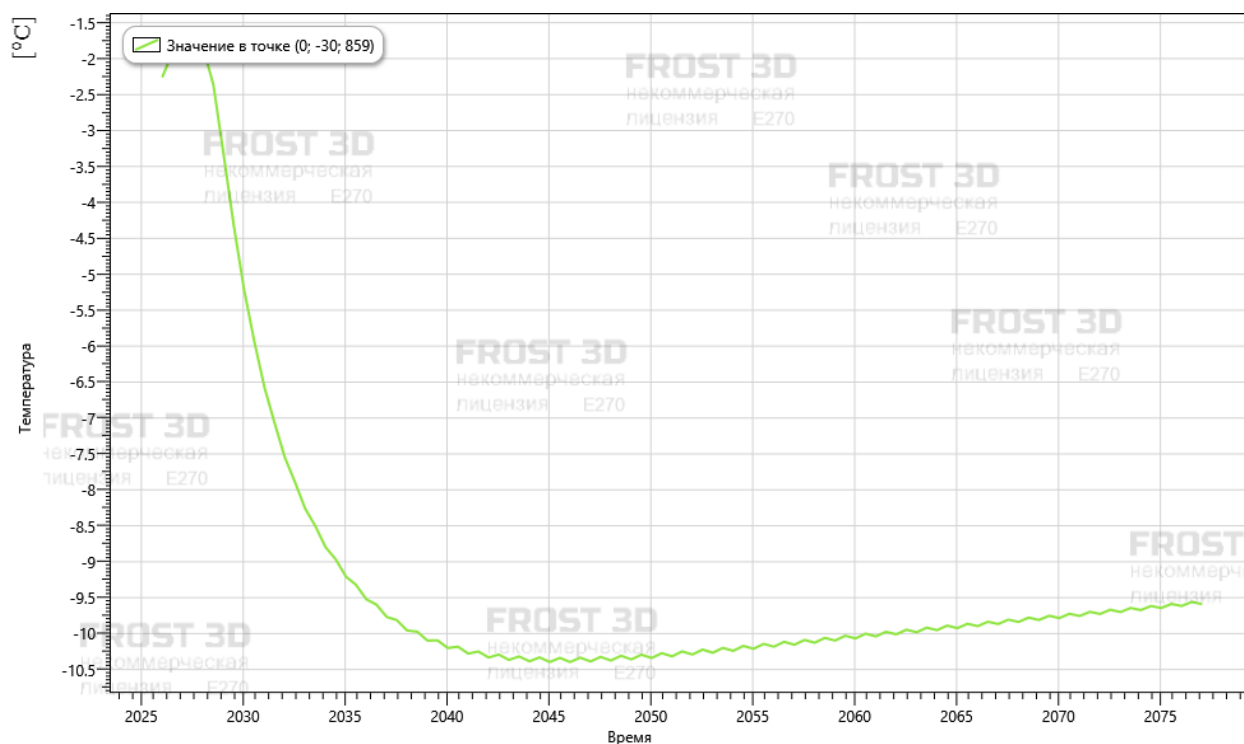


Рисунок 12. Изменение температуры со временем в точке (0 м; -30 м; 878 м) (разработано автором)

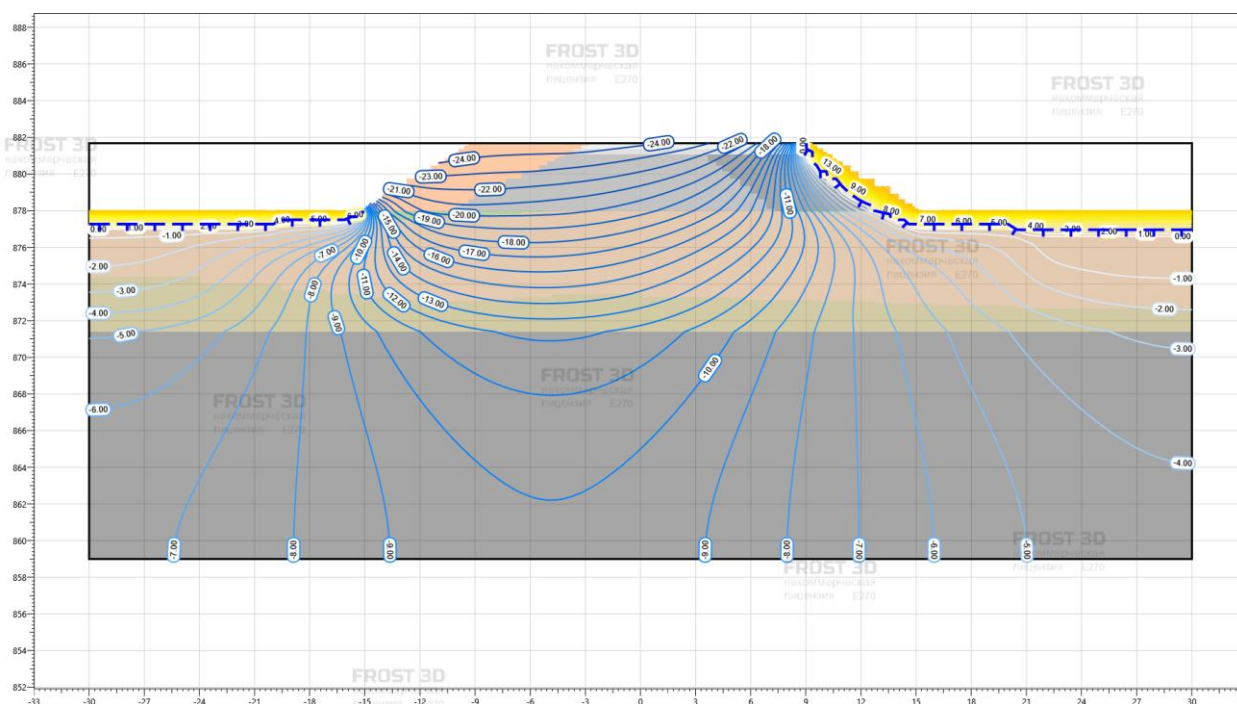


Рисунок 13. Распределение температуры (песок с установкой СОУ) на 15.01.2076 (разработано автором)

Заключение

Сравнивая рисунки 9–11 и 13 можно сделать вывод, что с точки зрения термостабилизации применение СОУ как вариант КТР является наиболее эффективным.

В целях достижения максимального термостабилизирующего эффекта рассматриваются варианты комбинированного применения каменной наброски и сезонно-действующих охлаждающих устройств. Как показано в [7], комплексное использование этих двух технологий позволяет не только сохранить, но и активно укрепить термический режим мерзлого основания, создавая принцип «двойного охлаждения»: каменная наброска регулирует тепловой поток в поверхностных слоях, создавая условия для интенсивной работы СОУ, которые, в свою очередь, отводят тепло из глубоких горизонтов основания. Однако, как было сказано ранее, устройство СОУ предусматривается лишь в тех случаях, когда без них обойтись невозможно (СП 25.13330.2020²).

Для проектного решения с устройством на откосах каменной наброски (рис. 8) результаты теплофизического моделирования демонстрируют полное соответствие I принципу использования многолетнемерзлых грунтов (сохранение их в мерзлом состоянии).

Анализ графиков изменения температуры в характерных точках показывает устойчивую отрицательную динамику. В период с 2026 по 2033 гг. происходит активное выхолаживание основания, о чем свидетельствует снижение среднегодовой температуры в точке с координатами (0 м; -30 м; 878 м) с $-1,35^{\circ}\text{C}$ до $-16,11^{\circ}\text{C}$. После 2042 г. наступает фаза стабилизации, когда разница между зимними и летними температурами практически нивелируется. Важно отметить, что даже к концу расчётного периода (15.07.2076 г.) температуры во всех точках остаются устойчиво отрицательными (от $-4,22^{\circ}\text{C}$ до $-15,76^{\circ}\text{C}$ в зависимости от удаления от насыпи). Это доказывает, что каменная наброска благодаря эффекту «теплового диода» не только блокирует поступление тепла летом, но и аккумулирует холод в зимний период, обеспечивая долговременную температурную стабильность.

Третий рассмотренный вариант, представляющий собой усовершенствованную конструкцию с устройством коробов для каменной наброски (клещевидная обойма), демонстрирует наилучшие показатели термостабилизации (рис. 9). Анализ графиков температурных кривых для этого КТР показывает, что процесс термостабилизации здесь происходит несколько быстрее, чем в варианте с обычной каменной наброской, а итоговые температуры в основании оказываются ниже. В частности, в точке (0 м; -30 м; 859 м) к 15.07.2076 г. фиксируется температура $-5,88^{\circ}\text{C}$, что на $0,15^{\circ}\text{C}$ ниже, чем для варианта с обычной каменной наброской на откосах без коробов. Это объясняется дополнительным охлаждающим эффектом за счёт увеличенной поверхности теплообмена и более интенсивной конвекции воздуха в расширенных полостях обоймы. Однако, несмотря на некоторое улучшение теплофизических показателей, практическая выгода от применения клещевидной обоймы не является критической для обеспечения работоспособного состояния насыпи. Как показали расчёты, стандартная каменная наброска уже гарантирует сохранение отрицательной температуры грунтов на весь срок службы. Устройство же коробов требует дополнительных земляных работ, увеличения расхода скального материала и трудозатрат, что делает его экономически менее целесообразным при отсутствии специальных требований по механическому сдерживанию откоса, коих в действительности нет [18; 19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / Е. С. Ашпиз // Линейные сооружения в криолитозоне: материалы Всероссийской научно-практической конференции. — Чита: ЗабГУ, 2016. — С. 3–8. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26350948>. — EDN: [WEQOXZ](https://elibrary.ru/item.asp?id=26350948). (дата обращения: 02.05.2026).

2. Шепитько Т. В. Особенности теплотехнических расчетов земляного полотна в криолитозоне / Т. В. Шепитько, Е. С. Алексеенко // Вопросы строительной механики и надежности машин и конструкций: сборник научных трудов МАДИ. — М., 2012. — С. 120–125. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21776309>. — EDN: [SINUTL](https://elibrary.ru/item.asp?id=21776309). (дата обращения: 02.05.2026).
3. Луцкий С. Я. Регулирование технологических процессов стабилизации основания геотехнических сооружений / С. Я. Луцкий, Т. В. Шепитько, Е. С. Шепитько // Качество. Инновации. Образование. — 2017. — № 10. — С. 43–46. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30453066>. — EDN: [ZQKNDR](https://elibrary.ru/item.asp?id=30453066). (дата обращения: 02.05.2026).
4. Жданова С. М. Некоторые внедренные технологии ДВГУПС для стабилизации земляного полотна на железных дорогах Дальнего Востока / С. М. Жданова, О. А. Нератова, А. А. Пиотрович, Н. С. Нестерова // Путь и путевое хозяйство. — 2013. — № 1. — С. 24–28. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75178180>. — EDN: [PXRILP](https://elibrary.ru/item.asp?id=75178180). (дата обращения: 02.05.2026).
5. Шепитько Т. В. Технологическое обоснование конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением экспертной системы / Т. В. Шепитько, А. В. Полянский, И. А. Артюшенко, А. С. Ноздрачев // Нанотехнологии в строительстве. — 2025. — Т. 17, № 6. — С. 760–774. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88623614>. — DOI: [10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774](https://elibrary.ru/item.asp?id=88623614). — EDN: [TBQTFA](https://elibrary.ru/item.asp?id=88623614). (дата обращения: 02.05.2026).
6. Зайцев А. А. Исследование грунтов основания Красноярского края и способ их усиления / А. А. Зайцев, И. А. Артюшенко // Интернет-журнал "Транспортные сооружения". — 2020. — Т. 7, № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf>. — DOI: [10.15862/01SATS120](https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf). — EDN: [CNEWED](https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf). (дата обращения: 02.05.2026).
7. Артюшенко И. А. Комбинированное использование каменной наброски и сезонно-действующих охлаждающих устройств на железнодорожной насыпи, устраиваемой на многолетнемерзлых грунтах / И. А. Артюшенко, Д. А. Ворожко // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях: материалы II Международной научно-практической конференции. — М.: Дашков и К°, 2025. — С. 27–30. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=87683599>. (дата обращения: 02.05.2026).
8. Гаврилов И. И. Стабилизация конструкций железных дорог на многолетнемерзлых грунтах Северного широтного хода и Арктики / И. И. Гаврилов, С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов // Архитектура, строительство, транспорт. — 2026. — Т. 6, № 1. — С. 77–90. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=89211887>. — DOI: [10.31660/2782-232X-2026-1-77-90](https://elibrary.ru/item.asp?id=89211887). — EDN: [JUUKOQ](https://elibrary.ru/item.asp?id=89211887). (дата обращения: 02.05.2026).
9. Гончаров А. В. Формообразующие факторы материала каменной наброски для железнодорожных сооружений / А. В. Гончаров, А. А. Пиотрович // Наука и технический прогресс на железнодорожном транспорте: сборник научных трудов. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. — С. 22–26. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21577667>. (дата обращения: 02.05.2026).
10. Гаврилов И. И. Способы мониторинга температуры в вечноммерзлых грунтах / И. И. Гаврилов, Д. Ю. Кропачев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2014. — № 4. — С. 63–69. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21788540>. (дата обращения: 02.05.2026).

11. Аркин В. И. Пороговые правила остановки диффузионных процессов и задача Стефана / В. И. Аркин, А. Д. Сластиков // Доклады Академии наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 247–250. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17928445>. — EDN: [PCINRT](#). (дата обращения: 02.05.2026).
12. Кудрявцев С. А. Комплексная оценка оснований фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах Дальнего Востока / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, В. Ю. Шемякин // Экспериментальные и теоретические исследования работы оснований и фундаментов: сборник научных трудов. — [Место издания неизвестно], 2024. — С. 82–88. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80449159>. — EDN: [FLVUCP](#). (дата обращения: 02.05.2026).
13. Ноздрачёв А. С. Результаты оценки инженерно-геологических условий подходного участка к мосту линии "Обская — Бованенково" / А. С. Ноздрачёв, А. А. Зайцев, А. В. Семочкин // Материалы шестой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов "Инженерные изыскания в строительстве". — Москва, 2024. — С. 161–168. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68615020>. — EDN: [GPAJED](#). (дата обращения: 02.05.2026).
14. Шепитько Т. В. Анализ влияния технологий усиления основания земляного полотна на устойчивость сооружения, проектируемого на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах / Т. В. Шепитько, И. А. Артюшенко, В. Ю. Акулич [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. — 2025. — Т. 17, № 4. — С. 415–426. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82835386>. — DOI: [10.15828/2075-8545-2025-17-4-415-426](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-415-426). — EDN: [CCATHQ](#). (дата обращения: 02.05.2026).
15. Горшков Н. И. Оценка устойчивости грунтовых дорожных откосов, выемок и насыпей численными методами / Н. И. Горшков, Ц. Юань, С. М. Жданова // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. — 2025. — № 1. — С. 33–40. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82104619>. — DOI: [10.31079/2415-8658-2025-1-33-40](https://doi.org/10.31079/2415-8658-2025-1-33-40). — EDN: [WTKAOA](#). (дата обращения: 02.05.2026).
16. Ашпиз Е. С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты / Е. С. Ашпиз, Т. С. Вавринюк // Мир транспорта. — 2012. — № 3 (41). — С. 102–107. — URL: <https://mirtrans.ru/jour/article/view/377>. — EDN: [PCDSHT](#). (дата обращения: 02.05.2026).
17. Liu J. Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost / J. Liu, Y. Tian // Cold Regions Science and Technology. — 2002. — № 35. — С. 1–13. — DOI: [10.1016/S0165-232X\(02\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00028-9). — EDN: [LOPLOJ](#). (дата обращения: 02.05.2026).
18. Zhang Yu. Reinforcement effects of ground treatment with dynamic compaction replacement in cold and saline soil regions / Yu. Zhang, J. Liu, J. Fang, A. Xu // Sciences in Cold and Arid Regions. — 2013. — Т. 4. — С. 440. — DOI: [10.3724/SP.J.1226.2013.00440](https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2013.00440). (дата обращения: 02.05.2026).
19. Chen J.-F. Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment / J.-F. Chen, L.-Y. Li, J.-F. Xue, S.-Z. Feng // Geotext. Geomembr. — 2015. — Т. 43. — С. 424–431. — DOI: [10.1016/j.geotexmem.2015.04.016](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.016). (дата обращения: 02.05.2026).

Artyushenko Igor Aleksandrovich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

E-mail: tywka351@mail.ru

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

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

Panteleev Timur Mikhailovich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

E-mail: panteleev-tm@rut-miit.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1345574

Analysis of the influence of rockfill (stone blanket) technology on thermophysical processes in the subgrade base composed of permafrost soils

Abstract. The construction of transport infrastructure facilities in permafrost regions is a complex engineering challenge. In accordance with the Transport Strategy of the Russian Federation up to 2030 with a forecast for the period up to 2035, the key development priorities are increasing the spatial connectivity of territories, increasing the volume and speed of transit cargo, as well as the digital and low-carbon transformation of the industry. In the context of implementing these objectives, the development of the Eastern range of railways, the Baikal-Amur Mainline, and the Trans-Siberian Railway, a significant portion of which passes through challenging engineering and geological conditions, becomes particularly important.

This article examines the analysis of the rockfill (stone blanket) technology as an effective structural and technological solution from the perspective of thermal stabilization, its types, as well as its influence on physical-mechanical and thermal stabilization processes when used in permafrost regions (using the example of a section of the Far Eastern Railway). To demonstrate the effectiveness of rockfill (in terms of stability, resistance to subgrade deformations occurring both due to permanent and temporary loads, as well as due to the temperature dynamics inside and outside the subgrade), a section of the Far Eastern Railway — «Okurdan Crossing» — was selected. The article presents the results of calculations of digital models of the railway embankment at Okurdan Crossing, performed using the «Frost 3D» software package (calculating the long-term effectiveness of thermal stabilization of the subgrade body). To compare the calculation results, thermophysical modeling was performed both with and without the use of rockfill.

Keywords: transport; soil thermal stabilization; permafrost soils; construction; railway; subgrade; cryolithozone; rockfill (stone blanket)