

УДК 625.12:624.139

Учет теплопроводности инъекционных растворов при их комбинировании с охлаждающими устройствами в основании земляного полотна

Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис

Сибирской государственной университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Разуваев Д. А., Печенкин Р. С., Ланис А. Л. Учет теплопроводности инъекционных растворов при их комбинировании с охлаждающими устройствами в основании земляного полотна // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1085–1095. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1085-1095

Аннотация

Цель: В определенных условиях деградация ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений сопровождается не только термическими просадками, но и формированием длительно консолидирующихся слабых грунтов с возможной потерей устойчивости откосов и расползанием насыпи. Для таких условий возможно применение комбинированного способа термостабилизации — инъектирование грунтоцементных растворов совместно с установкой парожидкостных СОУ. Для дальнейшего развития расчетно-теоретического аппарата данного способа термостабилизации в статье определены зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших инъекционных растворов от содержания вяжущего, а также выполнено численное моделирование термостабилизации модели грунтового массива для уточнения эффективности комбинированного способа (по коэффициенту теплообмена) относительно применения только парожидкостных СОУ. **Методы:** Поставлен и проведен лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности растворов по методу стационарного теплового режима, выполнены теплотехнические расчеты в специализированном программном комплексе. **Результаты:** Определены зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов от содержания вяжущего в их составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении, а также в мерзлом и талом состоянии. Установлено, что теплопроводность затвердевшего раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии, причем существенный относительный эффект наблюдается уже при минимальном содержании вяжущего. **Практическая значимость:** Полученные зависимости рекомендуется использовать для решения практических задач при инъектировании грунтоцементных растворов в основания транспортных сооружений в районах распространения ММГ. Численное моделирование показало эффективность (по коэффициенту теплообмена) термостабилизации грунтового массива предложенным комбинированным способом относительно применения только парожидкостных СОУ, что требует учета при проектировании и расчетах.

Ключевые слова: Земляное полотно, грунты основания, слабые грунты, многолетнемерзлые грунты, инъектирование грунтов, инъекционные растворы, термостабилизация грунтов, охлаждающие устройства.

Введение

Согласно стратегии социально-экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа (далее — ЯНАО), совершенствование транспортно-логистической инфраструктуры является

одной из ключевых задач региона и Арктической зоны страны в целом. Обладая значительным природно-ресурсным потенциалом, округ входит в число стратегически важных регионов России, где реализуются крупные проекты в сфере добычи

углеводородов, возобновляемой энергетики и транзита грузов по маршруту «Северный морской путь». В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы надежной и безопасной эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры в условиях сурового климата Арктической зоны и деградации многолетнемерзлых грунтов (далее — ММГ) в основаниях [1, 2].

При этом довольно часто деградация ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений региона сопровождается не только термическими просадками, но и формированием длительно консолидирующихся слабых грунтов. Слабые грунты в основании способствуют не только проявлению продолжительных осадок земляного полотна, но и формируют условия для потери устойчивости откосов и расползания насыпи [3].

В современной геотехнике разработаны и успешно применяются эффективные технологии термостабилизации, основанные на различных принципах воздействия на грунтовый массив основания [4]. При этом показали свою эффективность как в России, так и в других странах подходы, основанные на комбинации различных способов термостабилизации грунтов, минимизирующих недостатки друг друга [5–7]. Так, концепция, предложенная авторами в [7], предусматривает объединение двух эффективных способов стабилизации грунтов оснований транспортных сооружений при деградации ММГ — напорного инъецирования грунтоцементных растворов [8–11] и охлаждения основания сезонно действующими охлаждающими устройствами (далее — СОУ) [12–14]. Применение СОУ позволяет компенсировать теплоту экзотермии цемента [7] при твердении инъецированного раствора, а также стабилизировать положение ММГ и предотвратить дальнейшие термические просадки. При этом применение напорного инъецирования грунтоцементных растворов позволяет стабилизи-

вать слабые грунты основания в таликовых зонах в достаточно короткие сроки, исключить возможное морозное пучение основания при восстановлении ММГ, повысить теплообороты СОУ за счет большего коэффициента теплопроводности грунтоцементных растворов, а также сократить потребности в количестве или мощности охлаждающих установок.

Для дальнейшего развития расчетно-теоретического аппарата описанного выше комбинированного способа стабилизации оснований транспортных сооружений при деградации ММГ поставлен лабораторный эксперимент по определению зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов (далее — ГЦР) от содержания вяжущего, а также выполнено численное моделирование термостабилизации модели грунтового массива для уточнения эффективности комбинированного способа (по коэффициенту теплообмена) относительно применения только парожидкостных СОУ.

Постановка и проведение лабораторного эксперимента

Величина коэффициента теплопроводности затвердевшего грунто-цементного инъекционного раствора имеет существенное значение при проектировании и расчете термостабилизации грунтового массива основания предложенным в [7] комбинированным способом. В некоторой нормативно-технической и справочной литературе представлены отрывочные данные о коэффициенте теплопроводности различных типов цементных растворов, в том числе грунтоцементов, однако они не учитывают специфику и возможную вариацию составов инъекционных растворов, а также водно-тепловые условия оснований транспортных сооружений в районах распространения ММГ, в которые планируется инъецирование и установка СОУ.

В связи с этим поставлен лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности λ^p затвердевшего ГЦР в зависимости от количества цемента (Ц) в его составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении образцов, а также в мерзлом и талом состоянии. Матрица лабораторного эксперимента представлена в табл. 1.

В качестве исходного грунтового материала использовалась супесь песчанистая с числом пластичности $I_p = 5$ (грунт, широко применяемый в практике напорного инъектирования [7]), а в качестве вяжущего — клинкерный портландцемент ЦЕМ II 42,5Н по ГОСТ 31108. Граничные значения содержания вяжущего приняты по результатам исследований, представленных в [15].

Образцы для эксперимента изготавливались цилиндрической формы с диаметром $D = 100$ мм

и высотой $h = 19$ мм. Образцы ГЦР замешивались с оптимальным из условий подвижности водоненцементным отношением, заливались в формы и после нормального твердения водонасыщались с полным погружением в воду или высушивались до воздушно-сухого состояния (контроль по изменению массы образцов). Образцы без цемента (опыты 1.1–1.3) замешивались с водой до текучего состояния, заливались в формы и после стабилизации высушивались до воздушно-сухого состояния, а при необходимости водонасыщения — устанавливались в эксикатор с песчаной подушкой. Степень водонасыщения для соответствующих образцов составляла $S_r > 0,98$. Температурный диапазон образцов для испытаний составлял:

- в талом состоянии — $+2...+1$ °С;
- в мерзлом состоянии — $-1...-2$ °С.

Таблица 1. Матрица лабораторного эксперимента

№ опыта	Состав*, г/л		Состояние образцов	Количество образцов, шт.	Возраст, сут.	Определяемые характеристики
	Цемент	Грунт				
1.1	0	1950	Воздушно-сухое, талое	3	> 28	Коэффициент теплопроводности
1.2			Водонасыщенное, талое	3		
1.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
2.1	100	1850	Воздушно-сухое, талое	3		
2.2			Водонасыщенное, талое	3		
2.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
3.1	200	1750	Воздушно-сухое, талое	3		
3.2			Водонасыщенное, талое	3		
3.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
4.1	300	1650	Воздушно-сухое, талое	3		
4.2			Водонасыщенное, талое	3		
4.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
5.1	450	1500	Воздушно-сухое, талое	3		
5.2			Водонасыщенное, талое	3		
5.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
6.1	500	1450	Воздушно-сухое, талое	3		
6.2			Водонасыщенное, талое	3		
6.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
поверка	сталь					
поверка	фторопласт Ф-4					

* — расход основных материалов для приготовления 1 литра раствора, г.

Указанные условия близки к температурам оснований транспортных сооружений в районах распространения ММГ.

Следует отметить, что конечная плотность затвердевших образцов ГЦР не является регулируемым параметром при инъектировании и в рамках настоящего эксперимента не исследовалась.

Для последующей проверки экспериментальной установки дополнительно изготовлены образцы идентичной формы из материалов с заведомо известным коэффициентом теплопроводности: стали (λ значительно выше, чем у ГЦР) и фторопласта Ф-4 (λ значительно ниже, чем у ГЦР). Общий вид подготовленных образцов представлен на рис. 1.

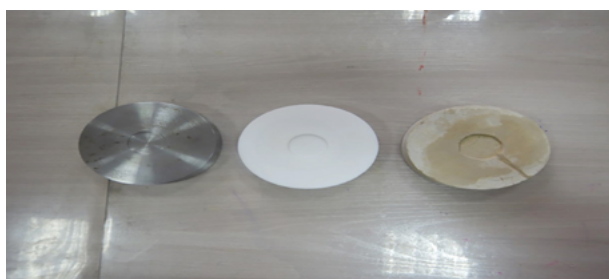


Рис. 1. Общий вид подготовленных образцов (выполнено авторами).

Слева направо: образец из стали; образец из фторопласта Ф-4; образец грунтоцементного раствора (ГЦР) для опыта 2.1

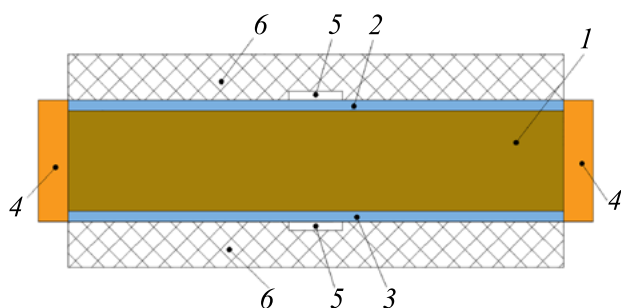


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки (выполнено авторами):

1 — испытуемый образец; 2 — верхний тепломер; 3 — нижний тепломер; 4 — теплоизоляционный кожух; 5 — датчик температуры; 6 — термостатирующие элементы

Лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности ГЦР проводился по методу стационарного теплового режима с выполнением обязательных условий ГОСТ Р 71038—2023. Сущность метода заключается в формировании теплового потока сквозь плоский образец при создании градиента температур на его торцах. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

В ходе эксперимента испытуемый образец помещался в экспериментальную установку и термостатировался в климатической камере до постоянной температуры $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для испытаний в талом состоянии образцов и $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для испытаний в мерзлом состоянии. Термостатирование контролировалось с помощью верхнего и нижнего температурных датчиков. При достижении термостабилизации включался регистратор данных с датчиков тепловых потоков и начиналась запись данных. Далее задавался температурный градиент, равный $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом для испытаний в талом состоянии образцов на верхнем термостатирующем элементе устанавливалась температура $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, на нижнем — $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для испытаний в мерзлом состоянии образцы выдерживались при температурах $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхний элемент) и $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (нижний элемент).

Фиксация данных датчиков температуры и датчиков теплового потока выполнялась в автоматическом режиме каждые 5 мин. Запись данных производилась на карту памяти считывающего устройства с последующим экспортированием на ПК. Испытание завершалось при достижении стабилизации значений температуры на верхнем и нижнем торцах образца и достижении стабилизации теплового потока. Общий вид экспериментальной установки с установленным образцом ГЦР представлен на рис. 3.

Значения коэффициентов теплопроводности образцов λ_i определялись по формуле:

$$\lambda_i = \frac{(Q_{H,i} + Q_{B,i})h}{2(T_{B,i} - T_{H,i})}, \quad (1)$$

где $Q_{H,i}$ — значение теплового потока на нижнем термостатирующем элементе, Вт/м²;

$Q_{B,i}$ — значение теплового потока на верхнем термостатирующем элементе, Вт/м²;

$T_{B,i}$ — значение температуры нижнего торца образца, °C;

$T_{H,i}$ — значение температуры нижнего торца образца, °C.

h — высота образца, м.

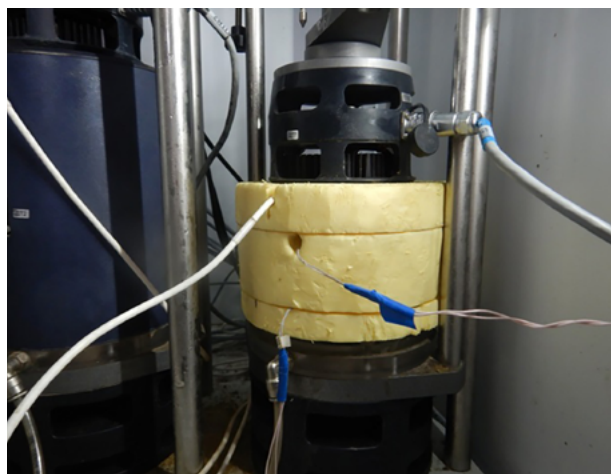


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки (выполнено авторами)

Результаты лабораторного эксперимента

Поверочные опыты, выполненные на образцах из стали и фторопласта 4-Ф, показали высокую сходимость экспериментальных данных и известных значений коэффициентов теплопроводности указанных материалов, что подтверждает корректность работы собранной экспериментальной установки.

Каждый опыт выполнялся на трех образцах одного состава (из одного замеса ГЦР). За результат опыта принималось среднее значение коэффициента теплопроводности по трем испытаниям. Зависимости коэффициента теплопроводности λ^p затвердевшего ГЦР от исследованных факторов эксперимента представлены на рис. 4.

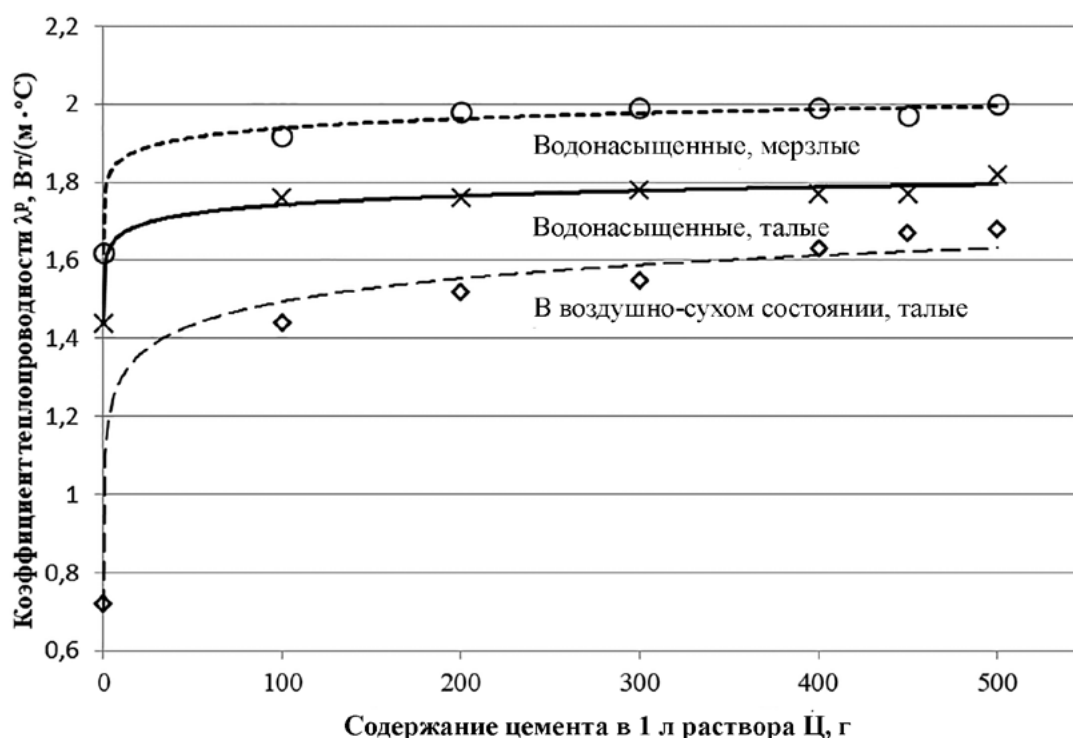


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплопроводности затвердевшего ГЦР от исследованных факторов эксперимента (выполнено авторами)

Полученные зависимости (рис. 4) с высокими коэффициентами достоверности (более 0,98) аппроксимируются логарифмическими уравнениями:

$$\lambda_f^p = 0,0347 \ln(\Pi) + 1,779, \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{вл}}^p = 0,0326 \ln(\Pi) + 1,592, \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{в/с}}^p = 0,0853 \ln(\Pi) + 1,1012, \quad (4)$$

где λ_f^p — коэффициент теплопроводности водонасыщенного ГЦР в мерзлом состоянии;

$\lambda_{\text{вл}}^p$ — коэффициент теплопроводности водонасыщенного ГЦР в талом состоянии;

$\lambda_{\text{в/с}}^p$ — коэффициент теплопроводности талого ГЦР в воздушно-сухом состоянии;

Π — содержание цемента в 1 л раствора, г.

Уравнения (2)–(4) рекомендуется использовать для решения практических задач в пределах граничных условий проведенных испытаний (значения содержания цемента в растворе Π от 100 до 500 г на литр раствора). Как показали исследования [15], при содержании цемента в ГЦР менее 100 г/л затвердевший раствор нестабилен при водонасыщении и не рекомендуется к применению.

Анализ полученных зависимостей показал, что теплопроводность затвердевшего грунтоцементного раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии. Даже при минимальном содержании цемента (100 г на литр раствора) теплопроводность образцов относительно исходного грунта повышается в 2 раза в воздушно-сухом состоянии, на 22 % при полном водонасыщении и на 19 % в мерзлом состоянии. В диапазоне значений содержания цемента в ГЦР от 100 до 500 г на литр раствора количество вяжущего Π уже не является значимым фактором, влияющим на теплопроводность. Только в воздушно-сухом состоянии образцов при увеличении содержания цемента в ГЦР закономерно увеличивается их коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности затвердевшего ГЦР (в диапазоне содержания цемента

от 100 до 500 г на литр раствора) существенно увеличивается при водонасыщении и далее при промерзании образцов. Если в воздушно-сухом состоянии образцов ГЦР коэффициент теплопроводности меняется в пределах от 1,44 до 1,68 (среднее значение 1,58) Вт/(м · °С), то в водонасыщенном состоянии от 1,76 до 1,82 (среднее значение 1,78) Вт/(м · °С), а в мерзлом состоянии от 1,92 до 2,00 (среднее значение 1,97) Вт/(м · °С).

С точки зрения управления теплопроводностью грунтоцементных инъекционных растворов увеличение количества вяжущего в материале не представляется целесообразным. При этом использование инъекционных растворов с минимальным содержанием вяжущего экономически более оправдано. Кроме того, такой подход приводит к меньшему растеплению многолетнемерзлых грунтов (ММГ) за счет экзотермии цемента при твердении.

На основании результатов лабораторного эксперимента становится возможным проведение сравнительного численного моделирования. Его цель — анализ эффективности термостабилизации грунтового массива комбинированным способом (инъектирование грунтоцементного раствора (ГЦР) и установка парожидкостных сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ)) в сравнении с применением только парожидкостных СОУ. Эффективность оценивается по коэффициенту теплообмена.

Результаты численного моделирования

В рамках численного моделирования выполнен теплотехнический расчет в специализированном программном комплексе. Для решения поставленной задачи в качестве модели рассматривался грунтовый параллелепипед (размеры в плане 3,0 × 3,0 м, глубина 20,0 м) с установленным парожидкостным СОУ длиной 10 м. Модель имитирует отдельный элемент термостабилизируемого основания земляного полотна. Отметка кровли

ММГ моделировалась на глубине 10 м по нижней отметке установленного СОУ. Для моделирования задавались характерные для Арктической зоны ЯНАО грунтовые и климатические параметры.

Комбинированный способ термостабилизации (инъектирование ГЦР и установка парожидкостных СОУ) моделировался путем включения в модель на глубине с 5,0 до 10,0 м прослоев инъектированного затвердевшего раствора мощностью 0,3 м и шагом по глубине 0,8 м. Теплотехнические характеристики для раствора принимались по результатам проведенного лабораторного эксперимента и [7].

Была выполнена серия расчетов указанных выше моделей для первого после установки СОУ холодного периода года с варьированием исходной влажности термостабилизируемых талых грунтов основания.

На рис. 5 представлен пример распределения температурных полей по глубине моделей на 15 декабря первого холодного периода года — для модели с СОУ и модели с комбинированным

способом термостабилизации. Распределение температур показано для вертикали, проходящей на расстоянии 0,5 м от оси СОУ, в интервале глубин от 5,0 до 10,0 м (испарительная зона СОУ).

Аналогичные результаты получены для других периодов и расстояний от оси СОУ. Сравнительный анализ температурных полей после первого холодного периода года показал повышенный охлаждающий эффект при применении комбинированного способа термостабилизации.

По результатам серии расчетов, после определения эквивалентных коэффициентов теплообмена применяемых устройств установлено: комбинированный способ термостабилизации (в зависимости от влажности исходных талых грунтов) эффективнее применения СОУ по данному параметру. В рамках проведенных расчетов коэффициент теплообмена комбинированного устройства превысил показатель для СОУ до 8 %.

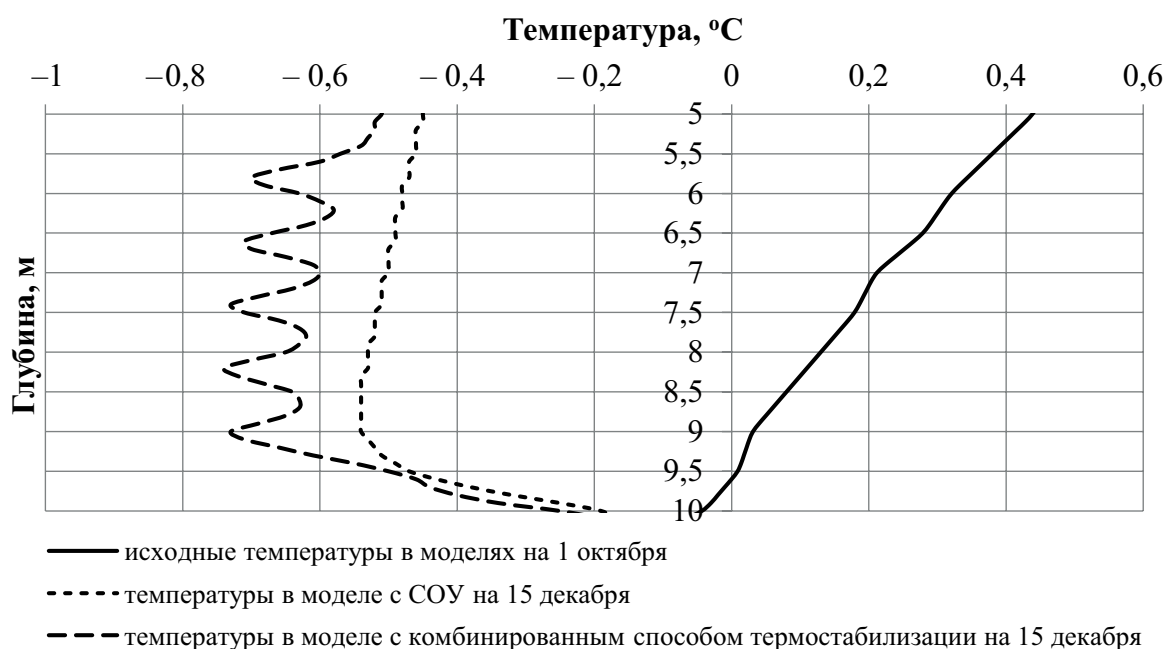


Рис. 5. Распределение полей температур по глубине моделей на 15 декабря первого холодного периода года (выполнено авторами)

Этот факт подтверждает влияние грунтоцементных инъекционных растворов на теплотехническую эффективность СОУ, что необходимо учитывать при проектировании комбинированного способа термостабилизации основания земляного полотна.

Заключение

Выполненный лабораторный эксперимент позволил определить зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов от содержания вяжущего в их составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении, а также в мерзлом и талом состоянии. Полученные зависимости рекомендуется использовать для решения практических задач (в пределах граничных условий проведенных испытаний) при инъектировании ГЦР в основания транспортных сооружений в районах распространения ММГ.

Установлено, что теплопроводность затвердевшего грунтоцементного раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии, причем существенный относительный эффект наблюдается уже при минимальном содержании вяжущего. Применение инъекционных растворов с минимальным количеством вяжущего экономически более оправдано. Кроме того, это приводит к меньшему растеплению многолетнемерзлых грунтов (ММГ) за счет экзотермии цемента при твердении.

Коэффициент теплопроводности затвердевшего грунтоцементного раствора (ГЦР) существенно возрастает при водонасыщении, а затем — при промерзании материала.

На основании полученных данных выполнено численное моделирование, которое подтвердило эффективность термостабилизации грунтового массива комбинированным способом (инъектирование грунтоцементного раствора (ГЦР) совместно с установкой парожидкостных сезонно-действующих охлаждающих устройств

(СОУ)) по сравнению с применением только парожидкостных СОУ. Эффективность оценена по коэффициенту теплообмена, что необходимо учитывать при проектировании и расчетах.

Несмотря на то что инъектирование ГЦР приводит к удорожанию охлаждающих установок, данный метод позволяет:

- сократить потребность в количестве или мощности СОУ за счет повышенного коэффициента теплопроводности грунтоцементных растворов;
- стабилизировать слабые грунты основания в таликовых зонах в достаточно короткие сроки;
- исключить возможное морозное пучение основания при восстановлении многолетнемерзлых грунтов (ММГ).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Список источников

1. Sakharov I. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov et al. // X International Scientific Siberian Transport Forum — TransSiberia 2022 (Novosibirsk, 02–05 March 2022). — Novosibirsk: B. V. Elsevier, 2022. — Pp. 2506–2514. — DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
2. Елисеев Д. О. Транспортная инфраструктура арктических регионов России в условиях деградации вечной мерзлоты / Д. О. Елисеев, Ю. В. Наумова // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2019. — № 10-1(56). — С. 113–118. — DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11226.
3. Ланис А. Л. Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщ-

щения. — 2025. — № 1(73). — С. 68–76. — DOI: 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4. Цернант А. А. Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах / А. А. Цернант // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2013. — № 3(170). — С. 26–31.

5. Дыдышко П. И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты / П. И. Дыдышко // Криосфера Земли. — 2017. — Т. 21. — № 4. — С. 43–57.

6. Gallavresi F. Ground freezing — the application of the mixed method (brine-liquid nitrogen) / F. Gallavresi // Engineering Geology. — 1981. — Vol. 18. — Iss. 1. — Pp. 361–375. — DOI: 10.1016/0013-7952(81)90074-0.

7. Разуваев Д. А. Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин // Мир транспорта. — 2024. — Т. 22. — № 1 (110). — С. 6–16. — DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8. Lomov P. O. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov // Sciences in Cold and Arid Regions. — 2021. — Vol. 13. — Iss. 5. — Pp. 357–365. — DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

9. Ибрагимов М. Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов: монография / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. — М.: АСВ, 2012. — 256 с.

10. Бабаскин Ю. Г. Укрепление грунтов инъектированием при ремонте автомобильных дорог / Ю. Г. Бабаскин. — Минск: Белорусский национальный технический университет, 2002. — 177 с.

11. Ланис А. Л. Метод напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. — 2009. — № 2. — С. 32–34.

12. Ашпиз Е. С. Опыт сооружения земляного полотна железных дорог, расположенных на многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения / Е. С. Ашпиз // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. — 2019. — № 1. — С. 21–27.

13. Liu H. Monitoring roadbed stability in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway by MT-InSAR technology / H. Liu, S. Huang, C. Xie, B. Tian et al. // Land. — 2023. — Vol. 12. — P. 474. — DOI: 10.3390/land12020474.

14. Колосков Г. В. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне / Г. В. Колосков, Э. В. Ибрагимов, Р. Г. Гамзаев // Геотехника. — 2015. — № 6. — С. 4–11.

15. Разуваев Д. А. Оптимизация составов инъекционных растворов для стабилизации слабого основания эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2025. — № 1(97). — С. 8–16. — DOI: 10.46973/0201-727X_2025_1_8.

Дата поступления: 31.10.2025

Решение о публикации: 29.11.2025

Контактная информация:

РАЗУВАЕВ Денис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; razdenis@mail.ru

ПЕЧЕНКИН Роман Сергеевич — аспирант; pechenkinrs@gmail.com

ЛАНИС Алексей Леонидович — д-р техн. наук, проф.; alangeo@bk.ru

Considering Thermal Conductivity of Injection Solutions in Combination with Cooling Systems Within the Railway Formation Foundation

D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis

Siberian State University of Railway Engineering, 191, Dusy Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Razuvaev D. A., Pechenkin R. S., Lanis A. L. Considering Thermal Conductivity of Injection Solutions in Combination with Cooling Systems Within the Railway Formation Foundation // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1085–1095. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1085-1095

Summary

Purpose: Under specific conditions, the degradation of the permafrost soils in railway formation foundations is not only characterized by thermal subsidence, but also by the development of weak soils that consolidate over time, potentially leading to slope instability and embankment creep. In such scenarios, a combined thermal stabilization approach can be applied, which includes the injection of soil- cement solutions alongside the installation of vapour-liquid cooling systems (SCD). This research establishes the correlation between the thermal conductivity coefficients of hardened injection solutions and the binder content. It also conducts a numerical model of the thermal stabilization of a soil mass to assess the effectiveness of the combined method, measured by the heat transfer coefficient, in comparison with the application of vapour-liquid systems alone.

Methods: A laboratory experiment was set up and carried out to determine the thermal conductivity coefficient of solutions using the steady-state thermal regime method. Heat engineering calculations were performed using a specialized software package. **Results:** The dependences of the thermal conductivity coefficients of hardened soil-cement injection mortars on the binder content have been determined under various conditions, such as air-dry state, full water saturation, and frozen-thawed states. It has been established that the thermal conductivity of the hardened mortar is significantly greater than that of the original soil in equivalent conditions, with a notable relative impact observed even at minimal binder content.

Practical significance: The established relationships are recommended for addressing practical challenges associated with injecting soil-cement mortars into the foundations of transportation structures in areas where permafrost soils are prevalent. Numerical modelling has demonstrated that the combined method proposed for thermal stabilization of the soil mass is more effective in terms of heat exchange coefficient than relying solely on vapour-liquid soil-cement mixtures, highlighting the importance of this consideration in design and calculations.

Keywords: Formation, foundation soils, weak soils, permafrost soils, soil injection, injection solutions, soil thermal stabilization, cooling devices/systems.

References

1. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V. et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in the Arctic zone in conditions of global warming. X International Scientific Siberian Transport Forum — TransSiberia 2022 (Novosibirsk, 02–05 March 2022). Novosibirsk: B. V. Elsevier, 2022, pp. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

2. Eliseev D. O., Naumova Yu. V. Transportnaya infrastruktura arkticheskikh regionov Rossii v usloviyakh degradatsii vechnoy merzloty [Transport infrastructure of the Arctic regions of Russia under conditions of permafrost degradation]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and Business: Theory and Practice]. 2019, Iss. 10-1(56), pp. 113–118. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11226. (In Russian)

3. Lanis A. L., Razuvaev D. A., Usov D. A., Pechenkin R. S. Obosnovanie sistemy inzhenerno geokriologicheskogo monitoringa ekspluatiruemykh nasypov lineynykh transportnykh sooruzheniy v usloviyakh Yamalo Nenetskogo avtonomnogo okruga [Justification of the system of engineering-geocryological monitoring of operated embankments of linear transport structures in the conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous District]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2025, Iss. 1(73), pp. 68–76. DOI: 10.52170/1815-9265_2025_73_68. (In Russian)
4. Tsernant A. A. Innovatsionnye tekhnologii upravleniya temperaturoy gruntovykh massivov transportnykh sooruzheniy v arkticheskikh shirotyakh [Innovative technologies for temperature control of soil masses of transport structures in Arctic latitudes]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century]. 2013, Iss. 3(170), pp. 26–31. (In Russian)
5. Dydyshko P. I. Deformatsii zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti i ikh ustraneniye v usloviyakh vechnoy merzloty [Deformations of railway subgrade and their elimination under permafrost conditions]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth]. 2017, vol. 21, Iss. 4, pp. 43–57. (In Russian)
6. Gallavresi F. Ground freezing — the application of the mixed method (brine-liquid nitrogen). *Engineering Geology*. 1981, vol. 18, Iss. 1, pp. 361–375. DOI: 10.1016/0013-7952(81)90074-0.
7. Razuvaev D. A., Pechenkin R. S. Stabilizatsiya osnovaniya zemlyanogo polotna in'ektsionnym sposobom pri degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Stabilization of subgrade base by injection method under degradation of permafrost soils]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2024, vol. 22, Iss. 1 (110), pp. 6–16. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1. (In Russian)
8. Lomov P. O., Lanis A. L., Razuvaev D. A., Kavardakov M. G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021, vol. 13, Iss. 5, pp. 357–365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.
9. Ibragimov M. N., Semkin V. V. *Zakrepleniye gruntov in'ektsiei tsementnykh rastvorov: monografiya* [Soil stabilization by cement solution injection: monograph]. Moscow: ASV Publ., 2012, 256 p. (In Russian)
10. Babaskin Yu. G. *Ukrepleniye gruntov in'ektirovaniem pri remonte avtomobil'nykh dorog* [Soil strengthening by injection in road repair]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet Publ., 2002, 177 p. (In Russian)
11. Lanis A. L. Metod napornoj in'ektsii dlya usileniya nasypov [Method of pressure injection for embankment strengthening]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Track and Track Facilities]. 2009, Iss. 2, pp. 32–34. (In Russian)
12. Ashpiz E. S. Opyt sooruzheniya zemlyanogo polotna zheleznnykh dorog, raspolozhennykh na mnogoletnemerzlykh gruntakh: problemy i puti ikh resheniya [Experience in constructing railway subgrades on permafrost soils: problems and solutions]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhD* [Bulletin of the United Scientific Council of JSC RZD]. 2019, Iss. 1, pp. 21–27. (In Russian)
13. Liu H., Huang S., Xie C., Tian B. et al. Monitoring roadbed stability in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway by MT InSAR technology. *Land*. 2023, vol. 12, p. 474. DOI: 10.3390/land12020474.
14. Koloskov G. V., Ibragimov E. V., Gamzaev R. G. K voprosu vybora optimal'nykh sistem termostabilizatsii gruntov pri stroitel'stve v kriolitozone [On the issue of selecting optimal soil termostabilization systems in construction in the cryolithozone]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2015, Iss. 6, pp. 4–11. (In Russian)
15. Razuvaev D. A., Pechenkin R. S., Lanis A. L. Optimizatsiya sostavov in'ektsionnykh rastvorov dlya stabilizatsii slabogo osnovaniya ekspluatiruемого zemlyanogo polotna v kriolitozone [Optimization of injection solution compositions for stabilizing weak subgrade base in cryolithozone]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2025, Iss. 1(97), pp. 8–16. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_1_8. (In Russian)

Received: October 31, 2025

Accepted: November 29, 2025

Author's information:

Denis A. RAZUVAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; razdenis@mail.ru

Roman S. PECHENKIN — Postgraduate Student; pechenkinrs@gmail.com

Alexey L. LANIS — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alangeo@bk.ru