

Научная статья
УДК 624.139
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_78

Метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне

Егор Игоревич Нагаев^{1✉}, Денис Алексеевич Разуваев²,

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ einagaev@mail.ru✉

² razdenis@mail.ru

Аннотация. Эксплуатация железнодорожных насыпей в криолитозоне сопровождается деградацией многолетне-мерзлых грунтов основания, развитием термических просадок и деформаций морозного пучения. Традиционные сезонно действующие охлаждающие устройства обладают принципиальным ограничением – длительным временем выхода на проектный режим, в течение которого накапливаются просадки и развиваются деформации морозного пучения в водонасыщенных глинистых грунтах основания. Указанное ограничение обусловлено зависимостью скорости промерзания от коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, теплофизических характеристик грунтового массива и климатических условий участка.

Разработан метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне, включающий активную и пассивную стадию работы, охватывающий полный цикл – от анализа исходных геокриологических данных до обоснования параметров стадий работы охлаждающих устройств. Алгоритм представляет собой замкнутую итерационную процедуру, на каждом этапе которой принятые проектные решения проверяются на соответствие нормативным требованиям по деформациям морозного пучения и долгосрочной термодинамической устойчивости грунтового массива.

Предложен способ расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации основания, основанный на эмпирической логарифмической зависимости объемного коэффициента пучения от радиальной скорости промерзания и численном моделировании напряженно-деформированного состояния системы «насыпь – основание».

Введен критерий выбора коэффициента теплообмена пассивной стадии, определяющий допустимый диапазон и обеспечивающий долгосрочное поддержание сформированной зоны отрицательных температур без оттаивания и без развития деформаций морозного пучения сверх предельно допустимого значения с учетом прогнозируемого потепления климата. Предложен подход к определению эквивалентного коэффициента теплообмена комбинированных термостабилизаторов с использованием жидкого азота на основе критерия Нуссельта, позволяющий переносить результаты лабораторных испытаний на натурные объекты с измененными геометрическими параметрами без проведения повторных экспериментов.

Верификация предложенного способа расчета выполнена на опытном полигоне «Семь лиственниц» в Ямало-Ненецком автономном округе. Сопоставление расчетных вертикальных перемещений с натурными данными геокриологического мониторинга показало их количественное согласование, что подтверждает достоверность предложенного способа расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации глинистых грунтов охлаждающими устройствами.

Ключевые слова: земляное полотно, многолетне-мерзлые грунты, термостабилизация, сезонно действующие охлаждающие устройства, морозное пучение, коэффициент теплообмена

Для цитирования: Нагаев Е. И., Разуваев Д. А. Метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 78–86. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_78.

Original article

Design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone

Egor I. Nagaev^{1✉}, Denis A. Razuvaev²,

^{1, 2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ einagaev@mail.ru✉

² razdenis@mail.ru

Abstract. The operation of railway roadbeds in permafrost regions is accompanied by degradation of the frozen foundation soils, development of thermal subsidence and frost heave deformations. Traditional seasonally operating cooling devices have a fundamental limitation a long time to reach the design mode, during which subsidence accumulates and frost heave deformations develop in water-saturated clayey foundation soils. This limitation is due to the dependence of the freezing rate on the heat transfer coefficient of the cooling device, thermophysical characteristics of the soil mass, and climatic conditions of the site.

A design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone has been developed, covering the full cycle from analysis of initial geocryological data to justification of the parameters of the active and passive stages of cooling device operation. The algorithm represents a closed iterative procedure, at each stage of which the adopted design decisions are verified against regulatory requirements for frost heave deformations and long-term thermodynamic stability of the soil mass.

A method for calculating frost heave deformations during foundation thermal stabilization has been proposed, based on an empirical logarithmic dependence of the volumetric heave coefficient on the radial freezing rate and numerical modeling of the stress-strain state of the roadbed-foundation system.

A criterion for selecting the heat transfer coefficient of the passive stage has been introduced, defining the permissible range and ensuring long-term maintenance of the formed negative temperature zone without thawing and without development of frost heave deformations beyond the maximum allowable value, accounting for predicted climate warming.

An approach to determining the equivalent heat transfer coefficient of combined thermal stabilizers using liquid nitrogen, based on the Nusselt criterion, has been proposed, enabling the transfer of laboratory test results to full-scale objects with modified geometric parameters without conducting repeated experiments.

Verification of the proposed calculation method was performed at the 'Seven Larches' test site in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Comparison of the calculated vertical displacements with field geocryological monitoring data demonstrated their quantitative agreement, confirming the reliability of the proposed method for calculating frost heave deformations during thermal stabilization of clayey soils with cooling devices.

Keywords: railway roadbed, permafrost soils, thermal stabilization, seasonally intensive cooling devices, frost heave, heat transfer coefficient

For citation: Nagaev E. I., Razuvaev D. A. Design method for combined thermal stabilization of the railway roadbed foundation of transport structures in the permafrost zone. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):78–86. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_78.

Введение

Термостабилизация многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) основания земляного полотна железных дорог в криолитозоне является задачей, решение которой определяет эксплуатационную надежность и безопасность транспортных сооружений. В условиях наблюдаемого потепления климата [1, 2], при котором среднегодовая температура воздуха в арктических районах возрастает со скоростью до 0,07 °C в год, деградация ММГ приобретает устойчивый и нарастающий характер, что обуславливает развитие неравномерных осадок, потерю устойчивости откосов насыпи и расстройство железнодорожного пути.

Наиболее распространенным методом термостабилизации грунтов оснований транспортных сооружений являются сезонно действующие охлаждающие устройства (СОУ) [3, 4], функционирующие по принципу теплового диода за счет парорефрижераторного цикла хладагента. Вместе с тем практика эксплуатации железных дорог в криолитозоне показывает, что традиционные СОУ обладают принципиальным ограничением [5]. Время выхода системы на проектный температурный режим составляет, как правило, от одного года до нескольких лет, в зависимости от коэффициента теплообмена

устройства и геокриологических условий участка [6]. В этот период накапливаются термические просадки, снижение несущей способности оттаявших глинистых грунтов создает угрозу потери общей устойчивости насыпи, а промерзание водонасыщенных глинистых грунтов в зоне влияния охлаждающих устройств сопровождается развитием деформаций морозного пучения.

Помимо этого, процесс промерзания водонасыщенных глинистых грунтов в зоне влияния охлаждающих устройств сопровождается развитием деформаций морозного пучения [7–9]. Неравномерный подъем основной площадки земляного полотна вызывает расстройство рельсовой колеи и требует проведения регулярных выправочно-подбивочных работ.

Для устранения указанных недостатков разработан комбинированный способ термостабилизации [10], основанный на реализации принципов теплового трансформатора и теплового диода в единой технологической последовательности. Способ предусматривает два последовательных этапа: активное замораживание грунтового массива с использованием жидкого азота, обеспечивающее оперативное формирование устойчивой зоны отрицательных температур заданного радиуса за минимально

возможное время, и последующий переход в пассивный режим поддержания мерзлого состояния грунтов по принципу парожидкостного СОУ без затрат внешней энергии.

Практическая реализация комбинированного способа требует научно обоснованного метода проектирования, учитывающего взаимосвязь между параметрами охлаждающих устройств, скоростью промерзания, интенсивностью морозного пучения и деформациями основной площадки земляного полотна.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна, включающего расчет деформаций морозного пучения, обоснование параметров пассивного режима работы охлаждающих устройств и определение эквивалентного коэффициента теплообмена при использовании жидкого азота.

Методы исследования

Разработанный метод проектирования представлен в виде алгоритма последовательно связанных действий и условий выбора проектных решений (рис. 1), охватывающего полный цикл – от анализа исходных данных до окончания стабилизации. Алгоритм дополняет действующие нормативные документы в области строительства транспортных сооружений в криолитозоне.

Процесс проектирования начинается с анализа исходных данных и формирования расчетных моделей, включающих литологический состав и состояние грунтов, глубину залегания ММГ, уровень грунтовых вод, климатические характеристики региона, а также конструктивные особенности земляного полотна. На основе сформированных моделей выполняются расчеты коэффициента устойчивости откосов насыпи $K_{уст}$ и термической просадки S_{th} . Полученные значения сопоставляются с нормативными требованиями: коэффициент устойчивости оценивается в соответствии требованиями [11], а предельные значения термической просадки – согласно нормативным документам для железнодорожных линий соответствующего класса [12].

Если оба условия выполнены, т. е. $K_{уст}$ превышает нормативное значение, а прогнозируемая термическая просадка S_{th} не превышает допустимых пределов, участок признается

стабильным и переводится в режим периодических наблюдений. В случае, когда прогнозируемая термическая просадка превышает нормативный порог при удовлетворительном коэффициенте устойчивости, принимается решение о сохранении положения кровли ММГ традиционными способами в соответствии с действующими нормативными методиками. Если же коэффициент устойчивости оказывается ниже нормативного уровня вне зависимости от текущего значения просадки, принимается решение о восстановлении границы ММГ до исходного положения и выше.

На этапе проектирования восстановления границы ММГ прежде всего устанавливается требуемое время термостабилизации T , определяемое исходя из сроков проведения ремонтных работ. По зависимостям, установленным в ходе численного моделирования [13], для заданного времени T определяется требуемый коэффициент теплообмена $\alpha_{пр}$ охлаждающих устройств. По результатам теплового моделирования устанавливается требуемый радиус промерзания R_{fr} , а радиальная скорость промерзания V_{fr} определяется из соотношения требуемого радиуса промерзания и заданного времени термостабилизации T .

Далее проводится оценка деформаций морозного пучения, возникающих в процессе термостабилизации водонасыщенных глинистых грунтов основания. Для этого используется эмпирическая зависимость, полученная в ходе масштабного лабораторного эксперимента [7], описывающая связь объемного коэффициента морозного пучения ξ_v с радиальной скоростью промерзания V_{fr} логарифмической функцией.

Полученное значение объемного коэффициента пучения служит исходным параметром для геотехнического моделирования НДС системы «насыпь – основание». В зоне промерзания задается принудительное увеличение объема, пропорциональное установленному коэффициенту ξ_v , после чего численным методом конечных элементов определяется прогнозируемая величина вертикального подъема $h_{пуч}$ на основной площадке земляного полотна.

При многорядной установке СОУ в водонасыщенных глинистых грунтах основания земляного полотна промораживаемый грунт объемом Q_{fr} стремится к увеличению объема $Q_{пуч}$. По крайним рядам охлаждающих устройств часть объемного расширения может быть частично

скомпенсирована горизонтальным выдавливанием грунта в стороны. Однако в центральной зоне, непосредственно под основной площадкой, боковое смещение грунта ограничено, вследствие чего объемное увеличение реализуется

преимущественно в виде направленного вертикального подъема поверхности. Принципиальная схема, иллюстрирующая пространственное распределение зоны промерзания и характер реализации деформаций, представлена на рис. 2.

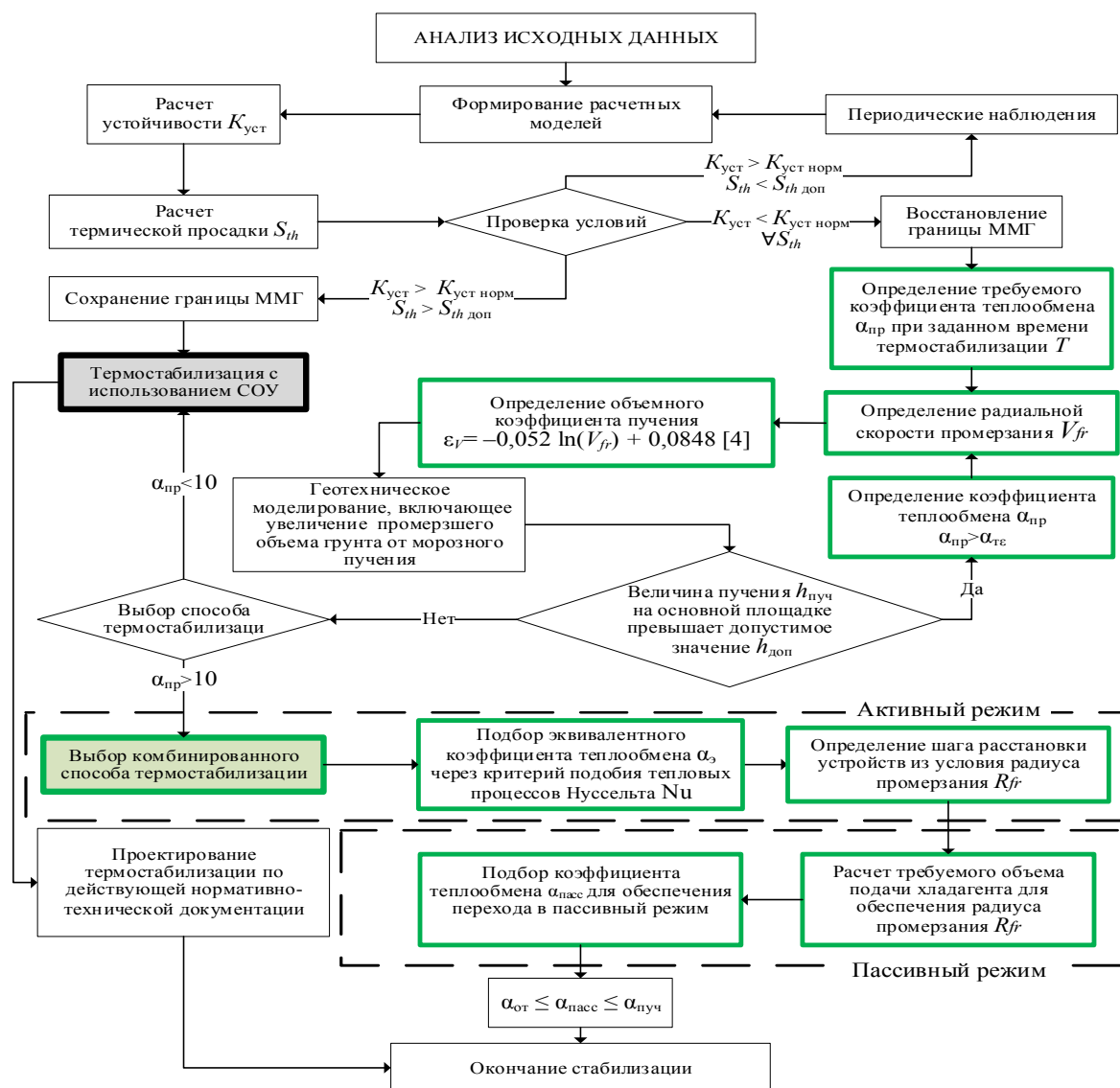


Рис. 1. Алгоритм проектирования комбинированного способа

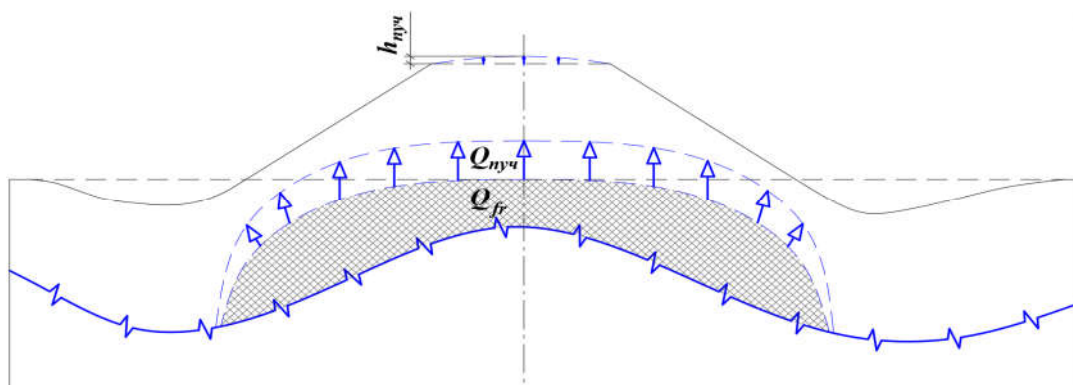


Рис. 2. Принципиальная схема для определения вертикального подъема $h_{пуч}$ на основной площадке

Для количественной оценки вертикального подъема $h_{\text{пуч}}$ на основной площадке выполняется расчет НДС системы «насыпь – основание» методом конечных элементов. Исходными данными для расчета служат геометрия зоны промерзания, полученная по результатам теплового моделирования, физико-механические характеристики грунтов, установленные в ходе инженерно-геологических изысканий, а также значение объемного коэффициента морозного пучения ξ_V , определенное по эмпирической зависимости, приведенной в работе [7]. В зоне промерзания задается принудительное увеличение объема согласно коэффициенту ξ_V . Узлы конечных элементов, ограничивающие промерзшую область, смещаются таким образом, чтобы суммарный объем этой области увеличился на величину, соответствующую расчетному пучению. При этом нижняя граница зоны промерзания принимается неподвижной, вертикальные компоненты перемещений преобладают в центральной части под осью пути, а на периферии у крайних рядов устройств допускаются небольшие горизонтальные составляющие.

Полученное расчетное значение $h_{\text{пуч}}$ сопоставляется с нормой порогового значения для основной площадки согласно [12]. Если прогнозируемый подъем не превышает нормативного значения, выполняется выбор способа термостабилизации в зависимости от величины требуемого коэффициента теплообмена.

При $\alpha_{\text{пр}} < 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ принимается решение о проектировании традиционных СОУ, при $\alpha_{\text{пр}} > 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – о применении комбинированного способа, основанное на результатах исследования влияния коэффициента теплообмена [13]. При превышении $h_{\text{доп}}$ выполняется итерационный подбор $\alpha_{\text{пр}}$ в сторону увеличения, что соответствует повышению радиальной скорости промерзания $V_{\text{пр}}$ и снижению объемного коэффициента пучения ξ_V .

При выборе комбинированного способа термостабилизации для подбора эквивалентного коэффициента теплообмена α_3 системы с жидким азотом предлагается применять нетрадиционный подход, основанный на теории подобия с использованием критерия Нуссельта, вычисляемого по формуле (1). Данный подход позволяет перенести результаты лабораторных испытаний [7, 10] на натурные объекты с измененными геометрическими пара-

метрами без проведения серии повторных экспериментов.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; d – диаметр охлаждающего устройства, м; λ – коэффициент теплопроводности.

Принципиальное различие между СОУ и системой с жидким азотом состоит в определяющем механизме теплопереноса. Для СОУ им является внешний конвективный теплообмен конденсатора с атмосферным воздухом, тогда как для системы с жидким азотом это интенсивное фазовое превращение хладагента внутри устройства. По экспериментально установленным коэффициентам теплообмена $\alpha_{\text{СОУ}} = 3,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $\alpha_{\text{азот}} = 46 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [10] для устройства диаметром $d = 0,038 \text{ м}$ вычислены соответствующие числа Нуссельта: $\text{Nu}_{\text{СОУ}} = 5,45$ и $\text{Nu}_{\text{азот}} = 12,76$. Их отношение представляет собой эмпирический коэффициент интенсификации относительного преимущества системы с жидким азотом в интенсивности теплопереноса:

$$R_{\text{Nu}} = \frac{\text{Nu}_{\text{азот}}}{\text{Nu}_{\text{СОУ}}}. \quad (2)$$

Тогда для проектного устройства с диаметром d_n и коэффициентом теплообмена $\alpha_{\text{СОУ } n}$ эквивалентный коэффициент теплообмена системы с жидким азотом определяется как

$$\alpha_3 = \frac{R_{\text{Nu}} \text{Nu}_{\text{СОУ } n} \lambda_{\text{азот}}}{d_n}. \quad (3)$$

При практическом применении формулы (3) следует учитывать, что теплопроводность жидкого азота $\lambda_{\text{азот}}$ варьируется в зависимости от степени чистоты хладагента, а в случае, когда активная и пассивная стадии реализуются устройствами разного диаметра, в расчет подставляются соответствующие значения. Например, для проектного устройства с $d_{\text{СОУ}} = 0,05 \text{ м}$, $\alpha_{\text{СОУ } n} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $d_{\text{азот}} = 0,05 \text{ м}$ при $\lambda_{\text{азот}} = 0,137 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ число Нуссельта составляет $\text{Nu}_{\text{СОУ } n} = 10,87$, а эквивалентный коэффициент теплообмена $\alpha_3 = 69,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Расчетный объем подаваемого хладагента на активной стадии устанавливается теплотехническим расчетом с учетом выявленного в ходе лабораторного эксперимента [10] эффекта инерционного промерзания, т. е. продолжения роста зоны отрицательных температур после прекращения подачи жидкого азота

за счет выравнивания температурного градиента между мерзлой и талой зонами.

После завершения активной стадии замораживания и достижения грунтовым массивом целевого температурного состояния система переводится в пассивный режим поддержания мерзлого состояния грунтов, функционирующий по принципу парожидкостного охлаждающего устройства. Задачей на данном этапе является подбор коэффициента теплообмена пассивной стадии $\alpha_{\text{пасс}}$, обеспечивающего долгосрочную термодинамическую устойчивость грунтового массива. Требования к $\alpha_{\text{пасс}}$ определяются двумя условиями: при значении ниже минимального коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{от}}$ начинается оттаивание сформированной зоны отрицательных температур, тогда как при значении выше максимального коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{пуч}}$, соответствующего предельно допустимому значению морозного пучения, избыточная интенсивность теплоотвода в холодный период года будет приводить к развитию деформаций морозного пучения. Оба граничных значения определяются с учетом прогнозируемого потепления климата на расчетный период, а $\alpha_{\text{пасс}}$ подбирается из условия

$$\alpha_{\text{от}} < \alpha_{\text{пасс}} < \alpha_{\text{пуч}}.$$

Таким образом, коэффициент $\alpha_{\text{пасс}}$ должен находиться в диапазоне, при котором среднегодовая температура грунта на границе ММГ остается стабильно отрицательной, но не опускается ниже значений, при которых возможно промерзание основания и интенсивность пучения превышает допустимую.

Разработанный алгоритм проектирования комбинированной термостабилизации представляет собой замкнутую итерационную процедуру, на каждом этапе которой принятые проектные решения проверяются на соответствие нормативным требованиям как по деформациям морозного пучения, так и по долгосрочной термодинамической устойчивости грунтового массива.

Верификация деформаций морозного пучения при термостабилизации

Для подтверждения достоверности предложенного способа расчета были проведены натурные наблюдения на опытном полигоне «Семь лиственниц», расположенном в Ямало-Ненецком автономном округе [14]. Выбор пло-

щадки обусловлен характерными для криолитозоны геокриологическими условиями.

Размещение охлаждающих устройств и организация натурных наблюдений выполнены в соответствии с программой, описанной в работах [14]. Измерения вертикальных перемещений производились геометрическим нивелированием с привязкой к постоянному реперу, расположенному за пределами зоны влияния термостабилизации.

График наблюдений:

0-й цикл	09.2024
1-й цикл	11.2024
2-й цикл	12.2024
3-й цикл	01.2025
4-й цикл	03.2025
5-й цикл	05.2025
6-й цикл	07.2025
7-й цикл	08.2025
8-й цикл	09.2025
9-й цикл	01.2026
10-й цикл	03.2026

Процесс проведения измерений представлен на рис. 3.

Результаты натурных наблюдений показали устойчивую положительную динамику вертикальных перемещений грунтовых марок в холодный период года, соответствующую развитию морозного пучения в зоне влияния охлаждающих устройств.

Для верификации способа расчета выполнено численное моделирование НДС системы «насыпь – основание» методом конечных элементов с использованием геометрии зоны промерзания, физико-механических характеристик грунтов и значения объемного коэффициента морозного пучения ξ_v . Результаты расчета вертикальных перемещений представлены на рис. 4.

Максимальный вертикальный подъем поверхности в зоне расположения грунтовых марок, полученный по результатам численного моделирования НДС, качественно и количественно согласуется с натурными данными геокриологического мониторинга полигона, что подтверждает применимость предложенного способа расчета для прогнозирования деформаций морозного пучения при термостабилизации глинистых грунтов охлаждающими устройствами.

а)



б)



Рис. 3. Этапы измерений:
а – геодезических; б – температурных

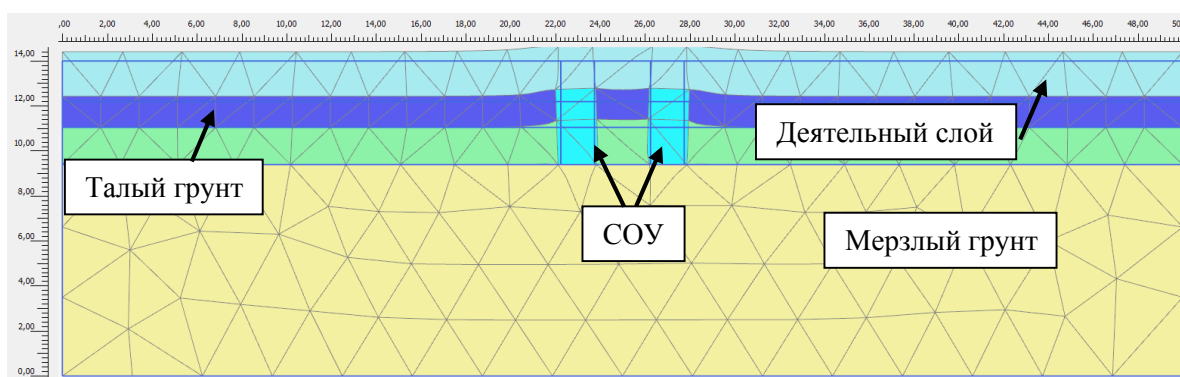


Рис. 4. Деформированный вид участка исследования

Выводы

По результатам исследований разработан метод проектирования комбинированной термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне, включающий обоснование параметров активной и пассивной стадий, способ расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации основания, который базируется на эмпирической зависимости объемного коэффициента пучения от радиальной скорости промерзания и численного моделирования НДС системы «насыпь – основание», а также подход к определению эквивалентного коэффициента теплообмена α_z комбинированных термостабилизаторов с использованием жидкого азота.

Предложен новый критерий выбора коэффициента теплообмена пассивной стадии $\alpha_{\text{пасс}}$ комбинированного охлаждающего устройства, определяющий допустимый диапазон

$\alpha_{\text{от}} < \alpha_{\text{пасс}} < \alpha_{\text{пуч}}$ и обеспечивающий долгосрочное поддержание сформированной зоны отрицательных температур без оттаивания и без развития деформаций морозного пучения сверх предельно допустимого значения с учетом прогнозируемого потепления климата.

Выполнена верификация способа расчета деформаций морозного пучения при термостабилизации на опытном полигоне «Семь лиственниц» в Ямало-Ненецком автономном округе, показавшая качественное и количественное согласование расчетных вертикальных перемещений с натурными данными геокриологического мониторинга.

Направление дальнейших исследований связано с экспериментальным подтверждением применимости предложенного подхода к определению эквивалентного коэффициента теплообмена α_z для комбинированных термостабилизаторов с геометрическими параметрами, отличными от использованных в базовом эксперименте.

Список источников

1. Хрусталева Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет. Москва : Университетская книга, 2011. 259 с.
2. Ревин Б. А., Харьков Т. Л. Климатические риски социального развития Ямало-Ненецкого автономного округа // Проблемы прогнозирования. 2023. № 4 (199). С. 157–167. DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167. EDN ZDMOKM.
3. Ашпиз Е. С., Хрусталева Л. Н. Предотвращение деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 5. С. 45–50.
4. Цернант А. А. Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 3. С. 26–31.
5. Евдокимов В. С., Максименко В. А., Николаев В. С. Исследование работы комбинированного сезонно-действующего охлаждающего устройства // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 73–76. EDN UCDJZP.
6. Паздерин Д. С. Расчет теплообмена при проектировании конденсаторной части одиночного сезонно-действующего охлаждающего устройства // Сборник тезисов Тюменского международного инновационного форума «НефтьГазТЭК-2013». Тюмень, 2013.
7. Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С., Нагаев Е. И. Результаты масштабного моделирования морозного пучения грунтов при термостабилизации сезонно-действующими охлаждающими устройствами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (75). С. 32–41. DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32. EDN UUIBGZ.
8. Ибрагимов Э. В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне с использованием термостабилизации грунтов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ибрагимов Энвер Валерьевич. Москва, 2021. 150 с.
9. Баясан Р. М., Голубин С. И., Аврамов А. В. Особенности применения технологии термостабилизации для защиты от морозного пучения грунтов // Инженерные изыскания. 2015. № 12. С. 56–62.
10. Комбинированный способ восстановления мерзлого состояния грунтов в теле и основании земляного полотна / Е. С. Ашпиз, Е. И. Нагаев, Д. А. Разуваев, А. О. Салмин // Криосфера Земли. 2026. Т. 30, № 1. С. 37–44. DOI 10.15372/KZ20260104. EDN ENCOYG.
11. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. Москва, 2024. 231 с.
12. Об утверждении Классификатора и норм пороговых значений критических параметров, характеризующих предотказное состояние земляного полотна : распоряжение ОАО «РЖД» от 14 апреля 2016 года № 660р. Москва, 2016.
13. Разуваев Д. А., Нагаев Е. И. Влияние коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна транспортных сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 56–65. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56. EDN BCERSD.
14. Ашпиз Е. С., Разуваев Д. А. Организация полевого эксперимента по охлаждению многолетне-мерзлых грунтов основания сезонно-действующими установками в условиях полуострова Ямал // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях : материалы Международной научно-практической конференции, 24–26 октября 2024 г. / Российский университет транспорта. Москва : Дашков и К, 2024. С. 22–24. EDN CWIRGP.

References

1. Khustalev L. N., Parmuzin S. Yu., Emelyanova L. V. Reliability of northern infrastructure in a changing climate. Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Moscow: Universitetskaya Kniga; 2011. 259 p. (In Russ.).
2. Revin B. A., Kharkova T. L. Climatic risks of social development in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Problems of Forecasting*. 2023;(199):157–167. (In Russ.). DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
3. Ashpiz E. S., Khustalev L. N. Prevention of permafrost degradation in railway roadbed foundations. *Cryosphere of the Earth*. 2020;24(5):45–50. (In Russ.).
4. Tsernant A. A. Innovative Technologies for temperature control of soil masses of transport structures in arctic latitudes. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2013;(3):26–31. (In Russ.).
5. Evdokimov V. S., Maksimenko V. A., Nikolaev V. S. Study of the operation of a combined seasonally operating cooling device. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;(137):73–76. (In Russ.).

6. Pazderin D. S. Calculation of heat exchange in the design of the condenser part of a single seasonally operating cooling device. *Proceedings of the Tyumen International Innovation Forum 'NefteGasTEK-2013'*. Tyumen, 2013. (In Russ.).
7. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S., Nagaev E. I. Results of large-scale modeling of soil frost heave during thermostabilization with seasonally operating cooling devices. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):32–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32.
8. Ibragimov E. V. Optimization of foundation and substructure arrangement in the cryolithozone using soil thermostabilization. Specialty 05.23.02 'Foundations and foundations, underground structures'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Ibragimov Enver Valerievich, 2021. 150 p. (In Russ.).
9. Bayasan R. M., Golubin S. I., Avramov A. V. Features of applying thermostabilization technology for protection against soil frost heave. *Engineering Surveys*. 2015;(12):56–62. (In Russ.).
10. Ashpiz E. S., Nagaev E. I., Razuvaev D. A., Salmin A. O. Combined method for restoring the frozen state of soils in the body and foundation of the roadbed. *Cryosphere of the Earth*. 2026;30(1):37–44. (In Russ.). DOI 10.15372/KZ20260104.
11. SP 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge. Moscow, 2024. 231 p. (In Russ.).
12. Order No. 660r of April 14, 2016 'On approval of the classifier and norms of threshold values of critical parameters characterizing the pre-failure state of the roadbed'. (In Russ.).
13. Razuvaev D. A., Nagaev E. I. Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermostabilization of the roadbed foundation of transport structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):56–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56.
14. Ashpiz E. S., Razuvaev D. A. Organization of field experiment on cooling permafrost soils of the foundation with seasonally operating units in the Yamal peninsula conditions. *Design, Construction and Operation of Transport Infrastructure Facilities in Complex Climatic and Engineering-Geological Conditions: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Russian University of Transport, October 24–26, 2024*. Moscow: Dashkov & K Publishing and Trading Corporation, 2024. P. 22–24. (In Russ.).

Информация об авторах

Е. И. Нагаев – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. А. Разуваев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

E. I. Nagaev – Lecturer of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.

D. A. Razuvaev – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Surveying, Designing and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 22.05.2026; принята к публикации 26.05.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 22.05.2026; accepted for publication 26.05.2026.