

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139.6

DOI: 10.15372/KZ20250504

EDN: OSAFSU

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ****О.Ф. Данилов¹, А.Н. Краев¹, З.Ш. Шанхоев^{1,*}, А.И. Синицкий²**¹ Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия² ГАУ ЯНАО “Научный центр изучения Арктики”, 629008, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

*Автор для контакта; e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru

Разработано конструктивно-технологическое решение, направленное на изменение температурного режима и сохранение верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания на требуемой глубине. Выявлены основные причины разрушения автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Численным моделированием установлено влияние воды, скопившейся у подошвы земляного полотна, на изменение во времени наклонной границы многолетнемерзлых грунтов основания в зависимости от заложения откоса автомобильной дороги. Численным моделированием подобраны основные геометрические параметры конструктивно-технологического решения, влияющие на изменение температуры грунтов основания. Методом математического планирования эксперимента выведены уравнения регрессии, описывающие изменение во времени угла наклонной границы многолетнемерзлых грунтов в основании автомобильной дороги.

Ключевые слова: автомобильная дорога, устойчивость основания, конструктивно-технологическое решение, температурный режим, многолетнемерзлые грунты.

Ссылка для цитирования: Данилов О.Ф., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш., Синицкий А.И. Конструктивно-технологическое решение, направленное на изменение температурного режима грунтов основания автомобильной дороги // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 38–44. DOI: 10.15372/KZ20250504. EDN: OSAFSU.

**A DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTION AIMED AT CHANGING
THE TEMPERATURE REGIME OF THE ROAD BASE SOILS****O.F. Danilov¹, A.N. Kraev¹, Z.Sh. Shankhoev^{1,*}, A.I. Sinitskiy²**¹ Tyumen Industrial University, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia² Scientific Center for Arctic Studies, Respubliki St. 20, Salekhard, 629008 Russia

*Corresponding author; e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru

A design and technological solution to modify the soil temperature regime and maintain the upper boundary of permafrost in the roadbed at the required depth was developed. The main causes of road failure in permafrost regions were identified. The effect of water accumulated at the base of the roadbed on the temporal variation of the inclined permafrost table depending on the road slope was studied using numerical modeling. Numerical modeling was used to select the key geometric parameters of the design and technological solution controlling the temperature variation of the foundation soils. Regression equations describing the temporal variation of the slope of permafrost table in the roadbed were obtained using the mathematical planning of the experiment.

Keywords: highway, foundation stability, design and technological solution, temperature conditions, permafrost soils.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемерзлые грунты (ММГ) занимают до 65 % территории России. По характеру распространения многолетняя мерзлота подразделяется на сплошную, прерывистую и островную. В области распространения ММГ находятся важнейшие объекты топливно-энергетического ком-

плекса и инфраструктуры, развитие которых является залогом экономического благосостояния страны. Районы России, расположенные в области распространения ММГ, даже при сравнительно малой численности населения, обеспечивают до 11 % валового внутреннего продукта страны, глав-

ным образом за счет добычи природных ресурсов. Следовательно, разведанные запасы месторождений нефти и газа, а также темпы их освоения будут только расти [Коротков и др., 2015].

Для комплексного освоения территории Севера, где в основном преобладают ММГ, необходимо возводить качественные автомобильные и железные дороги. Возведение насыпи на многолетнемерзлых грунтах вызывает изменение естественных условий теплообмена. Нарушение естественного теплообмена между атмосферой и ММГ основания приводит к изменению геометрического расположения границы ММГ под сооружением, что, в свою очередь, способствует потере устойчивости основания автомобильной дороги. Постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна формирует фильтрационный поток на границе “основание – земляное полотно” (рис. 1). Влияние данного фактора приводит к изменению температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов, что обуславливает сокращение сроков нормальной эксплуатации линейного объекта (автомобильной дороги).

Для повышения транспортно-эксплуатационных характеристик сети автомобильных дорог разрабатываются различные мероприятия, способствующие обеспечению непрерывного потока транспортных средств. В основном эти мероприятия направлены на сохранение верхнего горизонта многолетнемерзлых грунтов (ВГММГ) под сооружением [Валиев, 2019].

Влияние водоема на изменение температурного режима грунтов основания земляного полотна

Проблемой водоотвода от автомобильных и железных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов посвящены научные труды Е.С. Ашпица, Н.И. Быкова, В.В. Воронцова, В.В. Гулецкого, П.И. Дыдышко, С.М. Ждановой, В.А. Кудрявцева, А.В. Куртинова, Н.П. Костенко, А.Н. Краева, П.Н. Каптерева, Г.И. Куркова, К.Д. Морозова, Н.Д. Меренкова, Г.П. Минайлова, Н.П. Мурованного, В.В. Пассека, Н.А. Перетрухина, Г.С. Пересенкова, М.И. Сумгина, И.Д. Ткачевского, Н.И. Хвостика, А.А. Цернанта, Н.А. Цуканова и др.

Нарушение естественного стока воды при возведении земляного полотна приводит к скоплению воды у его подошвы, что негативно отражается на температурном режиме грунтов основания [Игошин и др., 2016; Горелик, Земеров, 2020]. С.Н. Юсуповым [2003] разработана конструкция фильтрующей выемки с применением каменной наброски, что позволяет поддерживать грунты основания в требуемом температурном диапазоне при сохранении продольной фильтрации.



Рис. 1. Скопление воды у подошвы земляного полотна [Ашпиз, 2014].

В работе О.В. Тукмаковой [2022] представлены результаты обследования 25-километрового участка перегона Денисовский–Чульман АК “ЖДЯ”. Установлено, что обводнение данного участка способствовало оттаиванию многолетнемерзлого основания земляного полотна от 2 до 3 м. В качестве мероприятия для стабилизации земляного полотна было разработано конструктивно-технологическое решение “контрбанкетов переменного сечения”.

Наличие фильтрации грунтовых вод способствует изменению теплового режима грунтов основания и земляного полотна. Я.В. Клочковым [2015] разработан и обоснован способ (противофильтрационный экран) для остановки фильтрации воды сквозь основание сооружения. Данное решение направлено на повышение надежности сооружения.

Коллективом авторов были разработаны конструктивные решения, способствующие ограничению теплового влияния поверхностных вод, расположенных вдоль откосных частей сооружения [Макаров и др., 2018].

Разработка конструктивно-технологического решения и обоснование его оптимальных геометрических параметров

Для уменьшения влияния от тепловых источников (скопления воды у подошвы земляного полотна) через откосную часть земляного полотна и фильтрации воды на границе “основание – земляное полотно” было разработано (рис. 2) конструктивно-технологическое решение (КТР), способствующее изменению температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна.

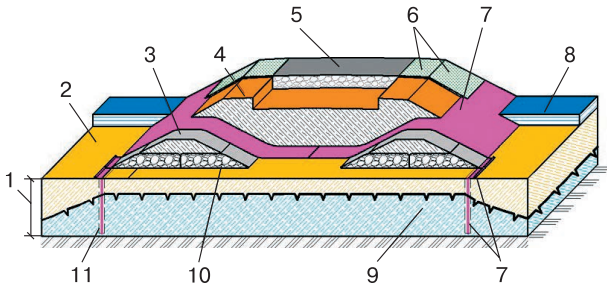


Рис. 2. Схема конструктивно-технологического решения.

1 – мощность сезоннооттаивающего слоя грунта основания; 2 – дневная поверхность грунта; 3 – геоконтейнер; 4 – грунт земляного полотна; 5 – дорожная одежда; 6 – биоматы с присыпкой некondиционным грунтом толщиной 0.03 м; 7 – водонепроницаемый геотекстиль; 8 – постоянное или периодическое скопление воды; 9 – многолетнемерзлый грунт; 10 – гранулированный теплоизоляционный материал; 11 – траншея для размещения водонепроницаемого текстиля.

Для исключения попадания воды в основание земляного полотна прокладывают продольную траншею. Следующим шагом является (ручное) раскатывание рулона из водонепроницаемого полотна с максимальным натяжением материала для устранения перекосов. Рулон раскатывают в поперечном направлении земляного полотна с запасом по обеим его сторонам, достаточным для смыкания верхних ветвей полуобоймы. Далее в траншею вертикально помещают нижние ветви полуобоймы. После размещения водонепроницаемого полотна производят обратную засыпку траншеи тем же выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. В откосной части земляного полотна в трапециевидной форме располагают теплоизоляционные геоконтейнеры, наполненные искусственным гранулированным теплоизоляционным материалом (ИГТМ), позволя-



Рис. 3. Вариативные геометрические параметры конструктивно-технологического решения.

h_v – глубина воды; h_{gr} – высота теплоизоляционного материала в геоконтейнере; h_{gr} – высота грунта в геоконтейнере; b_{tr} – ширина траншеи; b_{pr1} , b_{pr2} – ширина верхней и нижней части геоконтейнера; $1:m_1$ – заложение внешнего откоса геоконтейнера; $1:m_2$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера.

щим снизить тепловое влияние от скопления воды у подошвы земляного полотна. Применяют ИГТМ для сохранения ВГММГ, а водонепроницаемые геоконтейнеры используют для защиты теплоизоляционного материала от попадания в него воды. После укладки теплоизоляционных геоконтейнеров с ИГТМ свободные края водонепроницаемого полотна заводят на поверхность с максимальным натяжением. Далее выполняют послойную отсыпку и уплотнение земляного полотна на ММГ. Полуобоймы устраивают для повышения устойчивости многолетнемерзлого основания земляного полотна и предотвращения массового проникновения воды в тело земляного полотна через откосную часть за счет инфильтрации и в многолетнемерзлое основание за счет фильтрации. Для снижения негативного влияния экзогенных процессов в откосной части земляного полотна автомобильной дороги на ММГ устраивают биоматы с присыпкой из некondиционных грунтов. Далее переходят к устройству конструктивных слоев дорожной одежды. Схема КТР представлена на рис. 2.

Численным моделированием в программном комплексе QFrost при различных начальных граничных условиях были определены геометрические параметры (рис. 3) конструктивно-технологического решения (b_{pr1} – ширина верхней части геоконтейнера, b_{pr2} – ширина нижней части геоконтейнера, $1:m_2$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера).

Согласно исследованиям Л.Н. Хрусталева [2005], температура в основании земляного полотна у кромки проезжей части (характерная точка) должна быть отрицательной, что обеспечивает пластично-мерзлое состояние грунтов в основании под главной площадкой сооружения (рис. 4). Если температура положительная, то необходимо вводить дополнительные мероприятия по понижению температуры. В качестве критериев эффек-

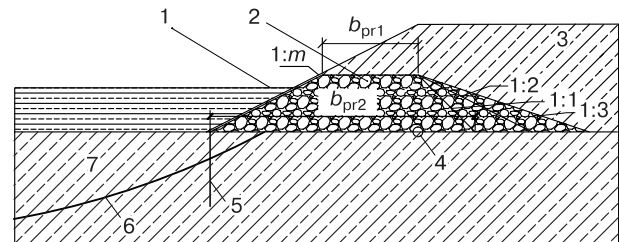


Рис. 4. Расчетная схема расположения характерной точки измерения температуры грунта.

$1:m$ – заложение внешнего откоса геоконтейнера; $1:1$, $1:2$, $1:3$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера. 1 – постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна; 2 – теплоизоляционный геоконтейнер; 3 – земляное полотно; 4 – характерная точка измерения температуры грунта; 5 – водонепроницаемое полотно; 6 – граница ММГ; 7 – оттаявший слой основания.

тивности вариаций геометрических параметров предложенного КТР были выбраны параметры, наиболее сильно влияющие на изменение температурного режима грунтов основания земляного полотна в характерной точке на первый год эксплуатации в период максимального оттаивания. При выполнении численного моделирования фиксировались значения температуры ММГ, мощности таликовой зоны и угла наклона верхней границы ММГ (α_t) в основании земляного полотна на первый год эксплуатации в период максимального оттаивания. Вариативные геометрические параметры КТР представлены на рис. 3.

Геометрические параметры: ширина обочины (B_{ob}), ширина проезжей части (B_{pch}), высота дорожной одежды (h_{do}), высота земляного полотна (H_{zp}), заложение откоса ($1:m_1$) – принимаются согласно техническому паспорту автомобильной дороги. Ширина продольной траншеи назначается исходя из технологической операции по размещению водонепроницаемого полотна и последующего уплотнения траншеи выработанным грунтом, но не менее 0.5 м. Глубина траншеи определяется по теплотехническому расчету (ниже деятельного слоя) для защемления водонепроницаемого материала в толщу ММГ. Минимальный нахлест материала по оси сооружения должен быть не менее 0.3 м. Высота теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) должна быть на 0.1 м выше максимально возможного уровня скопившейся воды (h_v) у подшвы земляного полотна.

Заложение внешнего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) принималось идентично заложению откоса автомобильной дороги. В качестве ИГТМ рассматривался ДиатомИК с теплофизическими характеристиками: теплопроводность 0.1 Вт/(м·°C), теплоемкость 576 Дж/(м³·°C). Климатические условия при численном моделировании назначались по метеостанции г. Надым, теплофизические характеристики грунтов основания земляного полотна принимались согласно [СП 25.13330.2020, 2020].

Среднемесячная температура воздуха представлена в таблице. На нижней границе и на боковых поверхностях рассматриваемого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия второго рода. Температура по всему массиву основания принималась равной температуре начала замерзания (T_{bf}) грунта (песок, супесь, суглинок, глина) в зависимости от его типа ($T_{bf}^{sand} = -0.10$ °C, $T_{bf}^{sandy loam} = -0.15$ °C, $T_{bf}^{loam} = -0.20$ °C, $T_{bf}^{clay} = 0.20$ °C). На верхней границе модели задавались граничные условия третьего рода. После этого выполнялась калибровка модели путем расчета основания на 100 лет и сопоставления величин деятельного слоя и средней температуры многолетнемерзлого основания с

нормативными значениями. При численном моделировании рассматривались грунты основания земляного полотна, наиболее часто встречающиеся на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Границы варьирования внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) следующие: 1:1, 1:2, 1:3. Результаты численного эксперимента по изменению температуры грунтов в зависимости от угла заложения внутреннего откоса (призмы) ($1:m_2$) в характерной точке представлены на рис. 5.

По результатам численного моделирования установлено, что при заложении внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 1:1 с максимальным соотношением $b_{pr1}/b_{pr2} = 0.25$ формируется отрицательная температура $T = -0.03...-0.02$ °C. При заложении внутреннего откоса 1:2 также формируется отрицательная температура $T = -0.03...-0.15$ °C, кроме песчаных грунтов с суммарной влажностью мерзлого грунта $W_{tot} = 20-25$ % при минимальном соотношении $b_{pr1}/b_{pr2} = 0.13$, когда температура положительная $T = 0.09-0.02$ °C. При заложении внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 1:3 во всех случаях формируется отрицательная температура, однако при этом происходит перерасход ИГТМ на 20 % в сравнении с заложением откоса 1:2, а снижение температуры для песчаных грунтов составляет $T = 0.12-0.07$ °C. Наиболее эффективное заложение внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) равно 1:2.

Из результатов численных экспериментов следует, что отрицательная температура грунтов основания земляного полотна с ММГ в характерной точке (см. рис. 4) обеспечивается устройством теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) для песчаных грунтов ($W_{tot} = 20, 25$ %) высо-

Среднемесячная температура воздуха по данным метеостанции г. Надым

Месяц	Температура воздуха, °C
I	-24.5
II	-24.0
III	-16.8
IV	-8.8
V	-1.0
VI	8.8
VII	15.5
VIII	11.4
IX	5.6
X	-5.4
XI	-16.1
XII	-21.9

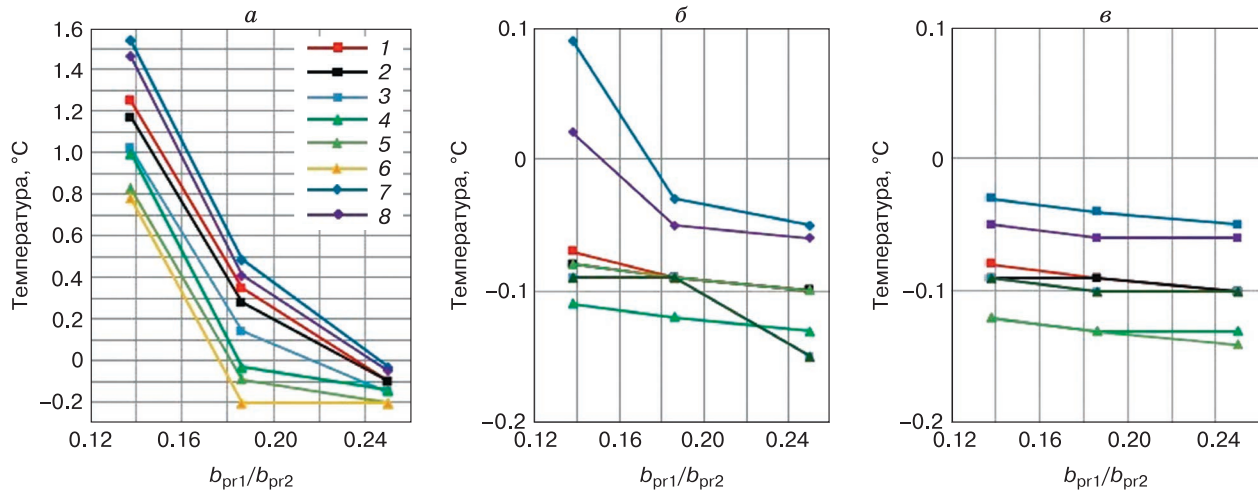


Рис. 5. Результаты численного эксперимента по заложению внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы): 1:1 (а), 1:2 (б), 1:3 (в).

На оси абсцисс отложено отношение верхней части призмы к нижней ее части. 1–3 – супесь ($1 - W_{\text{tot}} = 25\%$, $2 - W_{\text{tot}} = 30\%$, $3 - W_{\text{tot}} = 35\%$); 4–6 – суглинок, глина ($4 - W_{\text{tot}} = 25\%$, $5 - W_{\text{tot}} = 30\%$, $6 - W_{\text{tot}} = 35\%$); 7, 8 – песок ($7 - W_{\text{tot}} = 20\%$, $8 - W_{\text{tot}} = 25\%$), где W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта.

той $h_{\text{pr}} = 0.7\text{--}0.9$ м, для супесей ($W_{\text{tot}} = 20, 30, 35\%$) $h_{\text{pr}} = 0.5\text{--}0.6$ м, для суглинков и глин ($W_{\text{tot}} = 20, 30, 35\%$) $h_{\text{pr}} = 0.4\text{--}0.6$ м. Графики изменения высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) представлены на рис. 6.

Численным моделированием установлено, что для грунтов с влажностью более 25 % при высоте теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 0.5 м фиксируется отрицательная температура. Увеличение высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) от 0.6 до 1 м способствует понижению температуры в характерной точке при

влажности грунтов от 20 до 25 % на $\sim 0.28^\circ\text{C}$ (для песчаных грунтов) и на $\sim 0.14^\circ\text{C}$ (для глинистых грунтов). Отсюда следует, что возможно снижение высоты ИГТМ с использованием местного грунта.

Для расчета снижения угла наклонной границы ММГ (α_t) использовался метод математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых параметров принимали высоту ИГТМ, вид и влажность грунтов основания земляного полотна. Графики изменения угла α_t наклонной границы ММГ во времени представлены на рис. 7.

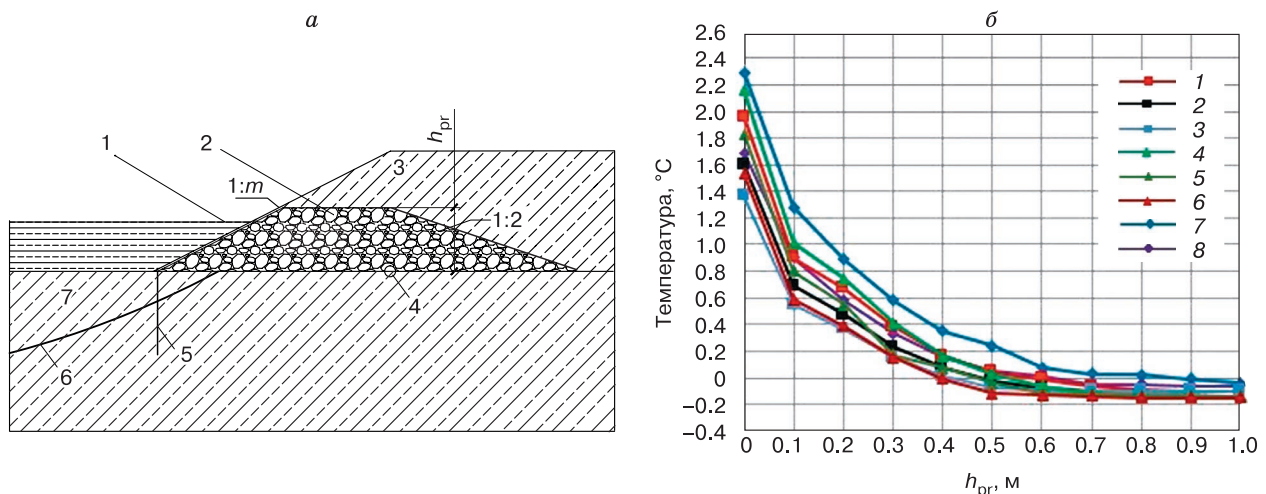


Рис. 6. Изменение температуры в характерной точке в зависимости от высоты геоконтейнера.

а – расчетная схема, обозначения см. на рис. 4; б – изменение температуры в контрольной точке в зависимости от высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) h_{pr} , обозначения см. на рис. 5.

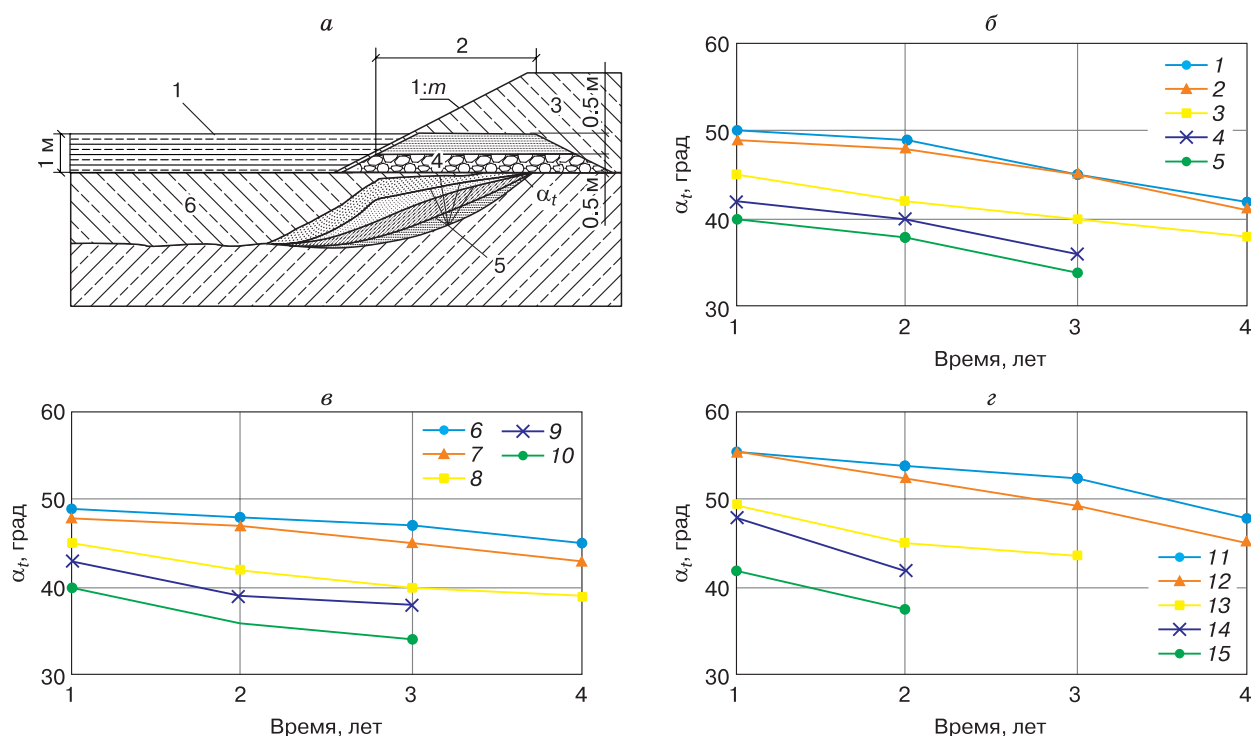


Рис. 7. Зависимости изменения наклонной границы (α_t) многолетнемерзлых грунтов от геометрического параметра (h_{pr}) теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) для различных грунтов.

а – расчетная схема: 1 – постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна; 2 – рассматриваемая область откосной части сооружения; 3 – земляное полотно; 4 – искусственный гранулированный теплоизоляционный материал; 5 – наклонная граница ММГ; 6 – оттаявший слой грунтового основания; α_t – угол наклона границы ММГ; 1:m – заложение наружного откоса призмы; б – суглинки, глины, $W_{tot} = 25-35\%$; в – супесь, $W_{tot} = 25-35\%$; г – песок, $W_{tot} = 20-25\%$; 1, 6, 11 – $h_{pr} = 0.1$ м; 2, 7, 12 – $h_{pr} = 0.2$ м; 3, 8, 13 – $h_{pr} = 0.3$ м; 4, 9, 14 – $h_{pr} = 0.4$ м; 5, 10, 15 – $h_{pr} = 0.5$ м.

На основе численного моделирования доказано, что наиболее эффективный результат наблюдается при высоте теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 0.5 м. Для глинистых грунтов и супеси наклонная граница ММГ смещается к нижней бровке на третий год эксплуатации земляного полотна. Для песчаных грунтов эта граница формируется у нижней бровки на второй год эксплуатации земляного полотна. Формирование наклонной границы в основании ММГ у нижней бровки сооружения не представляет эксплуатационной опасности для автомобильной дороги в целом.

Из полученных результатов рассчитаны уравнения регрессии:

для суглинка и глины (при $W_{tot} = 25-35\%$)

$$\alpha_t = 54.43 - 25.15h_{pr} \cdot 2.16T;$$

для песка (при $W_{tot} = 20-25\%$)

$$\alpha_t = 61.19 - 23.19h_{pr} \cdot 1.55T;$$

для супеси (при $W_{tot} = 25-35\%$)

$$\alpha_t = 53.68 - 26.95h_{pr} \cdot 1.51T,$$

где h_{pr} – высота теплоизоляционного геоконтейнера (призмы), м; T – период эксплуатации земляного полотна, лет.

ВЫВОДЫ

На основании литературных источников и проведенных численных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы.

1. Основные причины разрушения земляного полотна связаны с протаиванием грунтов многолетнемерзлого основания.

2. Естественное нарушение теплообмена и скопление воды у подошвы земляного полотна приводят к понижению ВГММГ и формированию наклонной границы ММГ в основании сооружения, которая снижает устойчивость основания.

3. Разработано конструктивно-технологическое решение, позволяющее изменить температурный режим грунтов основания и сохранить ВГММГ под основной площадкой земляного полотна.

4. На основе численного моделирования подобраны геометрические параметры конструктивно-технологического решения и получены уравне-

ния регрессии, позволяющие оценить изменение во времени угла наклона границы ММГ (α_t). Это дает возможность своевременно принимать решения о разработке дополнительных мероприятий на участках с постоянным или периодическим скоплением воды у подошвы земляного полотна.

Благодарности. *Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, осуществляемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту “Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений” (FEWN-2024-0006).*

Литература

- Ашпиз Е.С.** Наука о земляном полотне для железнодорожных магистралей // Евразия Вести. Сер. VII, 2014. – URL: <https://posh-geotextil.ru/pub/stati-i-obzory/-nauka-o-zemlyanom-polutne-dlya-zheleznodorozhnyh-magistralej.html> (дата обращения: 29.08.2025).
- Валиев Н.А.** Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Трансп. инфраструктура Сиб. региона, 2019, т. 1, с. 538–541.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В.** Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. ТГУ. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1 (21), с. 10–40.
- Игошин М.Е., Парамонов М.В., Воронцов В.В.** Моделирование температурного режима основания эксплуатируемой автомобильной дороги с учетом конструктивного решения по стабилизации границы многолетнемерзлых грунтов // Геотехника, 2016, № 3, с. 34–41.
- Клочков Я.В.** Совершенствование методики расчета и регулирования температурного режима обводненных грунтовых оснований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2015, 23 с.
- Коротков Е.А., Константинов А.О., Мельникова А.А., Иванов К.С.** “Диатомик” – новый теплоизоляционный материал для дорожного строительства в условиях криолитозоны // Вестн. СИБАДИ, 2015, вып. 1 (41), с. 55–61.
- Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // Интернет-журн. Трансп. сооружения, 2018, т. 5, № 4, с. 1–12.
- СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 30.12.2020: введ. в действие с 01.07.2021. М., Минстрой России, 2020, 143 с.

Тукмакова О.В. Разработка и обоснование конструктивно-технологических решений для строительства дополнительных железнодорожных путей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2022, 20 с.

Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 542 с.

Юсупов С.Н. Конструктивно-технологические решения устройств водоотвода для земляного полотна железных и автомобильных дорог на вечной мерзлоте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003, 32 с.

References

- Ashpiz E.S. Science about the earth track for railway lines. Eurasia Vesti. Series VII, 2014. – URL: <https://posh-geotextil.ru/pub/stati-i-obzory/-nauka-o-zemlyanom-polutne-dlya-zheleznodorozhnyh-magistralej.html> (last visited: 29.08.2025).
- Valiev N.A. Thermocomplex, protection against degradation of subgrade foundations on permafrost soils. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transp. Infrastructure of the Siberian Region.], 2019, vol. 1, p. 538–541 (in Russian).
- Gorelik Ya.B., Zemerov I.V. Influence of surface flooding on the temperature regime of frozen soils. Vestnik TGU [Bulletin of the TSU. Phys. and mathematical modeling. Oil, gas, energy], 2020, vol. 6. No. 1 (21), p. 10–40 (in Russian).
- Igoshin M.E., Paramonov M.V., Vorontsov V.V. Modeling the temperature regime of the base of an operated highway taking into account the design solution for stabilizing the permafrost boundary. Geotekhnika [Geotechnics], 2016, No. 3, p. 34–41 (in Russian).
- Klochkov Ya.V. Improving the methodology for calculating and regulating the temperature regime of waterlogged soil foundations: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Khabarovsk, 2015, 23 p. (in Russian).
- Korotkov E.A., Konstantinov A.O., Melnikova A.A., Ivanov K.S. “Diatomik” – a new thermal insulation material for road construction in the cryolithozone. Vestnik SIBADI [Bulletin of the SIBADI], 2015, issue 1 (41), p. 55–61 (in Russian).
- Makarov A.S., Kraev A.N., Shankhoyev Z.Sh. Structural and technological solutions for the construction of roads on permafrost soils. Internet-Journal. Transport Structures, 2018, vol. 5, No. 4, p. 1–12 (in Russian).
- SP 25.13330.2020: Foundations and bases on permafrost soils: approved by the Ministry of Construction and Housing and Public Utilities of the Russian Federation on 30.12.2020: entered into force on 01.07.2021. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2020, 143 p. (in Russian).
- Tukmakova O.V. Development and justification of design and technological solutions for the construction of additional railway tracks: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Khabarovsk, 2022, 20 p. (in Russian).
- Khrustaleva L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone [Fundamentals of geotechnics in the cryolithozone]. Moscow, Moscow University Press, 2005, 542 p. (in Russian).
- Yusupov S.N. Design and technological solutions for drainage devices for the roadbed of railways and highways on permafrost: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Moscow, 2003, 32 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 31 июля 2024 г.,
после доработки – 9 января 2025 г.,
принята к публикации 6 сентября 2025 г.*