Логарифмическая аппроксимация кривых зависимостей разностей амплитуд температур в зависимости от времени как инструмент сравнительной оценки конструктивно-технологических решений термостабилизации земляного полотна на многолетнемёрзлых грунтах

Артюшенко Игорь Александрович
кандидат технических наук, доцент, Заведующий кафедрой «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта (МИИТ)», tywka351@mail.ru,

Пантелеев Тимур Михайлович
ассистент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта (МИИТ)», panteleev-tm@rut-miit.ru

Строительство и модернизация объектов транспортной инфраструктуры в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов требуют обоснованного выбора конструктивно-технологического решения (КТР) термостабилизации земляного полотна. В более ранней работе авторов [1] на примере насыпи Дальневосточной железной дороги (разъезд «Окурдан») методом трёхмерного нестационарного теплофизического моделирования в программном комплексе «Frost 3D» [2] было показано, что устройство каменной наброски на откосах существенно превосходит по термостабилизирующему эффекту вариант с заменой откосов на супесь, а усложнённая конструкция «клещевидной обоймы» даёт дополнительный, но менее значимый выигрыш по тепловому балансу. Там же было отмечено, что кривая снижения сезонной амплитуды температуры в основании насыпи по внешнему виду напоминает логарифмическую зависимость вида $y=\log_a x$. Настоящая статья развивает это наблюдение до формализованного подхода сравнительной оценки КТР. Показано, что после выхода теплового режима основания на квазистационарный годовой цикл ($t \geq 16$ лет) кривая снижения сезонной амплитуды хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от $\ln(t)$ ($R^2 = 0{,}87\ldots0{,}95$), а параметр [a] (либо обратный ему и численно устойчивый коэффициент $k = 1/\ln(a)$) может использоваться как количественный показатель эффективности КТР. Подход апробирован на трёх вариантах КТР разъезда «Окурдан»; ранжирование вариантов по параметру a полностью совпало с независимым ранжированием по конечным расчётным температурам основания. Обсуждаются границы применимости подхода, вычислительная неустойчивость прямой оценки параметра a и перспективы использования коэффициента k в системах интеллектуальной поддержки принятия проектных решений [3].

Ключевые слова: Транспорт, термостабилизация грунтов, многолетнемерзлые грунты, железная дорога, земляное полотно, каменная наброска, криолитозона, логарифмическая аппроксимация, обратная задача, конструктивно-технологическое решение.

Введение

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, развитие восточного полигона железных дорог – Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей – остаётся одним из ключевых приоритетов отрасли. Значительная часть этих линий проходит в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов, где устойчивость земляного полотна напрямую зависит от сохранения естественного теплового режима основания [3, 4, 5, 6]. Выбор конструктивно-технологического решения (КТР) для достижения термостабилизации – устройство каменной наброски, сезонно-охлаждающих устройств, их комбинаций – в инженерной практике по-прежнему опирается главным образом на визуальное сопоставление расчётных температурных полей и кривых, полученных для каждого варианта в отдельности [7].

Эффективность каменной наброски как пассивного средства охлаждения многолетнемёрзлых грунтов подтверждается также зарубежными исследованиями на объектах железнодорожной инфраструктуры: длительные наблюдения на Цинхай-Тибетской железной дороге показали подъём кровли многолетнемёрзлых грунтов и устойчивое охлаждающее действие каменной наброски после её устройства [8].

Параллельно развивается направление интеллектуальной поддержки принятия таких решений. Применение экспертных систем и графовых моделей конструктивных элементов позволяет формализовать технологические связи и автоматизировать генерацию номенклатуры работ [9]. Однако для работы подобных систем требуется не только качественное, но и количественное, желательно скалярное, описание эффективности рассматриваемых КТР – показатель, который можно сравнивать, ранжировать и, в перспективе, прогнозировать без повторного трёхмерного теплофизического расчёта для каждого варианта.

В работе [1] авторы, сопоставляя на примере железнодорожной насыпи разъезда «Окурдан» три варианта устройства откосов (супесь, каменная наброска, каменная наброска с клещевидной обоймой), обратили внимание, что после выхода теплового режима основания на квазистационарный годовой цикл график зависимости разницы сезонных амплитуд температуры от времени по внешнему виду напоминает логарифмическую зависимость вида $y=\log_a x$. Это наблюдение носило иллюстративный характер и было получено для единственного варианта КТР без статистической проверки качества аппроксимации и без сопоставления с другими вариантами.

Цель настоящей статьи – формализовать и проверить это наблюдение как подход сравнительной количественной оценки КТР. Для этого решаются следующие задачи: 1) построить и статистически оценить логарифмическую регрессионную модель кривой снижения сезонной амплитуды температуры для трёх вариантов КТР разъезда «Окурдан»; 2) сопоставить полученные значения параметра [a] (и производного от него коэффициента k) с независимым ранжированием тех же вариантов по конечной расчётной температуре основания; 3) установить границы применимости модели и указать направление дальнейших исследований, включая использование коэффициента k как признака для систем интеллектуальной поддержки выбора КТР.

Основная часть

Объект исследования и рассматриваемые варианты КТР

Объектом исследования, является железнодорожная насыпь на пикете 3567+83,99 разъезда «Окурдан» Дальневосточной железной дороги. Расчётная модель и исходные данные (физико-механические и теплофизические свойства грунтов, климатические граничные условия, коэффициенты приведения температуры воздуха к подошве наброски) заимствованы из [1] без изменений; трёхмерные нестационарные теплотехнические расчёты выполнены в программном комплексе «Frost 3D» на основе решения задачи Стефана с учётом фазовых переходов поровой влаги.

Сопоставляются три варианта КТР:

а) замена материала откосов на супесь (ИГЭ-7) – вариант, не предусматривающий активной термостабилизации, принят в качестве базового;

б) устройство каменной наброски на откосах – вариант, принятый в проектной документации «Челябжелдорпроект»;

в) каменная наброска с устройством дополнительных коробов, так называемая «клещевидная обойма».

Для варианта (в) расчёт продлён до 15 июля 2126 г. (100 лет эксплуатации) с использованием того же массива результатов моделирования, что и при подготовке диссертационного исследования по данной теме. Варианты (а) и (б) рассматриваются на исходном расчётном горизонте до 15 июля 2076 г. [1].

В качестве контрольной точки анализа принята точка с координатами (0 м; −30 м; 878 м) – под осью насыпи, на глубине залегания подошвы наброски. Выбор этой точки обусловлен тем, что именно в ней в [1] зафиксирован наиболее выраженный сезонный ход температуры; в точках на удалении 9 м и 19 м от бермы сезонная амплитуда температуры после стабилизации не превышает 0,1°С, что делает логарифмическую аппроксимацию в этих точках статистически неинформативной (см. раздел «Практическое применение и границы применимости»).

Перспективным направлением дальнейшего развития подхода является его применение непосредственно на стадии проектирования новых железнодорожных линий в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов [10, 11]. При накоплении представительной базы расчётных значений коэффициента k для различных инженерно-геологических и климатических условий, а также конструктивных параметров земляного полотна, данный показатель может использоваться для предварительного отбора и ранжирования вариантов конструктивно-технологических решений ещё до выполнения полного комплекса детальных трёхмерных нестационарных теплофизических расчётов. В таком случае предлагаемый подход может стать одним из элементов информационной или интеллектуальной системы поддержки проектных решений: по заданным условиям трассы и параметрам предполагаемой конструкции формируется предварительная оценка её термостабилизирующей эффективности, после чего наиболее перспективные варианты проходят детальную расчётную проверку. Это позволит связать результаты теплофизического моделирования не только с оценкой уже разработанных конструкций, но и непосредственно с задачами обоснования конструктивных решений при проектировании новых железнодорожных линий в криолитозоне.

Постановка обратной задачи выбора оптимального КТР

Для контрольной точки на каждый год t расчётного периода определяется сезонная амплитуда температуры как модуль разности зимнего и летнего расчётных значений:

$$A(t) = |T_{зима}(t) - T_{лето}(t)|, \quad (1)$$

где $T_{зима}(t)$, $T_{лето}(t)$ – расчётные температуры грунта в контрольной точке на 15 января и 15 июля года t соответственно.

Анализ рядов A(t) для всех трёх вариантов КТР показывает общую закономерность (рисунок 1): в первые 1–2 года после ввода линии в эксплуатацию амплитуда резко возрастает (фаза активного выхолаживания основания), затем в течение примерно 15 лет так же быстро убывает, после чего – начиная с t ≈ 16 лет (2042 г.) – выходит на медленно убывающий квазистационарный участок, слабо модулированный заложенным в расчёт трендом потепления (+0,15°С за 5 лет начиная с 2051 г.). Именно этот квазистационарный участок представляет интерес с точки зрения долгосрочной оценки эффективности КТР.

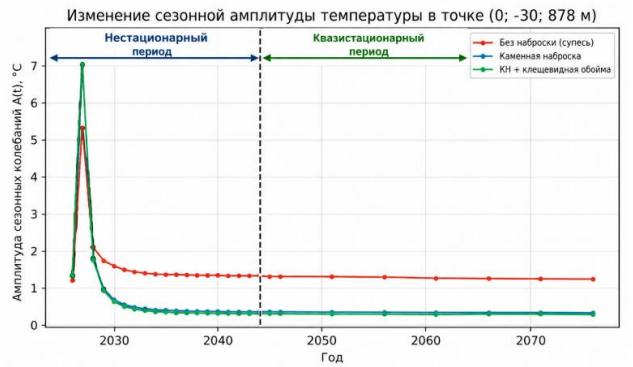


Рисунок 1 – Изменение сезонной амплитуды температуры A(t) в точке (0 м; −30 м; 878 м) для трёх вариантов КТР (разработано автором)

КН – каменная наброска

Смысл понятия «квазистационарный годовой цикл», заключается в следующем. Сразу после ввода линии в эксплуатацию тепловой режим основания является переходным: грунт, изменивший условия теплообмена с поверхностью после отсыпки насыпи, ещё не стабилизировался из-за новой конструкции, и от года к году характер изменения температуры существенно различается – сначала следует резкий скачок сезонной амплитуды, затем её быстрое затухание. В начальный период после сооружения насыпи температурное поле основания находится в переходном состоянии, обусловленном изменением граничных условий теплообмена и формированием нового положения фронтов сезонного промерзания и оттаивания. Этот участок (для рассмотренного объекта – первые t < 16 лет) определяется иной физикой – продвижением границы оттаивания/промерзания в теле и основании насыпи, а не установившимися сезонными колебаниями. Начиная примерно с t ≈ 16 лет (2042 г.) тепловой режим выходит на цикл, в котором из года в год повторяется практически одна и та же картина: зимний минимум и летний максимум температуры в контрольной точке почти не меняются от года к году, а их разность (сезонная амплитуда) становится близка к постоянной. Приставка «квази» отражает то, что режим не является абсолютно неизменным: амплитуда продолжает медленно, на сотые доли градуса в год, снижаться, а заложенный в расчёт климатический тренд потепления (+0,15°С за 5 лет начиная с 2051 г.) постепенно смещает весь температурный фон вверх. Именно для этого участка, с устоявшимся, предсказуемым характером сезонных колебаний, – логарифмическая модель (3) – (4) оказывается состоятельной (R^2 = 0,873…0,954); попытка применить её к переходному временному участку (t < 16 лет) удовлетворительного результата не дала, что согласуется с различием физических механизмов, определяющих поведение основания на этих двух стадиях.

Первая попытка напрямую аппроксимировать логарифмической функцией график разности температур за расчётный период не дала удовлетворительного результата: форма кривой на всём интервале ему не соответствовала. Аппроксимация же именно накопленного снижения сезонной амплитуды – то есть разницы между «пиковой» амплитудой и её текущим значением – на участке стабилизации (t ≥ 16 лет) оказалась состоятельной. Введём величину накопленного снижения амплитуды относительно первого года устойчивого выхолаживания (t = 1, 2027 г.):

$$C(t) = A_п - A(t), \quad (2)$$

где $A_п$ – амплитуда сезонных колебаний в первый год устойчивого выхолаживания основания (реперное значение).

Гипотеза, выдвинутая по результатам визуального анализа графиков, состоит в том, что на участке стабилизации (t ≥ 16 лет) величина C(t) описывается логарифмической зависимостью вида

$$y = \log_a x, \quad (3)$$

что эквивалентно линейной зависимости C(t) от ln(t):

$$C(t) = k \cdot \ln(t) + b, \quad k = 1/\ln a, \quad a = \exp(1/k), a > 1. \quad (4)$$

Тогда обратная задача выбора оптимального КТР формулируется следующим образом: для каждого варианта КТР по расчётным данным программного комплекса Frost 3D методом наименьших квадратов оценить коэффициенты k и b линейной регрессии C(t) на ln(t); оптимальным считается вариант с минимальным значением k (эквивалентно – максимальным значением [a] при [a] > 1), поскольку меньшему k соответствует более пологая кривая C(t), то есть более быстрый и полный выход основания на низкий уровень остаточных сезонных колебаний температуры – признак устойчивой долговременной термостабилизации.

Результаты расчёта параметра a для сравниваемых вариантов КТР

Для каждого из трёх вариантов КТР по данным таблицы 1 построена линейная регрессия C(t) = k·ln(t) + b на участке t ≥ 16 лет (годы 2042 – 2076 для вариантов «супесь», «каменная наброска» и «КН + клещевидная обойма»). Результаты приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1

Параметры логарифмической регрессии C(t) = k·ln(t) + b для трёх вариантов КТР, точка (0 м; −30 м; 878 м) (разработано автором)

Вариант КТР	A_п (2027), °C	A(2042), °C	A(кон. периода), °C	k = 1/ln a	b	R^2	a = exp(1/k)
Без каменной наброски (супесь) – базовый вариант	5,35	1,33	1,24 (2076)	0,1392	3,604	0,919	$\approx 1{,}32 \cdot 10^3$
Каменная наброска на откосах (принятое в проекте КТР)	7,26	0,36	0,33 (2076)	0,0265	6,823	0,954	$\approx 2{,}42 \cdot 10^{16}$
Каменная наброска + клещевидная обойма	7,27	0,30	0,28 (2076)	0,0198	6,913	0,873	$\approx 8{,}41 \cdot 10^{21}$

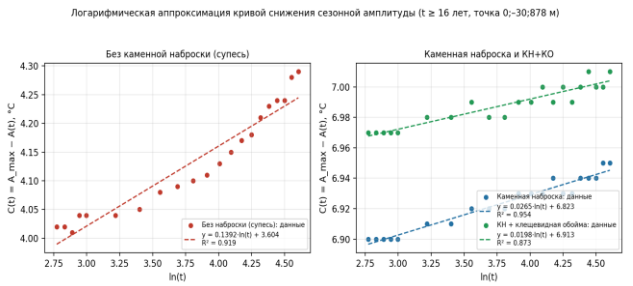


Рисунок 2 – Линейная аппроксимация C(t) от ln(t) на участке стабилизации (t ≥ 16 лет) для трёх вариантов КТР (разработано автором)

Во всех трёх случаях коэффициент детерминации превышает 0,87 (R^2 = 0,873…0,954), что подтверждает состоятельность логарифмической модели именно на квазистационарном участке – при попытке включить в регрессию годы активного выхолаживания (t < 16) качество аппроксимации резко падает, что согласуется с физическим смыслом модели: логарифмический закон описывает медленное затухание сезонных колебаний в уже сформировавшемся квазистационарном тепловом поле, а не переходный процесс продвижения фронта промерзания.

Для проверки согласованности предложенного показателя с традиционной оценкой теплового состояния выполнено сопоставление ранжирования вариантов по параметру [a], использованы конечные расчётные температуры основания на 15.07.2076 г. в трёх точках по глубине насыпи (0 м, 9 м и 19 м от бермы), приведённые в [1] (таблица 2). Ранжирование вариантов КТР по параметру a полностью совпадает с ранжированием по конечной температуре основания: наименее эффективен вариант без каменной наброски, наиболее эффективен вариант с клещевидной обоймой, что подтверждает исходную гипотезу – чем выше значение [a] чем ниже коэффициент k), тем эффективнее КТР справляется с задачей термостабилизации земляного полотна.

Полученный результат согласуется с данными длительных натурных наблюдений за железнодорожной насыпью с каменной наброской на Цинхай-Тибетской железной дороге. Применение слоя крупнообломочного материала обеспечивает устойчивое охлаждение основания, способствует восстановлению многолетнемёрзлого состояния грунтов и сохраняет тепловой баланс в течение длительного периода эксплуатации [12].

Таблица 2
Сопоставление ранжирования КТР по параметру [a] и по конечной расчётной температуре основания (разработано автором)

Вариант КТР	T на 15.07.2076, °C (0 м / 9 м / 19 м от бермы)	[a] = exp(1/k)	Ранг по T	Ранг по [a]
Супесь (без наброски)	−13,20 / −6,24 / −5,45	≈1,32·10³	3 (худший)	3 (худший)
Каменная наброска	−16,47 / −6,94 / −5,73	≈2,42·10¹⁶	2	2
КН + клещевидная обойма	−16,61 / −7,09 / −5,88	≈8,41·10²¹	1 (лучший)	1 (лучший)

Обращает на себя внимание, что значения параметра a различаются между вариантами на много порядков (от ≈1,3·10³ до ≈8,4·10²¹). Это не является ошибкой вычислений, а отражает известное свойство функции a = exp(1/k): при малых значениях k (то есть при почти плоской кривой C(t) на участке стабилизации) параметр [a] чрезвычайно чувствителен к малейшим изменениям k, вплоть до потери практического смысла его абсолютного значения – именно с этой неустойчивостью, по-видимому, было связано получение в предварительных оценках (выполненных построением обычной линии тренда средствами MS Excel) значений параметра a с 12–16 нулями. В связи с этим для практического сравнения вариантов КТР предлагается использовать не сам параметр [a], а численно устойчивый коэффициент регрессии k = 1/ln(a), который меняется в разумных пределах (в рассмотренном примере – от 0,0198 до 0,1392) и однозначно (монотонно убывающей функцией) связан с эффективностью термостабилизации.

Полученный коэффициент k целесообразно рассматривать не только как параметр аппроксимирующей зависимости, но и как интегральный показатель динамики теплового состояния основания. В отличие от конечной расчётной температуры, значение которой определяется выбранным расчётным горизонтом, коэффициент k характеризует интенсивность снижения остаточной сезонной амплитуды на сформировавшемся квазистационарном участке теплового режима. Поэтому его использование позволяет перейти от оценки КТР по одному конечному состоянию к оценке характера долговременного изменения температурного режима.

При этом коэффициент k не следует интерпретировать как самостоятельный физический параметр грунта или конструкции. Его значение является результатом совместного влияния теплофизических свойств грунтов, геометрии земляного полотна, параметров термостабилизирующей конструкции и климатических воздействий. Вследствие этого практический смысл имеет прежде всего сравнительный анализ значений k, полученных для вариантов, рассчитанных в сопоставимых исходных условиях.

Практическое применение и границы применимости подхода

Предложенный коэффициент k может использоваться как показатель интенсивности долговременного изменения остаточной сезонной температурной амплитуды либо как параметр динамики установившегося температурного режима при сравнении нескольких КТР по результатам теплофизического моделирования – без необходимости визуально сопоставлять графики температурных кривых или изотермы в разные моменты времени. В перспективе значения k, накопленные по библиотеке ранее выполненных расчётов для разных объектов, климатических районов и конструктивных параметров наброски (толщина слоя, фракция камня, геометрия коробов), могут быть использованы как обучающая выборка для построения регрессионной или нейросетевой модели, прогнозирующей ожидаемую эффективность КТР непосредственно по его конструктивным параметрам – то есть без выполнения полного трёхмерного нестационарного расчёта на стадии предварительного сравнения вариантов [13]. Это согласуется с общим направлением развития экспертных систем поддержки проектных решений для земляного полотна в криолитозоне [1].

Вместе с тем подход имеет ограничения. Во-первых, он применим только в точках расчётной области, где после стабилизации сохраняется измеримая сезонная амплитуда температуры: в настоящей работе это выполняется в точке под осью насыпи (0 м от бермы), тогда как в точках на удалении 9 м и 19 м расчётная амплитуда после 2042 г. не превышает 0,05–0,1°C, и коэффициент регрессии k для таких рядов статистически ненадёжен (единичные значащие цифры исходных данных дают чрезмерный разброс оценки). Во-вторых, модель верна только для квазистационарного участка (t ≥ 16 лет для рассмотренного объекта); граница этого участка в общем случае зависит от конкретных грунтовых и климатических условий и должна определяться отдельно для каждого объекта [14], например, по критерию стабилизации разницы зимних и летних температур, использованному в [1]. В-третьих, полученные значения k привязаны к конкретному объекту (разъезд «Окурдан») и климатическому району; для использования коэффициента как универсального критерия требуется его расчёт на представительной выборке объектов.

Заключение

В работе формализовано и статистически проверено сделанное ранее [1] наблюдение о логарифмическом характере кривой снижения сезонной амплитуды температуры в основании железнодорожной насыпи, термостабилизированной каменной наброской. Показано, что после выхода теплового режима основания на квазистационарный годовой цикл (t ≥ 16 лет) накопленное снижение сезонной амплитуды температуры C(t) хорошо описывается линейной зависимостью от ln(t) (R^2 = 0,873…0,954) для всех трёх рассмотренных вариантов КТР – супеси, каменной наброски и каменной наброски с клещевидной обоймой.

Ранжирование вариантов КТР по параметру логарифмической модели [a] (или обратному ему коэффициенту k = 1/ln(a)) полностью совпало с независимым ранжированием тех же вариантов по конечной расчётной температуре основания, что подтверждает пригодность предложенного показателя как количественного критерия эффективности термостабилизации. Поскольку прямая оценка параметра [a] численно неустойчива и может принимать величины, различающиеся на десятки порядков, для практического использования рекомендован коэффициент k, изменяющийся в разумных и легко сопоставимых пределах.

Подход применим на участке квазистационарного теплового режима и в точках расчётной области с измеримой остаточной сезонной амплитудой температуры; он не заменяет полный трёхмерный теплофизический расчёт, но может использоваться как вспомогательный количественный показатель при сравнении альтернативных КТР по уже выполненным расчётам, а также как признак для последующего построения моделей интеллектуальной поддержки выбора КТР на стадии предварительного проектирования земляного полотна на многолетнемёрзлых грунтах [15]. Направлением дальнейших исследований авторы считают накопление значений коэффициента k по представительной выборке объектов и конструктивных вариантов каменной наброски с целью построения прогнозной модели, связывающей k непосредственно с конструктивными параметрами КТР.

Литература

1. Артюшенко, И. А. Анализ влияния технологии каменной наброски на теплофизические процессы в основании земляного полотна, сложенного многолетнемерзлыми грунтами / И. А. Артюшенко, Т. М. Пантелеев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т 13. — № 2. — URL: https://t-s.today/PDF/16SATS226.pdf. — DOI: 10.15862/16SATS226. (дата обращения: 06.09.2026).
2. Ковенькин Д. А., Насников Д. Н., Чернецкая И. С. Применение программного комплекса Frost 3D для проведения теплотехнических расчётов земляного полотна // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 80–90. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-

90. URL: https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90 (дата обращения: 06.09.2026).
3. Шепитько, Т. В. Технологическое обоснование конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением экспертной системы / Т. В. Шепитько, А. В. Полянский, И. А. Артюшенко, А. С. Ноздрачёв // Нанотехнологии в строительстве. – 2025. – Т. 17, № 6. – С. 760–774. – DOI: 10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774. URL: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774 (дата обращения: 06.09.2026).
4. Жданова, С. М. Особенности принятия проектных решений по обеспечению устойчивости оснований железнодорожных насыпей на высокотемпературных вечномерзлых грунтах : дис. … канд. техн. наук : 05.22.06 / Жданова Светлана Мирзахановна. – СПб., 1999. – 174 с. URL: https://www.dissercat.com/content/osobennosti-prinyatiya-proektnykh-reshenii-po-obespecheniyu-ustoichivosti-osnovanii-zhelezno (дата обращения: 06.09.2026).
5. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – М. : Стандартинформ, 2020. – 143 с. https://protect.gost.ru/sp/details/997877d3-6a46-41ac-b370-54f779d37669 (дата обращения: 06.09.2026).
6. Ашпиз Е. С., Хрусталёв Л. Н. Предотвращение деградации многолетнемёрзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV, № 5. – С. 45–50. https://earthcryosphere.ru/arch/2020-5/Ashpiz_2020-5/ (дата обращения: 06.09.2026).
7. Шестакова, Д.С. Расчетное обоснование противодеградационных мероприятий на многолетнемерзлых грунтах в основании земляного полотна / Д. С. Шестакова, А. Л. Исаков // Интеллектуальный потенциал Сибири : материалы 29-й Регион. науч. студ. конф., посвящ. Году науки и технологий в России, Новосибирск, 17–21 мая 2021 г. : в 4 ч. Ч. 4 / под ред. Д. О. Соколовой. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2021. – С. 226–229. URL: https://lomonosov-msu.ru/file/event/6631/eid6631_attach_bb5235b184e4631703dc282ee2fa34b5598ee5a9.pdf (дата обращения: 06.09.2026).
8. Mu Y., Ma W., Wu Q., Sun Z., Liu Y. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai–Tibet Railway in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology. 2012. Vol. 78. P. 107–114. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.01.014. URL: https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.01.014 (дата обращения: 06.09.2026).
9. Минайлов, Г. П. Способы понижения температуры вечномерзлых грунтов на железных и автомобильных дорогах путем применения каменной наброски : дис. … канд. техн. наук : 05.23.11 / Минайлов Гавриил Павлович ; науч. рук. Пассек В. В. – М., 2003. – 193 с. URL: https://disser.uz/sposoby-ponizhenija-temperatury-vechnomerzlyh-gruntov-na-zheleznyh-i-avtomobilnyh (дата обращения: 06.09.2026).
10. Кондратьев В. Г. «Вечная» проблема железных дорог на вечной мерзлоте // Инженерная защита. 2015. № 10. С. 78–82. URL: https://territoryengineering.ru/bez-rubriki/vechnaya-problema-zheleznyh-dorog-na-vechnoj-merzlote/ (дата обращения: 06.09.2026).
11. СП 447.1325800.2024. Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования. – М.: Минстрой России, 2024. URL: https://protect.gost.ru/sp/details/a135bfa3-1006-47be-b92e-cae6b1516835 (дата обращения: 06.09.2026).
12. Luo J., Niu F., Liu M., Lin Z., Yin G. Field experimental study on long-term cooling and deformation characteristics of crushed-rock revetment embankment at the Qinghai–Tibet Railway // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 139. P. 256–263. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.138. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.138 (дата обращения: 06.09.2026).
13. Ашпиз, Е. С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты / Е. С. Ашпиз, Т. С. Вавринюк // Мир транспорта. – 2012. – № 3 (41). – С. 102–107. URL: https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/670 (дата обращения: 06.09.2026).
14. Гаврилов, И. И. Способы мониторинга температуры в вечномерзлых грунтах / И. И. Гаврилов, Д. Ю. Кропачев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2014. – № 4. – С. 64–66. URL: https://www.vniioeng.ru/_user_files/file/ants/et/Equipment_and_Technologies_2014-04_rus.pdf (дата обращения: 06.09.2026).
15. Артюшенко И. А. Комбинированное использование каменной наброски и сезонно действующих охлаждающих устройств на железнодорожной насыпи, устраиваемой на многолетнемерзлых грунтах / И. А. Артюшенко, Д. А. Ворожко // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях: материалы II Международной научно-практической конференции. — М.: Дашков и К°, 2025. — С. 27–30. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=87683599. (дата обращения: 06.09.2026).

Logarithmic Approximation of Temperature Amplitude Difference Curves as a Tool for Comparative Assessment of Structural and Technological Solutions for Thermal Stabilization of Roadbeds on Permafrost

Artyushenko I.A., Panteleev T.M.
Russian University of Transport (MIIT)

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The construction and modernization of transport infrastructure in permafrost regions require a well-founded selection of structural and technological solutions (STS) for the thermal stabilization of roadbeds. In an earlier study by the authors [1], which examined an embankment on the Far Eastern Railway (at the Okurdan siding) using 3D transient thermal modeling in the "Frost 3D" software suite [2], it was demonstrated that placing a rock-fill layer on the embankment slopes provides a significantly better thermal stabilization effect than replacing the slope material with sandy loam. Furthermore, a more complex "clamping" (or "tongs-like") structural configuration offers an additional, though less substantial, improvement to the thermal balance. It was also noted that the curve representing the reduction in seasonal temperature amplitude at the base of the embankment resembles a logarithmic function of the form $y = \log_a x$. This article develops that observation into a formalized approach for the comparative assessment of various STS. It is shown that once the thermal regime of the base reaches a quasi-steady annual cycle ($t \geq 16$ years), the curve of the seasonal amplitude reduction can be effectively approximated as a linear function of $\ln(t)$ ($R^2 = 0.87–0.95$). Consequently, the parameter a—or its reciprocal, the numerically stable coefficient $k = 1/\ln(a)$—can serve as a quantitative indicator of the efficiency of a given structural and technological solution. The approach was tested on three variants of the design and technological solution (DTS) for the "Okurdan" siding; the ranking of these variants based on the parameter *a* perfectly matched an independent ranking based on the final calculated temperatures of the foundation soil. The study discusses the limits of the approach's applicability, the computational instability inherent in the direct estimation of parameter *a*, and the potential for using the coefficient *k* within intelligent decision-support systems for engineering design [3].

Keywords: Transport, ground thermal stabilization, permafrost, railway, roadbed, rockfill, cryolithozone, logarithmic approximation, inverse problem, design and technological solution.

References

1. Artyushenko, I. A. Analysis of the Impact of Rock Placement Technology on Thermophysical Processes in the Foundation of a Roadbed Made of Permafrost Soils / I. A. Artyushenko, T. M. Panteleev // Transport Structures. - 2026. - Vol. 13. - No. 2. - URL: https://t-s.today/PDF/16SATS226.pdf. - DOI: 10.15862/16SATS226. (Accessed: 06.09.2026).
2. Kovenkin, D. A., Nasnikov, D. N., Chernetskaya, I. S. Application of the Frost 3D software package for thermal calculations of a roadbed // Modern technologies. Systems analysis. Modeling. - 2022. - No. 3 (75). – P. 80–90. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90. URL: https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90 (date of access: 06.09.2026).
3. Shepitko, T. V. Technological substantiation of design solutions for railway roadbeds on permafrost soils using an expert system / T. V. Shepitko, A. V. Polyan-sky, I. A. Artyushenko, A. S. Nozdrachev // Nanotechnology in construction. – 2025. – Vol. 17, No. 6. – pp. 760–774. – DOI: 10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774. URL: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774 (accessed: 06.09.2026).
4. Zhdanova, S. M. Specifics of Making Design Decisions to Ensure the Stability of Railway Embankment Foundations on High-Temperature Permafrost Soils : Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.22.06 / Zhdanova, Svetlana Mirzakhanovna. – St. Petersburg, 1999. – 174 p. URL: https://www.dissercat.com/content/osobennosti-prinyatiya-proektnykh-reshenii-po-obespecheniyu-ustoichivosti-osnovanii-zhelezno (accessed: 06.09.2026).
5. SP 25.13330.2020. Foundations and Substructures on Permafrost Soils : Updated version of SNiP 2.02.04-88. – Moscow : Standartinform, 2020. – 143 p. https://protect.gost.ru/sp/details/997877d3-6a46-41ac-b370-54f779d37669 (accessed: 06.09.2026). 6. Ashpiz E. S., Khrustalev L. N. Prevention of degradation of permafrost soils in the foundation of railway embankments // Earth's Cryosphere. – 2020. – Vol. XXIV, No. 5. – pp. 45–50. https://earthcryosphere.ru/arch/2020-5/Ashpiz_2020-5/ (accessed: 06.09.2026).
7. Shestakova D. S., Isakov A. L. Computational justification of anti-degradation measures for permafrost soils in the foundation of the railway roadbed // Intellectual Potential of Siberia: Proceedings of the 29th Regional Scientific Student Conference, dedicated to the Year of Science and Technology in Russia, Novosibirsk, May 17–21, 2021: in 4 parts. Part 4 / ed. by D. O. Sokolova. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publishing House, 2021. – pp. 226–229. URL: https://lomonosov-msu.ru/file/event/6631/eid6631_attach_bb5235b184e4631703dc282ee2fa34b5598ee5a9.pdf (accessed: 06.09.2026).
8. Mu Y., Ma W., Wu Q., Sun Z., Liu Y. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai–Tibet Railway in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology. 2012. Vol. 78. Pp. 107–114. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.01.014. URL: https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.01.014 (accessed: 06.09.2026).
9. Minaylov, G. P. Methods for Lowering the Temperature of Permafrost Soils under Railways and Highways through the Use of Rock Fill: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.23.11 / Gavriil Pavlovich Minaylov; Scientific Supervisor: V. V. Passek. – Moscow, 2003. – 193 p. URL: https://disser.uz/sposoby-ponizhenija-temperatury-vechnomerzlyh-gruntov-na-zheleznyh-i-avtomobilnyh (accessed: 06.09.2026).
10. Kondratyev, V. G. The "Eternal" Problem of Railways on Permafrost // Engineering Protection (Inzhenernaya Zashchita). 2015. No. 10. Pp. 78–82. URL: https://territoryengineering.ru/bez-rubriki/vechnaya-problema-zheleznyh-dorog-na-vechnoj-merzlote/ (accessed: 06.09.2026).
11. SP 447.1325800.2024. Railways in Permafrost Regions. Basic Design Principles. – Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2024. URL: https://protect.gost.ru/sp/details/a135bfa3-1006-47be-b92e-cae6b1516835 (accessed: 06.09.2026).
12. Luo J., Niu F., Liu M., Lin Z., Yin G. Field experimental study on long-term cooling and deformation characteristics of crushed-rock revetment embankment at the Qinghai–Tibet Railway // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 139. P. 256–263. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.138. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.138 (accessed: 06.09.2026).