

Научная статья
УДК 624.139
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_56

Влияние коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна транспортных сооружений

Денис Алексеевич Разуваев^{1✉}, Егор Игоревич Нагаев²

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

¹ razdenis@mail.ru✉

² einagaev@mail.ru

Аннотация. В работе обосновывается применение коэффициента теплообмена охлаждающих устройств в качестве основного критерия проектирования систем термостабилизации основания земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне.

Для оценки влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна выполнено численное моделирование эксплуатируемого в Арктической зоне участка железнодорожной насыпи на перегоне Чум – Лабытнанги. Для составления и последующей верификации численной модели эксплуатируемой железнодорожной насыпи собраны необходимые инженерно-геологические и теплотехнические данные и проведен мониторинг температурного режима системы «насыпь – основание» в годовом цикле. На составленной и верифицированной модели проведено исследование влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания рассмотренной насыпи. По результатам численного моделирования определены зависимости времени термостабилизации основания от коэффициента теплообмена при многолетней термостабилизации и за один холодный период года.

На основании выполненных исследований сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, который позволяет определить требуемый коэффициент теплообмена, обеспечивающий проектные сроки термостабилизации и снижение величины морозного пучения транспортных сооружений до предельно допустимых значений.

По результатам проведенных исследований отмечено, что в некоторых случаях могут потребоваться решения по термостабилизации, обеспечивающие коэффициент теплообмена, превышающий возможности существующих сезонно действующих охлаждающих устройств. В таких случаях актуальны исследования, направленные на разработку и эффективное применение решений, основанных на ускоренных или комбинированных способах термостабилизации, способных обеспечить более высокие итоговые значения коэффициента теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой.

Ключевые слова: земляное полотно, грунты основания, многолетне-мерзлые грунты, охлаждающие устройства, термостабилизация грунтов, теплообмен

Для цитирования: 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.

Original article

Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of railway subgrade foundations

Denis A. Razuvaev^{1✉}, Egor I. Nagaev²

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

¹ razdenis@mail.ru✉

² einagaev@mail.ru

Abstract. The paper substantiates the use of the heat transfer coefficient of cooling devices as the main criterion for designing thermal stabilization systems for the foundation of the roadbed of transport structures in the cryolithic zone.

To assess the influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of the roadbed base, numerical modeling was performed for a section of the railway embankment on the Chum-Labytnangi

section operated in the Arctic zone. To compile and subsequently verify a numerical model of the railway embankment in operation, the necessary engineering-geological and thermal engineering data were collected and the temperature regime of the "embankment – foundation" system was monitored in an annual cycle. The compiled and verified model was used to study the influence of the heat exchange coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of the base of the embankment under consideration. Based on the results of numerical modeling, the dependences of the time of thermal stabilization of the foundation on the heat transfer coefficient during long-term thermal stabilization and for one cold period of the year were determined.

Based on the completed research, a design principle for cooling devices for thermal stabilization of the foundations of exploited embankments in the cryolithic zone was formulated. The principle allows one to determine the required heat exchange coefficient, ensuring the design timeframe for thermal stabilization and reducing the amount of frost heaving of transport structures to the maximum permissible values.

Based on the results of the conducted research, it was noted that in some cases thermal stabilization solutions may be required that provide a heat transfer coefficient exceeding the capabilities of existing seasonally operating cooling devices. In such cases, research is relevant aimed at developing and effectively implementing solutions based on accelerated or combined thermal stabilization methods, capable of providing higher final values of the heat exchange coefficient between the subgrade and the atmosphere.

Keywords: railway embankment, foundation soils, permafrost soils, soil thermal stabilization, seasonal cooling devices, heat transfer

For citation: Razuvaev D. A., Nagaev E. I. Influence of the heat transfer coefficient of cooling devices on the thermal stabilization of railway subgrade foundations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):56–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_56.

Введение

Эксплуатация земляного полотна транспортных сооружений в криолитозоне сопряжена с многочисленными деформациями насыпей, вызванными деградацией многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) [1–3]. Такие деформации приводят к постоянным ремонтно-восстановительным работам, введению ограничений скоростей движения транспорта и существенному росту эксплуатационных затрат. Данная проблема актуальна не только для России, но и для других стран с распространением ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений [4, 5].

Для решения проблемы деградации ММГ при строительстве и эксплуатации транспортных сооружений в криолитозоне применяется широкий спектр методов термостабилизации [6–8]. Главные принципы классификации этих методов были сформулированы А. А. Цернантом, который выделил основные группы способов управления тепловым режимом грунтового массива при проектировании земляного полотна на транспортных сооружениях [9].

Особое место среди методов термостабилизации занимают охлаждающие колонки с различным принципом действия, в том числе сезонно действующие охлаждающие устройства (СОУ). За последние десятилетия СОУ, главным образом парожидкостного типа, получили широкое применение при строительстве и эксплуатации транспортных и промышленных сооружений в криолитозоне и продемонстрировали высокую эффективность в обеспечении устойчивости ММГ основания.

Как отмечается в работах [10–12], такие устройства способны интенсивно отводить тепло из грунтового массива в холодный период года, способствуя не только сохранению, но и восстановлению мерзлого состояния грунтов основания.

Несмотря на разнообразие перечисленных охлаждающих устройств для термостабилизации, их действие может быть описано единым физическим принципом, а именно повышением интенсивности отведения тепла из грунтового массива за счет улучшения условий теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой. Параметром, характеризующим работу термостабилизирующего устройства, выступает коэффициент теплообмена α , Вт/(м²·К), который количественно описывает интенсивность этого взаимодействия [12, 13]. Коэффициент теплообмена представляет собой результирующий параметр, зависящий от совокупности конструктивных и эксплуатационных факторов. Например, для СОУ коэффициент теплообмена определяется геометрическими размерами конденсаторной части, характером ее оребрения, скоростью и температурой окружающего воздуха, а также термическим сопротивлением на границе грунта и стенки испарителя. Кроме того, на эффективность теплоотвода существенно влияет время выхода устройства в рабочий режим. Как правило, для широко применяемых СОУ его значение варьируется пределах от 2 до 10 Вт/(м²·К) [14–16].

Таким образом, коэффициент теплообмена выступает параметром, определяющим

интенсивность отвода тепла из грунтового массива и, следовательно, эффективность термостабилизации основания земляного полотна. В связи с этим коэффициент теплообмена может быть принят в качестве основного критерия проектирования систем термостабилизации. Подбор величины коэффициента теплообмена охлаждающих устройств под конкретные мерзлотно-грунтовые и климатические условия позволяет регулировать скорость термостабилизации, а следовательно, и сроки восстановления положения границы ММГ в основании земляного полотна. При этом скорость термостабилизации напрямую влияет на величину морозного пучения грунтов основания и сооружения в целом, возникающего при восстановлении ММГ [16–18].

Для оценки влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания земляного полотна в настоящей работе выполнено численное моде-

лирование для участка эксплуатируемой в Арктической зоне насыпи железной дороги.

Методы исследования

Для численного моделирования термостабилизации основания железнодорожной насыпи авторами выбран перегон Чум – Лабытнанги. Выполненное визуальное обследование однопутного участка на 167 км перегона установило наличие характерных криогенных деформаций железнодорожного пути (рис. 1).

Для составления и последующей верификации численной модели эксплуатируемой железнодорожной насыпи авторами собраны необходимые инженерно-геологические и теплотехнические данные и проведен мониторинг температурного режима системы «насыпь – основание» в годовом цикле (рис. 2).

Мониторинг температурного поля проведен по термометрическим скважинам, установленным по бровкам земляного полотна,

а)



б)



Рис. 1. Характерные деформации участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги: а – термопросадка железнодорожного пути из-за деградации ММГ; б – пучины железнодорожного пути из-за сезонного промерзания грунтов основания

а)



б)



Рис. 2. Процесс измерения температур грунтов основания в ходе проведения геокриологического мониторинга участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги: а – в холодный период года; б – в теплый период года

у подошвы откосов насыпи и на удалении 25 м от основания насыпи. Для фиксации температуры грунтов использовалась термометрическая коса с переносным контроллером с абсолютной погрешностью измерений не более $\pm 0,1$ °С. Датчики температуры на косе располагались с интервалами 0,5 м до глубины 5 м и 1,0 м на глубине от 5 до 10 м.

Для решения поставленной задачи была составлена численная геокриологическая модель системы «насыпь – основание». Модель создана в программном комплексе Frost 3D (модуль «Frost.Термо») с учетом теплофизических свойств грунтов, установленных по результатам обследования, и учитывает литологическую неоднородность грунтового массива, глубину залегания многолетне-мерзлых грунтов и уровень грунтовых вод.

С целью воспроизведения реальных условий формирования температурного поля для начальных и граничных условий задавались данные с ближайшей метеорологической станции: температура воздуха, толщина и плотность снежного покрова, продолжительность светового дня, скорость ветра. Температурный режим многолетне-мерзлых и сезонно-мерзлых грунтов определялся по результатам прямых замеров в термометрических скважинах. В качестве исходных данных использовались фактические значения температуры грунтов на момент начала моделирования.

Проверка адекватности составленной численной модели выполнена по результатам сравнения расчетного температурного поля (температуры t_p), полученного по результатам моделирования на 1 год, с данными годового геокриологического мониторинга (температуры t_m) участка железной дороги на 167 км перегона Чум – Лабытнанги. Сравнение результатов численного моделирования с данными натурного мониторинга за период с сентября 2024 г. по сентябрь 2025 г. представлено в таблице.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что отличия расчетных температур системы «насыпь – основание» (t_p), полученных по результатам моделирования на 1 год, от данных мониторинга (t_m) не превышают инструментальной погрешности измерительных приборов, регламентируемой п. 3.6 ГОСТ 25358–2020. Это указывает на корректность составления численной модели и назначения граничных условий.

В условиях нарушения естественного теплообмена основания насыпи и атмосферы за счет метелевого снегопереноса и снеговых отложений на откосах, без применения специальных мер термостабилизации на исследуемом участке наблюдается постепенное повышение температуры грунтового массива. В этом случае, как показывают результаты моделирования, возможно формирование таликовых зон и увеличение глубины сезонного протаивания, что создает предпосылки для развития неравно-

**Сравнение результатов моделирования расчетного температурного поля
с данными годового геокриологического мониторинга**

Глубина, м	Значения температур, °С, по скважинам											
	1		2		3		4		5		6	
	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p	t_m	t_p
0,5	13,0	13,30	12,5	12,40	12,6	12,60	11,6	11,74	12,3	12,20	13,1	12,80
1,0	12,2	12,02	12,3	11,95	13,0	12,96	8,5	8,59	12,6	12,66	9,4	9,30
1,5	11,4	11,34	12,0	12,00	11,5	11,65	3,6	3,76	12,2	12,25	4,2	4,40
2,0	10,9	10,94	11,3	11,22	13,8	14,06	0,1	0,01	13,0	13,16	0,0	0,03
2,5	10,4	10,44	10,6	10,53	11,3	11,10	–0,1	–0,16	12,2	12,20	0,0	–0,02
3,0	7,4	7,18	6,8	6,75	11,6	11,90	–0,1	–0,02	11,8	12,10	–0,1	–0,04
3,5	4,3	4,51	3,1	3,26	7,1	7,16	–0,2	–0,08	7,2	7,36	–0,1	–0,11
4,0	2,7	2,66	2,2	2,29	4,2	4,03	–0,2	–0,34	4,5	4,63	–0,1	–0,14
4,5	1,0	0,90	1,3	1,21	3,5	3,53	–0,3	–0,42	2,8	2,73	–0,4	–0,41
5,0	0,6	0,53	0,8	0,94	2,2	2,09	–0,4	–0,39	1,6	1,59	–0,5	–0,49
6,0	0,3	0,25	0,4	0,37	1,5	1,55	–0,4	–0,44	1,0	0,95	–0,4	–0,25
7,0	0,1	0,22	0,2	0,15	1,1	1,10	–0,5	–0,54	0,4	0,50	–0,6	–0,48
8,0	0,2	0,29	0,1	0,12	1,5	1,60	–0,7	–0,75	0,3	0,15	–0,6	–0,74
9,0	–0,1	–0,04	–	–	0,4	0,45	–0,7	–0,81	0,2	0,26	–0,8	–0,90
10,0	–	–	–	–	0,1	0,10	–0,8	–0,69	–0,1	–0,02	–0,8	–0,86

Примечание. Скважины 1 и 2 располагались на обочине земляного полотна, 3 и 5 – у подошвы насыпи, 4 и 6 – в полосе отвода, на расстоянии 25 м от подошвы насыпи.

мерных просадок и снижения надежности сооружения (подтверждается результатами визуального обследования).

После верификации численной геокриологической модели системы «насыпь – основание» она дополнена сезонно действующими охлаждающими устройствами (рис. 3).

Расстановка СОУ выполнена по схеме с тремя продольными рядами на каждый откос. Шаг расстановки принят минимальным из практики термостабилизации земляного полотна. Для термостабилизации основания эксплуатируемой насыпи применены как вертикальные, так и наклонные охлаждающие устройства с погружением до границы многолетне-мерзлых грунтов. В качестве основного решения приняты СОУ парожидкостного типа.

Описание работы СОУ в программном комплексе выполнено путем присвоения внутренним блокам граничного условия III рода с приведением среднемесячных температур воздуха на поверхности и коэффициента теплообмена. Длина испарительной части СОУ

принята 12 м, что обеспечивает заглубление до уровня границы многолетне-мерзлых грунтов. Конденсаторная часть принята высотой 4 м и над поверхностью земли.

На составленной модели проведено исследование влияния коэффициента теплообмена охлаждающих устройств на термостабилизацию основания рассмотренной насыпи. Расчетом установлено, что при минимальном для СОУ коэффициенте теплообмена $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ время термостабилизации T составит четыре года. Моделирование термостабилизации выполнялось с 1 сентября первого года расчетного периода. В качестве критерия завершения термостабилизации принято сохранение температуры под подошвой насыпи по оси пути, близкой к 0°C (температура окончания оттаивания глинистых грунтов), к 1 сентября последнего года расчетного периода.

На рис. 4 представлен результат распределения температур в системе «насыпь – основание» рассмотренного участка железной дороги при термостабилизации СОУ с коэффи-

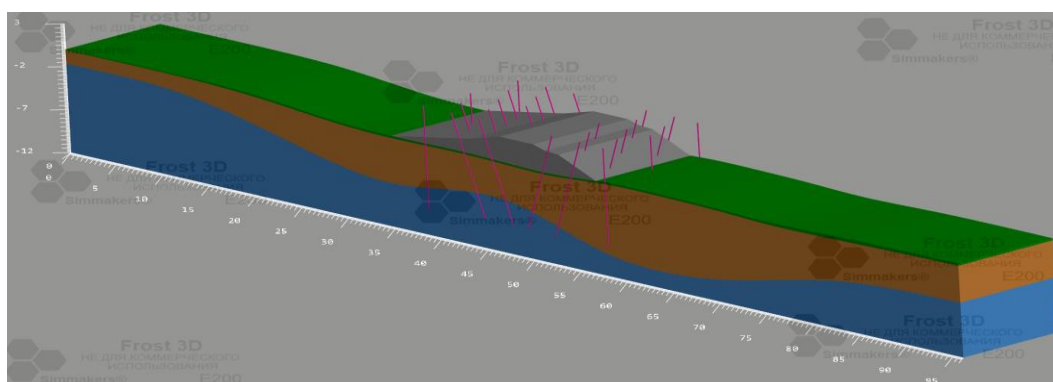


Рис. 3. Геокриологическая модель системы «насыпь – основание» с установленными СОУ в интерфейсе программного комплекса «Frost.Термо»

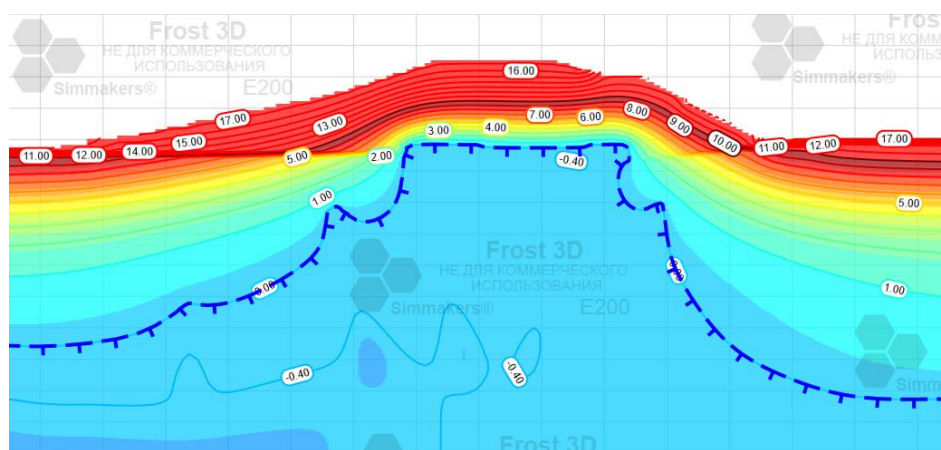


Рис. 4. Результат распределения температур в системе «насыпь – основание» по результатам моделирования с $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ по истечении четырех лет

коэффициентом теплообмена $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ в течение четырех лет.

Далее было проведено итерационное моделирование, в ходе которого коэффициент теплообмена α последовательно увеличивался и подбиралось такое значение параметра, при котором время термостабилизации T по описанному выше критерию составляло 3, 2 и 1 год. Отдельно выполнено моделирование термостабилизации за один холодный период года с подбором коэффициента теплообмена α для обеспечения времени T , равного 9, 6, и 3 мес. В этом случае критерием завершения термостабилизации принято достижение температуры $-0,6 \dots -1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура твердомерзлого состояния глинистых грунтов по ГОСТ 25100) под подошвой насыпи по оси пути.

По результатам численного моделирования для однопутного участка на 167 км перегона Чум – Лабытнанги определены зависимости времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена α при многолетней термостабилизации (рис. 5, а) и за один холодный период года (см. рис. 5, б).

По мере увеличения коэффициента теплообмена охлаждающих устройств время термостабилизации предсказуемо сокращается, но с ослаблением тренда. Этот эффект наблюдается как при многолетней термостабилизации, так и при термостабилизации за один холодный период года.

При достижении определенного порога времени термостабилизации [для рассматриваемого участка железной дороги – около трех месяцев (см. рис. 5, б)] эффективность охлаждающих устройств достигает предела, т. е. дальнейшее увеличение коэффициента теплообмена не приводит к значимому сокращению времени термостабилизации системы «насыпь – основание». Это можно объяснить тем, что при высоких значениях коэффициента теплообмена интенсивность отвода тепла из грунтового массива уже ограничивается не возможностями охлаждающих устройств, а температурой окружающей среды в холодный период года и грунтовыми условиями.

Существенное увеличение времени термостабилизации (см. рис. 5, а) при снижении коэффициента теплообмена до значений менее $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ обусловлено не только уменьшением интенсивности отвода тепла охлаждающим устройством, но и особенностями климатического цикла. При низких значениях коэффициента теплообмена за холодный период года СОУ не успевает существенно повысить положение кровли ММГ. С наступлением теплого сезона, когда устройство фактически прекращает работу, процесс деградации ММГ возобновляется, в результате чего достигнутый за зиму охлаждающий эффект ослабевает. При низких значениях коэффициента теплообмена СОУ количество теплых периодов года за время термостабилизации увеличивается, что приводит к значительной нелинейности в изменении времени термостабилизации (см. графики на рис. 5, а).

Анализ графиков, представленных на рис. 6, позволяет сделать вывод, что при реальных значениях коэффициента теплообмена для широко применяемых СОУ (до $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ [14–16])

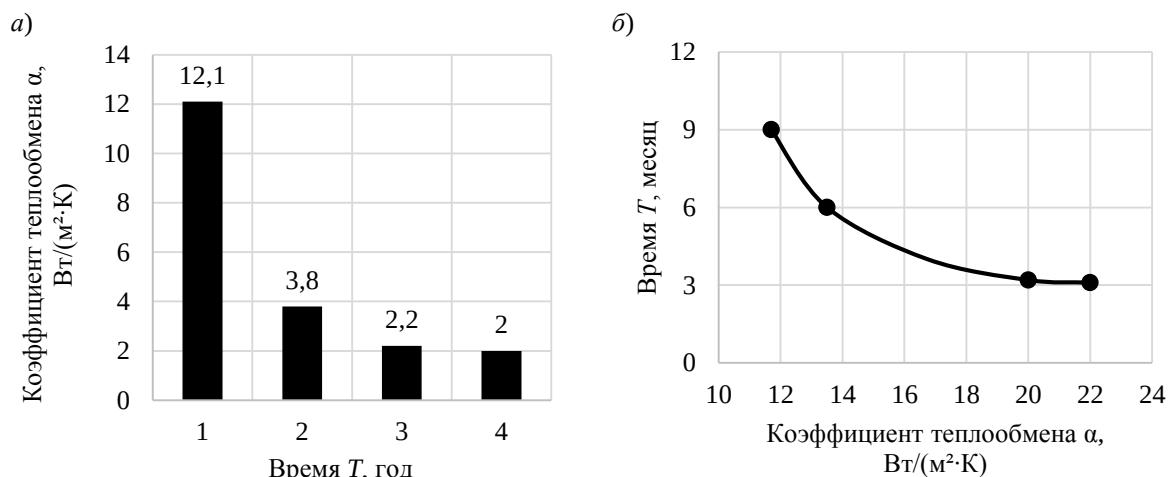


Рис. 5. Зависимость времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена α для участка 167 км перегона Чум – Лабытнанги:

а – при многолетней термостабилизации; б – при термостабилизации за один холодный период года

время термостабилизации системы «насыпь – основание» на рассматриваемом участке и ему подобных будет составлять не менее года. Такие сроки термостабилизации основания насыпей действующих железных дорог не всегда приемлемы. Например, при снижении коэффициента общей устойчивости откосов насыпи по основанию ниже нормативных значений возникает необходимость немедленного принятия мер для обеспечения безопасности движения. При продолжающихся осадках земляного полотна требуется как можно быстрее снять установленные ограничения скорости движения поездов, что напрямую влияет на пропускную способность и экономическую эффективность железнодорожной магистрали. Длительное время термостабилизации не всегда допустимо с точки зрения организации последующих ремонтных работ по верхнему строению пути, поскольку нередко приводит к необходимости повторной выправки пути в проектное положение.

Кроме того, при длительной термостабилизации основания насыпи, сложенного водонасыщенными глинистыми грунтами, создаются условия для миграции влаги к фронту промерзания грунтов вокруг охлаждающих устройств и активного льдообразования, что может привести к процессу морозного пучения [16–18] и формированию пучин на железнодорожном пути.

Проведенное численное моделирование показало, что подход к проектированию си-

стем термостабилизации, основанный на подборе требуемого коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, является обоснованным и практически значимым. Данный подход позволяет не только учитывать специфику конкретного объекта, но и рационально назначать тип и параметры охлаждающих устройств для обеспечения необходимых сроков термостабилизации исходя из:

- технико-экономического обоснования, технологических и эксплуатационных ограничений;
- нормативно допустимых значений пучин на железнодорожном пути, возникающих при реградации ММГ.

Основные результаты

На основании выполненных исследований сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, согласно которому для восстанавливаемых сооружений существует зависимость времени термостабилизации T от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств α (рис. 6).

По зависимости возможно обоснованно определить требуемый коэффициент теплообмена охлаждающих устройств $\alpha_{пр}$, который необходимо обеспечить при проектировании термостабилизации с учетом соблюдения проектных сроков термостабилизации $T_{т.э}$ и снижения величины морозного пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений ϵ_u . Проектные сроки термостабилизации $T_{т.э}$ определяются исходя из технико-

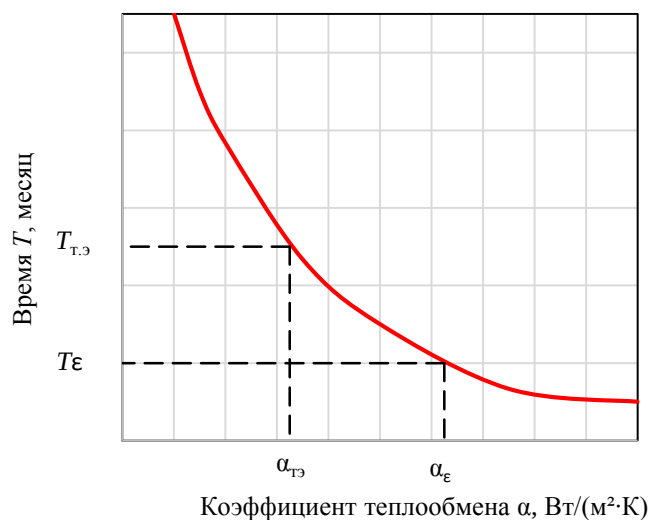


Рис. 6. Утрированная зависимость времени термостабилизации от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств

экономического обоснования, технологических и эксплуатационных ограничений.

Величина морозного пучения ϵ водонасыщенных глинистых грунтов основания при реградации ММГ, в условиях значительного криогенного влагопереноса, существенно зависит от скорости промерзания грунтового массива [18]. В то же время скорость промерзания определяется общим временем термостабилизации, поэтому существует определенное значение времени термостабилизации T_ϵ , при котором величина морозного пучения не будет превышать предельно допустимых значений ϵ_u .

Таким образом, требуемый коэффициент теплообмена должен определяться из системы неравенств:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{пр}} > \alpha_{T_\epsilon}, \\ \alpha_{\text{пр}} > \alpha_\epsilon, \end{cases}$$

где α_{T_ϵ} – величина коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, при котором обеспечивается проектный срок термостабилизации T_{T_ϵ} (см. рис. 6); α_ϵ – величина коэффициента теплообмена охлаждающего устройства, при котором обеспечивается время термостабилизации T_ϵ (см. рис. 6).

Все необходимые расчеты, в том числе определение времени термостабилизации и его зависимости от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств α , возможно выполнить в специализированных программных комплексах для теплотехнических расчетов («Frost 3D» и др.). Количественная зависимость величины морозного пучения от скорости промерзания глинистых грунтов вокруг охлаждающих устройств, на примере СОУ, получена авторами в работе [18].

Вместе с тем из приведенной выше системы неравенств следует, что в некоторых случаях могут потребоваться решения по термостабилизации, обеспечивающие коэффициент теплооб-

мена, который превышает возможности существующих СОУ. В этом случае актуально разрабатывать и применять решения, основанные на ускоренных или комбинированных способах термостабилизации, способных обеспечить более высокие итоговые значения коэффициента теплообмена между основанием земляного полотна и атмосферой.

Выводы

В работе составлена и верифицирована численная геокриологическая модель участка эксплуатируемой железнодорожной насыпи на перегоне Чум – Лабытнанги, на основании которой получена зависимость времени термостабилизации ММГ в основании сооружения от коэффициента теплообмена охлаждающих устройств.

Анализ полученной зависимости показал, что проектирование систем термостабилизации оснований с ММГ может быть эффективно реализовано через подбор коэффициента теплообмена охлаждающих устройств, обеспечивающего требуемые сроки восстановления мерзлого состояния грунтов основания и контроль над процессом морозного пучения. Сформулирован принцип проектирования охлаждающих устройств для термостабилизации оснований эксплуатируемых насыпей в криолитозоне, который позволяет определить требуемый коэффициент теплообмена $\alpha_{\text{пр}}$, обеспечивающий проектные сроки термостабилизации T_{T_ϵ} и снижение величины морозного пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений ϵ_u .

Полученные результаты выявили актуальность исследований, направленных на разработку эффективных способов ускоренной (активной) или комбинированной термостабилизации с увеличенным эквивалентным коэффициентом теплообмена охлаждающих устройств.

Список источников

1. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 г. Москва : Университетская книга, 2016. С. 162–168. EDN WEQOXZ.
2. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет / В. В. Клименко, Л. Н. Хрусталева, О. В. Микушина [и др.] // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 3. С. 3–13.
3. Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С. Криогенные проблемы эксплуатируемых железнодорожных насыпей восточного участка БАМа и сценарии развития деформаций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 22–34.

4. Cheng G., Wu Q., Ma W. Innovative designs of the permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet railway / eds. D. L. Kane & K. M. Hinkel // Ninth International Conference on Permafrost. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks : 2 Vol. 2008. P. 239–247.
5. Lepage J.-M., Dore G., Fortier D., Murchison P. Thermal performance of the permafrost protection techniques at beaver creek experimental road site, Yukon, Canada / ed. K. M. Hinkel // Tenth International Conference on Permafrost. Vol. 1. International Contributions. Salekhard : The Northern Publisher, 2012. P. 261–266.
6. Ашпиз Е. С., Хрусталева Л. Н. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 5. С. 45–50.
7. Устройство термостабилизационных мероприятий для предотвращения деградации многолетнемерзлых оснований железнодорожных насыпей / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, А. В. Кажарский, И. И. Гаврилов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы научно-технической конференции, Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 г. Новочеркасск : Лик, 2022. С. 469–475. EDN ZNBLPV.
8. Жаркой А. М., Ковалева М. А., Кудрявцев С. А. Проблемы деградации многолетнемерзлых грунтов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Т. 2. С. 236–239. EDN MZHQDP.
9. 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.
10. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А., Куплинова Е. В. Экспериментальные исследования инновационных конструкций пологонаклонных конструкций термостабилизаторов грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 208–220.
11. Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне / Р. М. Баясан, А. Д. Лобанов, Т. В. Баясан, С. И. Голубин // Инженерные изыскания. 2012. № 7. С. 61–63.
12. Ибрагимов Э. В., Гракович Л. П. Определение теплопередающих характеристик вертикального паро-жидкостного термостабилизатора грунта с разными теплоносителями // Геотехника. 2016. № 5. С. 24–29.
13. Примаков С. С., Паздерин Д. С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезонно действующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. 2013. № 4. С. 124–125.
14. Погоржальский Д. Е., Георгияди В. Г. Влияние снеготаноса на эффективность работы сезонно действующих охлаждающих устройств // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. 2022. № 10. С. 110–112.
15. Колосков Г. В., Ибрагимов Э. В., Гамзаев Р. Г. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне // Геотехника. 2015. № 6. С. 4–11.
16. 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, 2021. 150 с. EDN VXLAAD.
17. 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.
18. 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.

References

1. Ashpiz E. S. Experience in designing railway subgrades in permafrost regions of Russia. *Proceedings of the Fifth Conference of Russian Geocryologists, Moscow, June 14–17, 2016*. Moscow: Universitetskaya Kniga; 2016. P. 162–168. EDN WEQOXZ. (In Russ.).
2. Klimenko V. V., Khrustalev L. N., Mikushina O. V. [et al.]. Climate change and dynamics of permafrost layers in northwest Russia over the next 300 years. *Earth's Cryosphere*. 2007;XI(3):3–13. (In Russ.).
3. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S. cryogenic issues of existing railway embankments on the eastern section of the Baikal-Amur mainline and deformation development scenarios. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):22–34. (In Russ.).
4. Cheng G., Wu Q., Ma W. Innovative designs of the permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet railway. Kane D. L., Hinkel K. M., eds. *Ninth International Conference on Permafrost*. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks: 2 Vol. 2008. P. 239–247.

5. Lepage J.-M., Doré G., Fortier D., Murchison P. Thermal performance of permafrost protection techniques at the beaver creek experimental road site, Yukon, Canada. Hinkel K. M., ed. *Tenth International Conference on Permafrost. Vol. 1. International Contributions*. Salekhard: The Northern Publisher; 2012. P. 261–266.
6. Ashpiz E. S., Khristalev L. N. Prevention of permafrost degradation beneath railway embankments. *Earth's Cryosphere*. 2020;24(5):45–50. (In Russ.).
7. Kudryavtsev S. A., Val'tseva T. Yu., Kazharskiy A. V., Gavrilov I. I. Implementation of thermal stabilization measures to prevent degradation of permafrost foundations of railway embankments. *Soil Mechanics in Geotechnics and Foundation Engineering: Proceedings of the Scientific and Technical Conference, Novocherkassk, September 28–30, 2022*. Novocherkassk: Lik; 2022. P. 469–475. EDN ZNBLPV. (In Russ.).
8. Zharkoy A. M., Kovaleva M. A., Kudryavtsev S. A. Problems of permafrost degradation. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of APEC Countries in the 21st Century*. 2023;2:236–239. EDN MZHQDP. (In Russ.).
9. Tsernant A. A. Innovative technologies for temperature control of soil masses in Arctic transportation infrastructure. *Construction Materials, Equipment, and Technologies of the 21st Century*. 2013;(3):26–31. (In Russ.).
10. Ibragimov E. V., Kronik Ya. A., Kuplinova E. V. Experimental studies of innovative low-inclination soil thermal stabilizer designs. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014;(45):208–220. (In Russ.).
11. Bayasan R. M., Lobanov A. D., Bayasan T. V., Golubin S. I. Comparative assessment of two-phase thermosyphon efficiency for soil thermal stabilization in the cryolithozone. *Engineering Surveys*. 2012;(7):61–63. (In Russ.).
12. Ibragimov E. V., Grakovich L. P. Determination of heat transfer characteristics of a vertical vapor-liquid soil thermal stabilizer with different working fluids. *Geotechnics*. 2016;(5):24–29. (In Russ.).
13. Primakov S. S., Pazderin D. S. On heat transfer calculations in the design of the condenser section of seasonal cooling devices. *Oil Industry*. 2013;(4):124–125. (In Russ.).
14. Pogorzalsky D. E., Georgiyadi V. G. The influence of snow drift on the efficiency of seasonally operating cooling devices. *Technologies for the Development of Oil, Gas and Gas Condensate Fields*. 2022. P. 110–112. (In Russ.).
15. Koloskov G. V., Ibragimov E. V., Gamzaev R. G. On the selection of optimal soil thermal stabilization systems for construction in the cryolithozone. *Geotechnics*. 2015;(6):4–11. (In Russ.).
16. Ibragimov E. V. Optimization of the design of foundations and substructures in the cryolithozone using thermal stabilization of soils. Speciality 05.23.02 'Foundations and Substructures, Underground Structures'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Ibragimov Enver Valerievich; 2021. 150 p. (In Russ.).
17. Bayasan R. M., Golubin S. I., Avramov A. V. Specific features of applying thermal stabilization technology to prevent frost heave of soils. *Engineering Surveys*. 2015;(12):56–62. (In Russ.).
18. Razuvaev D. A., Ashpiz E. S., Nagaev E. I. Results of full-scale modeling of frost heave under thermal stabilization by seasonal cooling devices. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(75):32–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_75_32. EDN UUIBGZ.

Информация об авторах

Д. А. Разуваев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.
Е. И. Нагаев – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

D. A. Razuvaev – Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Surveying, Designing and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.
E. I. Nagaev – Lecturer of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 20.02.2026.

The article was submitted 12.02.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 20.02.2026.