

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 4 / 2024, Vol. 11, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS424.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS424 (<https://doi.org/10.15862/05SATS424>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

УДК 69

Применение конструктивно-технологического мероприятия на подтопляемых участках автомобильной дороги в условиях вечной мерзлоты

Шанхоев З.Ш.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шанхоев Зураб Шабазгиреевич, e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема проектирования и строительства автомобильных дорог, возводимых в условиях криолитозоны по второму принципу проектирования с учетом ограничения осадок допустимыми пределами для конкретного типа покрытия. Рассмотрены способы стабилизации грунтов основания. Исследована нормативная база, регламентирующая проектирование линейных объектов в районах распространения вечной мерзлоты. Рассмотрен наиболее значимый фактор влияющий на изменение температурного режима, устойчивости грунтов основания и снижение транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги. Для изменения температурного режима и повышения устойчивости грунтов основания разработано конструктивно-технологическое мероприятие с учетом формирования водоема вдоль откосных частей земляного полотна. Представлена

общая схема и описание технологического процесса внедрения конструктивно-технологического мероприятия. Определены наиболее значимые геометрические характеристики предлагаемого решения. Выполнен прогноз изменения температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна без конструктивно-технологического мероприятия. Эффективность предложенного решения подтверждена численным моделированием в программном комплексе QFrost. Представлены результаты численного моделирования земляного полотна автомобильной дороги в условиях вечной мерзлоты. Сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям и задачи для дальнейшего исследования.

Ключевые слова: автомобильная дорога; земляное полотно; многолетнемерзлый грунт; конструктивно-технологическое мероприятие; температурный режим

The application of a constructional-technological measure on waterlogged sections of highways in permafrost conditions

Zurab Sh. Shankhоеv

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Zurab Sh. Shankhоеv, e-mail: shankhoevs@tyuiu.ru

Abstract. This article examines the challenges of designing and constructing highways in cryolithozone regions using the second design principle, which limits ground settlement to permissible thresholds for specific pavement types. The study analyzes methods for stabilizing the subgrade soils of highway roadbeds. It reviews regulatory frameworks regulating road construction in permafrost regions and identifies the most critical factor influencing thermal regime changes and subgrade soil stability.

To modify the thermal regime and enhance stability, a constructional-technological measure involving the formation of a water reservoir along the embankment slopes of the highway roadbed has been developed. A

general scheme and description of the constructional-technological process for implementing this measure are presented. The most significant geometric parameters of the proposed solution are identified. Predictions of thermal regime changes in permafrost subgrade soils are made both without and with the proposed measure. The effectiveness of the proposed solution is confirmed by numerical modeling using the QFrost software package. Results of numerical modeling of the highway roadbed in permafrost conditions are presented. Principal conclusions from the research and tasks for further study are formulated.

Keywords: highway; roadbed; permafrost; constructional-technological measure; thermal regime

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Вечномерзлые грунты (многолетнемерзлые грунты) занимают во всем мире порядка 24 % территории планеты [1; 2]. В России вечная мерзлота распространена на 11 млн км² (примерно от 60 до 65 % от площади страны), наиболее широко распространена в Западной, Восточной Сибири и в Забайкалье. Согласно литературных источников, к вечномерзлым грунтам относятся грунты, находящиеся в мерзлом состоянии от трех и более лет.

Распределение многолетней мерзлоты зависит от климатических факторов и может быть прерывистым и сплошным. В России прерывистое распределение многолетней мерзлоты характерно для южных районов, например, для Забайкалья, сплошное распределение — характерно для северных районов, например, для тундры Западной Сибири. В прерывистой зоне многолетняя мерзлота существует в сочетании с некоторыми участками и слоями незамерзших грунтов. Толщина многолетней мерзлоты колеблется от нескольких сантиметров на южной границе до нескольких сотен метров на границе сплошной зоны — от 60 до 100 м в Канаде и от 250 до 300 м в Сибири, на Таймыре — более 600 м. Между слоями многолетней мерзлоты могут встречаться незамерзшие слои или талики. Глубина залегания кровли многолетней мерзлоты находится в пределах от 0,5 до 20 м. Активный (сезонно-деятельный) слой, который замерзает зимой и оттаивает летом, изменяется по толщине примерно от 0,5 до 4,5 м в зависимости от гидрологических, природно-климатических, геологических факторов.¹

Интенсивное освоение территорий с многолетнемерзлыми грунтами требует от проектировщиков автомобильных дорог особого подхода. Важно учитывать специфику таких грунтов, чтобы обеспечить сохранение эксплуатационных характеристик линейных сооружений на протяжении всего срока их службы.

При выборе проектных решений, необходимо оценивать стабилизацию температурно-влажностного режима геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание». Изменение температурно-влажностного режима, влияет на изменение напряженно-деформированного состояния и устойчивость геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание». Под стабилизацией температурно-влажностного режима геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание» подразумевается процесс

¹ <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-poverkhnostnykh-dlitelno-stoyashchikh-vod-na-temperaturnyi-rezhim-gruntov-zemlyanog>.

циклического изменения температурных показателей в грунтовом массиве геотехнической системы «земляное полотно — вечномёрзлое основание» в период промерзания и оттаивания. Это означает, что геотехническая система «земляное полотно — вечномёрзлое основание» достигает термодинамического равновесия.

Неблагоприятные факторы, обуславливающие проблемы строительства автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты: продолжительным зимним периодом (более 300 дней); скопление водоема вдоль откосных частей земляного полотна; экзогенные процессы; заболоченность территории; значительный снегоперенос и так далее.

Согласно нормативной-технической документации действующей на территории РФ (ВСН 84-89, СП 313.1325800.2017, СП 78.13330.2012, ГОСТ 33149-2014) по проектированию автомобильных дорог на вечномёрзлых грунтах, до начала проектирования линейного сооружения необходимо выполнить инженерно-геокриологический прогноз. Согласно представленного прогноза, выявляют возможные криогенные процессы, которые могут повлиять на эксплуатационные характеристики автомобильной дороги в условиях вечной мерзлоты.

Согласно исследованиям [3–6], основным фактором, оказывающим влияние на изменение температурного режима геотехнической системы «земляное полотно — вечномёрзлое основание», являются водоёмы, расположенные вдоль откосных частей земляного полотна.



Рисунок 1. Водоем вдоль откосных частей земляного полотна (источник: <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-obvodneniya-na-temperaturnyi-rezhim-merzlogo-osnovaniya-nasypnykh-sooruzhenii>. Авторы: Сыромятников И.И., Литовко А.В., Жирков А.Ф., Кириллин А.Р.)

Figure 1. Water reservoir along the embankment slopes of the roadbed (source: <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-obvodneniya-na-temperaturnyi-rezhim-merzlogo-osnovaniya-nasypnykh-sooruzhenii>. Authors: Syromyatnikov I.I., Litovko A.V., Zhirkov A.F., Kirillin A.R.)

Водоемы вдоль откосных частей земляного полотна возникают как на пересеченной местности, так и на равнинных участках (рис. 1). Формирование водоёмов может быть обусловлено различными изменениями природно-климатических условий. На стадии проектирования спрогнозировать данный процесс практически невозможно.

Подтопление откосных частей земляного полотна влияет на изменение температурного режима геотехнической системы «земляное полотно — вечномёрзлое основание», что напрямую отражается на устойчивости грунтов основания и, как следствие, на устойчивость конструкции земляного полотна (рис. 2).



Рисунок 2. Деформированный участок автомобильной дороги
(автор: Синицкий А.И. Из архива «Государственное автономное учреждение
Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики»)

Figure 2. Deformed section of a highway (author: Sinitsky A.I. From the archive of the
«State Autonomous Institution of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug «Scientific Center
for Arctic Research»)

Потепление климата на территории России заметно сказывается на состоянии многолетнемерзлых грунтов. С повышением среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов и увеличением глубины сезонного оттаивания уменьшается устойчивость грунтов основания, что влияет на снижение транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильных дорог.

По данным Росгидромета, за последнее столетие потепление для территории России в целом составило ок. 1°C; после 1970 г. тренд потепления составил ~0,4°C за десятилетие (рис. 3) [7].

Сохранение устойчивости многолетнемерзлых грунтов основания в условиях потепления климата выполняется за счет конструктивных технологических мероприятий. Выбор принципа проектирования зависит

от климатических и мерзлотно-грунтовых условий участка автомобильной дороги. Разрабатываемые мероприятия для первого принципа проектирования направлены на сохранение верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания не ниже подошвы земляного полотна в течение всего периода эксплуатации земляного полотна. Однако повсеместное применение первого принципа имеет свои недостатки [8], в связи с чем все чаще встречаются конструктивные мероприятия, направленные на сохранение верхней границы многолетнемерзлых грунтов на требуемой глубине.

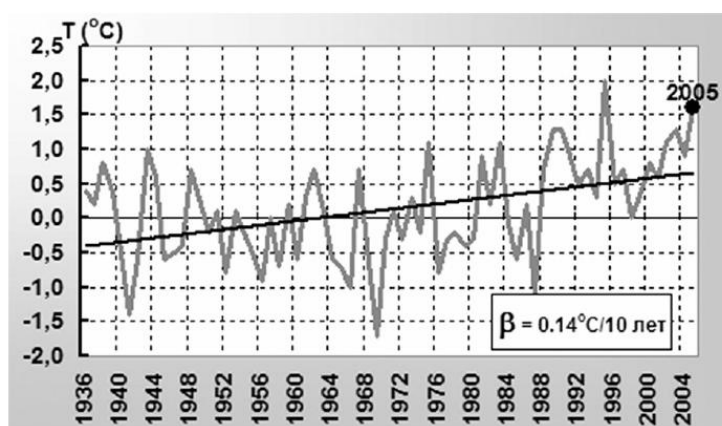


Рисунок 3. Осреднённая среднегодовая температуры воздуха по территории России за период 1936–2005 гг., по данным ИГКЭ РАН и Росгидромета [7]

Figure 3. Averaged mean annual air temperature across the territory of Russia for the period 1936–2005, according to data from the Institute of Global Climate and Ecology of the Russian Academy of Sciences (IGKE RAS) and Roshydromet [7]

В настоящее время существуют различные конструктивно — технологические мероприятия, направленные на изменение температурно-влажностного режима и напряженно-деформированного состояния. В основном для сохранения верхней границы многолетнемерзлых грунтов на требуемой глубине применяют теплоизоляционные, геосинтетические инертные материалы и так далее. Применение современных конструктивно-технологических мероприятий при строительстве линейных сооружений в условиях вечной мерзлоты, позволяют значительно ускорить темпы строительства работ и снизить трудозатраты, что значительно сказывается на стоимости объекта и крайне важно при возведении геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание» в сложных климатических и инженерно-геологических условиях. Однако, технический эффект от конструктивно-технологических мероприятий не всегда достигает положительного результата при эксплуатации геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание». В связи с чем разработка новых решений, и усовершенствование существующих конструктивно-технологических мероприятий является актуальной задачей.

Основная часть

Main part

В качестве повышения устойчивости геотехнической системы «земляное полотно — вечномёрзлое основание» разработано конструктивно-технологическое мероприятие для второго принципа проектирования земляного полотна, способствующее сохранению верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания под земляным полотном на требуемой глубине с учетом действия теплового потока от водоёма, расположенного вдоль откосных частей земляного полотна (рис. 4).

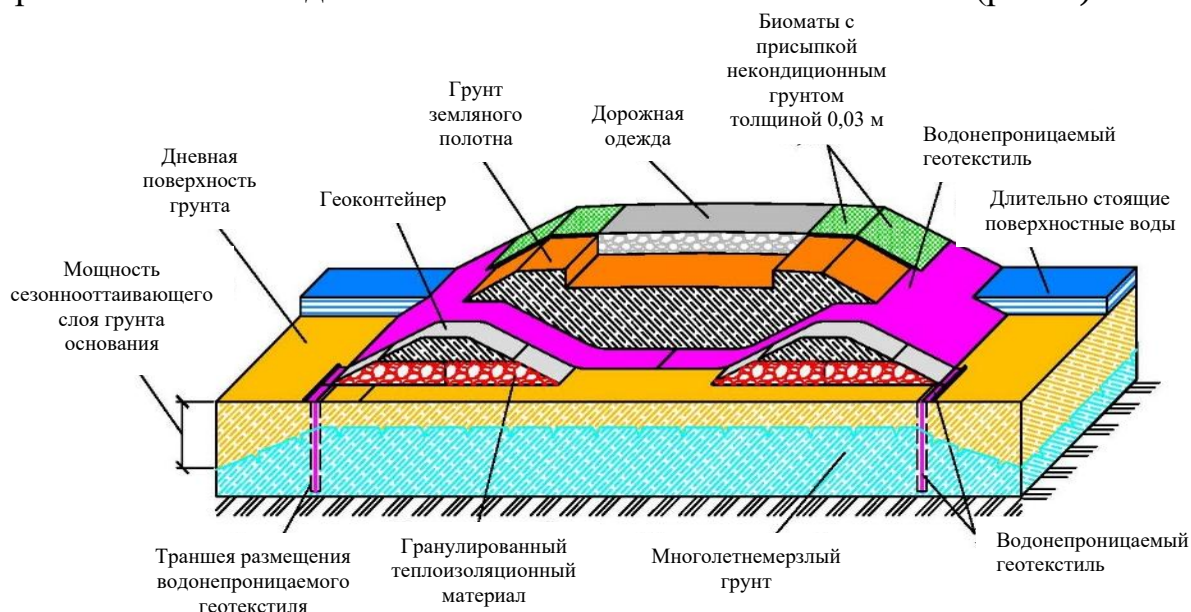


Рисунок 4. Схема

конструктивно-технологического мероприятия (рисунок выполнен автором)

Figure 4. Diagram of the constructional-technological measure (figure created by the author)

С целью исключения попадания влаги в геотехническую систему «земляное полотно — вечномёрзлое основание» разрабатывают продольную траншею шириной не менее 0,5 м, глубиной ниже деятельного слоя — слоя сезонного промерзания и оттаивания. Следующим шагом является (ручное) раскатывание рулона из водонепроницаемого геотекстиля с максимальным натяжением материала для устранения перекосов. Рулон из геотекстиля раскатывают в поперечном направлении автомобильной дороги с запасом по обеим сторонам земляного полотна, достаточным для смыкания верхних ветвей полуобоймы. Далее в траншею вертикально размещают водонепроницаемый геотекстиль. После размещения водонепроницаемого элемента производят обратную засыпку траншеи тем же выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. В откосной части земляного полотна располагают водонепроницаемые трапецеидальные призмы. Нижняя часть призмы заполняется гранулированным теплоизоляционным материалом, а верхняя часть —

местным грунтом. Высота призмы назначается выше прогнозируемого уровня глубины водоема. Гранулированный теплоизоляционный материал применяют для поднятия границы многолетнемерзлых грунтов, а водонепроницаемые трапецеидальные призмы — для защиты теплоизоляционного материала от попадания в него влаги. После устройства призмы с гранулированным теплоизоляционным материалом свободные края водонепроницаемого геотекстиля заводят на поверхность с максимальным натяжением и минимальной шириной нахлеста 0,3 м. Далее выполняют послойную отсыпку и уплотнение земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах [9].

Основная цель конструктивно-технологического мероприятия, создание инженерной защиты геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание» с учетом формирования водоема вдоль откосных частей земляного полотна в условиях распространения вечной мерзлоты с увеличением межремонтных сроков при эксплуатации автомобильной дороги.

Конструктивно-технологического мероприятия позволяет достичь технико-экономические результаты за счет:

- повышение устойчивости геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание»;
- уменьшение вертикальных и горизонтальных деформаций покрытия автомобильной дороги;
- увеличение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги, например интенсивность, состав движения, ровность покрытия, скорость движения, безопасность движения автомобильной дороги;
- стабилизация температурного режима геотехнической системы «земляное полотно — вечномерзлое основание»;
- ограничение теплового влияния от водоема;
- сохранение грунтового основания в мерзлом состоянии на требуемой глубине;
- сокращение объемов земляных работ;
- ускоренные темпы строительства;
- ограничение массового проникновения влаги в геотехническую систему «земляное полотно — вечномерзлое основание».

Технический результат предлагаемого конструктивно-технологического мероприятия заключается в увеличении степени устойчивости грунтов основания за счет стабилизации температурного режима.

Наиболее оптимальные геометрические параметры конструктивно-технологического мероприятия, влияющие на изменение температурного режима в период максимального оттаивания на первый год эксплуатации с учетом теплового влияния от воздействия водоема, расположенного вдоль откосных частей земляного полотна, предложено оценить численным моделированием в программном комплексе QFrost.

Программный комплекс QFrost позволяет решить теплофизическую задачу изменения границы многолетнемерзлых грунтов во времени [10; 11].

В работе [12] представлен анализ влияния водоема на температурный режим подстилающей мерзлой толщи и установлено, что скопившийся водоём вдоль откосных частей земляного полотна носит обогревающий эффект, зависящий от глубины водоема и конвективного перемешивания в нём.

На основании численного моделирования в программном комплексе QFrost установлено, что заложение внешнего откоса призмы соответствует заложению откоса земляного полотна.

Высота призмы должна быть выше расчетного уровня воды в водоеме более чем на 0,1 м. Заложение внутреннего откоса принимается 1:2. Высота теплоизолятора в призме составляет 0,5 м. Вертикальная траншея назначается ниже глубины промерзания шириной равной 0,5 м.

Для обоснования эффекта от конструктивно-технологического мероприятия, влияющего на изменение температурного режима, было предложено рассмотреть земляное полотно из незасоленного песка и однородное основание из незасоленного суглинка с учетом конвективного перемешивания в водоеме.

Эффективность конструктивно-технологического мероприятия оценивается поднятием кровли многолетнемерзлого грунта под земляным полотном в характерных сечениях (бровка — точка № 1, середина откоса — точка № 2).

Высота земляного полотна принималась с учетом требований СП 313.1325800.2017. В качестве теплоизолятора рассматривали ДиатомИК с теплофизическими характеристиками $\lambda = 0,1$ Вт/(м°C), $C = 576$ Дж/(м³°C). Климатические условия при численном моделировании назначались по метеостанции г. Надым.

Теплофизическими и физическими характеристиками грунтов назначались согласно СП 25.13330.2020. Численный расчет выполнялся на двенадцать лет эксплуатации земляного полотна. Теплофизическими и физическими характеристиками грунтов представлены в таблице 1.

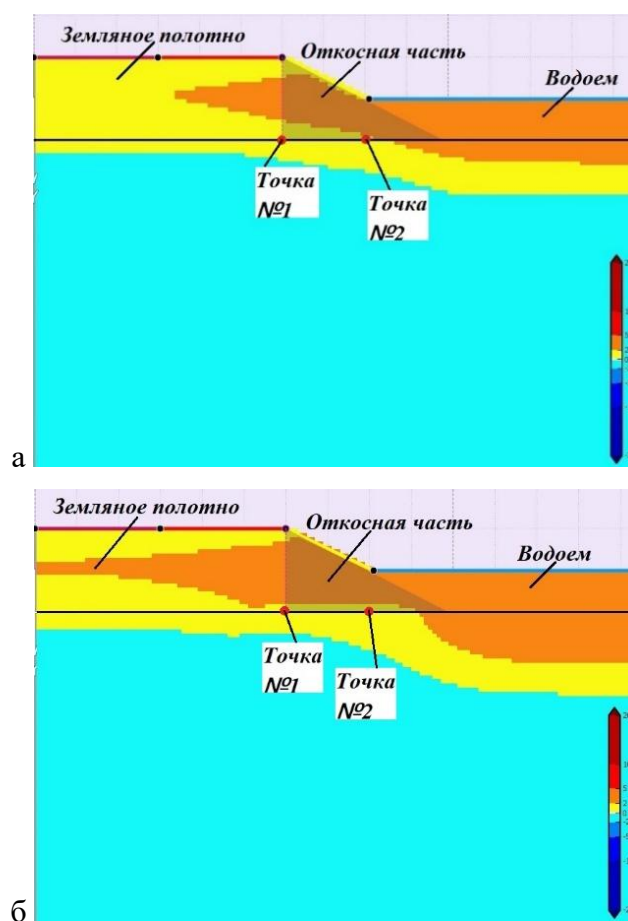
Таблица 1 / Table 1

Теплофизические и физические характеристики грунтов

Thermophysical and physical characteristics of soils

Характеристика грунта <i>Characteristic of soil</i>	Земляное полотно <i>Roadbed</i>	Основание <i>Subgrade</i>
λ_f , Вт/(м·°C)	1,35	1,76
λ_{th} , Вт/(м·°C)	1,19	1,57
C_f , кДж/(м ³ ·°C)	1 428,50	2 368,04
C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	1 660,00	3 388,00
L_v , МДж/м ³	37,29	121,52
ρ_d , кг/м ³	1 590,00	1 400,00
W_{tot} , д.ед.	0,07	0,35
T_{bf} , °C	-0,10	-0,20

Составлена автором / Compiled by the author



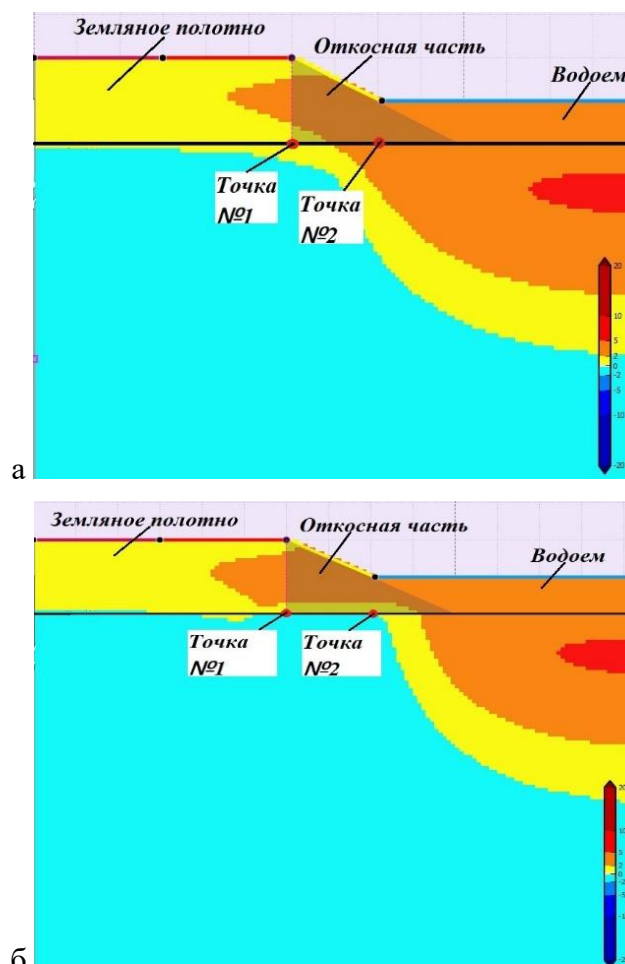
Красным, оранжевым, желтым цветом обозначена положительная температура; голубым, синим — отрицательная

Red, orange, and yellow indicate positive temperatures; light blue and blue indicate negative temperatures

Рисунок 5. Изменение верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания без конструктивно-технологического мероприятия в период эксплуатации земляного полотна: а — на первый год; б — на двенадцатый год (рисунок выполнен автором)

Figure 5. Change in the upper boundary of permafrost subgrade without the constructional-technological measure during the roadbed's operational period: а — in the first year; б — in the twelfth year (figure created by the author)

Результаты сопоставления температурного режима без конструктивно-технологического мероприятия (рис. 5) и с предлагаемым конструктивно-технологическим мероприятием (рис. 6) представлены на первую декаду октября, что обусловлено периодом максимального оттаивания деятельного слоя грунта основания.



Красным, оранжевым, желтым цветом обозначена положительная температура; голубым, синим — отрицательная

Red, orange, and yellow indicate positive temperatures; light blue and blue indicate negative temperatures

Рисунок 6. Изменение верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания с конструктивно-технологического мероприятия в период эксплуатации земляного полотна: а — на первый год; б — на двенадцатый год (рисунок выполнен автором)

Figure 6. Change in the upper boundary of permafrost subgrade with the constructional-technological measure during the roadbed's operational period: а — in the first year; б — in the twelfth year (figure created by the author)

Заключение

Conclusion

В статье представлено конструктивно-технологическое мероприятие, направленное на сохранение верхней границы многолетнемерзлых

грунтов основания на требуемой глубине за счет исключения фильтрации воды на границе геотехнической системы «земляное полотно — вечномёрзлое основание» и ограничению воздействия теплового потока от скопившейся воды вдоль откосных частей земляного полотна.

Численным моделированием определены наиболее значимые геометрические параметры конструктивно-технологического мероприятия, влияющие на изменение температурного режима грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна: высота трапецеидальной призмы принимается на 0,1 м выше прогнозируемого уровня воды в водоеме; заложение внешнего откоса призмы соответствует заложению откоса земляного полотна; заложение внутреннего откоса принимается равным 1:2; высота гранулированного теплоизолятора в призме составляет 0,5 м; вертикальная траншея назначается ниже глубины промерзания шириной равной 0,5 м.

Внедренное конструктивно-технологическое мероприятие способствует поднятию (изменению верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания) кровли многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна на двенадцатый год эксплуатации:

- под бровкой на 0,4 м;
- под серединой откоса на 2,5 м.

Конструктивно-технологическое мероприятие позволяет сместить границу многолетнемерзлого грунта из-под верхней бровки к подошве земляного полотна. В результате под основной и откосной частью земляного полотна формируется горизонтальная площадка из многолетнемерзлых грунтов, что способствует увеличению устойчивости грунтов многолетнемерзлого основания и повышению транспортно-эксплуатационных показателей за счет увеличения прочностных и деформационных характеристик грунтов основания.

В перспективе дальнейших исследований предлагается:

- численным моделированием оценить влияние глубины водоёма, расположенного вдоль откосных частей сооружения, на изменение температурно-влажностного режима и ореола оттаивания грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна в характерных сечениях (бровка — точка № 1, середина откоса — точка № 2) без конструктивно-технологического и с ним;
- разработать методику расчета устойчивости грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна без конструктивно-технологического и с ним во времени;
- произвести расчет изменения устойчивости грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна во времени с учетом изменения температурно-влажностного режима и напряженно-деформированного состояния без конструктивно-технологического и с ним.

Для подтверждения полученных результатов численного моделирования с предложенным конструктивно-технологическим мероприятием необходимо провести серию экспериментальных исследований в лабораторных условиях [13–17]. Верификация результатов будет выполняться путем сопоставления экспериментальных данных, аналитических расчетов и численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Black, R.F.** Permafrost: a review / R.F. Black. — DOI [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65\[839:PR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[839:PR]2.0.CO;2) // GSA Bulletin. — 1954. — Т 65. — № 9. — С. 839–856. — URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/65/9/839/4657/PERMAFROST-A-REVIEW?redirectedFrom=fulltext>. (дата обращения: 07.09.2024).
2. **Котов, П.** Исследования вечной мерзлоты на современном этапе / П. Котов // Вестник инженерных изысканий. — 2020. — № 8. — С. 10–14. — URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/441591248/>. (дата обращения: 07.09.2024).
3. **Минайлов, Г.П.** Основные способы стабилизации многолетних осадков насыпей, возведенных на просадочных при оттаивании вечномерзлых грунтах, в юго-восточной части криолитозоны России / Г.П. Минайлов, С.Н. Юсупов // Путь и путевое хозяйство. — 2001. — № 5. — С. 42–49.
4. **Минайлов, Г.П.** К вопросу о рациональных способах перехвата и отвода поверхностной воды от земляного полотна автомобильных и железных дорог в районах распространения вечной мерзлоты / Г.П. Минайлов, С.Н. Юсупов // Проблемы криологии Земли. — 1998. — № 4. — С. 91–96.
5. **Жданова, С.М.** Актуальные проблемы содержания земляного полотна линейных сооружений в сложных условиях (результаты экспериментального внедрения новых разработок ДВГУПС) / С.М. Жданова, О.В. Тукмакова // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: В 3 томах, Хабаровск, 21–22 октября 2015 года / Под редакцией С.М. Гончарука. Том 3 Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2015. — С. 47–53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24995610>. — EDN VAZLOD. (дата обращения: 07.09.2024).
6. **Непомнящих, Е.В.** Мероприятия по улучшению водно-теплого режима водоотводных сооружений / Е.В. Непомнящих, Я.В. Ключков // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2014. — № 12. — С. 12–21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24504173>. — EDN UQFVTX. (дата обращения: 07.09.2024).
7. **Снакин, В.В.** Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность / В.В. Снакин // Жизнь Земли. — 2019. — Т 41. — № 2. — С. 148–164. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39143213>. — EDN VQPBAR. (дата обращения: 07.09.2024).
8. **Шуваев, А.Н.** Анализ принципов проектирования земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения вечномерзлых грунтов в Западной Сибири / А.Н. Шуваев, М.В. Панова, С.В. Картавый. — DOI <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2020-1-114-121> // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2020. — № 1. — С. 114–121. — URL: <https://umnig.tyuiu.ru/jour/article/view/823>. — EDN BLKLJN. (дата обращения: 07.09.2024).
9. Патент № 2732774 С1 Российская Федерация, МПК E01C 3/06. Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах: № 2019135385; заявл. 05.11.2019; опубл. 22.09.2020 / А.Н. Краев, А.Н. Краев, З.Ш. Шанхоев, А.С. Макаров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет" (ТИУ). — EDN TCJINW.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614404 Российская Федерация. QFrost: № 2016611710; заявл. 02.03.2016; опубл. 22.04.2016 / Д.Г. Песоцкий. — EDN RBNSST.

11. Хрусталеv, Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания-оттаивания грунта / Л.Н. Хрусталеv, Л.Н. Черкасова // Изв. Сибирского отд. А.Н. СССР, серия техн. наук. — 1966. — Т. 6, № 2. — С. 12–24.
12. Горелик, Я.Б. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов / Я.Б. Горелик, И.В. Земеров. — DOI <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40> // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2020. — Т 6. — № 1. — С. 10–40. — URL: https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski/2020-tom-6/1_21/892870/. — EDN GHKBVL. (дата обращения: 21.09.2024).
13. Макаров, А.С. Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах / А.С. Макаров, А.Н. Краев, З.Ш. Шанхоев. — DOI <https://doi.org/10.15862/17SATS418> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 4. — С. 17SATS418. — URL: <https://t-s.today/17SATS418.html>. — EDN YURQZN. (дата обращения: 21.09.2024).
14. Моделирование термомеханического взаимодействия элементов конструкции автомобильной дороги из мерзлых грунтов / А.Н. Краев, А.С. Макаров, Т.В. Мальцева, З.Ш. Шанхоев. — DOI <https://doi.org/10.15372/KZ20240305> // Криосфера Земли. — 2024. — Т 28. — № 3. — С. 52–62. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68500341>. — EDN GXWWUF. (дата обращения: 21.09.2024).
15. Краев, А.Н. Моделирование деформированного состояния земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах / А.Н. Краев, З.Ш. Шанхоев. — DOI <https://doi.org/10.15862/05SATS119> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 1. — С. 05SATS119. — URL: <https://t-s.today/05SATS119.html>. — EDN OJSDJZ. (дата обращения: 21.09.2024).
16. Диатомиты Ямала в технологии строительных материалов для арктических условий / К.С. Иванов, А.А. Мельникова, Е.А. Коротков, П.В. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 1. — С. 18–23. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25280646>. — EDN VHFQBJ. (дата обращения: 21.09.2024).
17. "Диатомик" — новый теплоизоляционный материал для дорожного строительства в условиях криолитозоны / Е.А. Коротков, А.О. Константинов, А.А. Мельникова, К.С. Иванов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2015. — № 1. — С. 55–61. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23057939>. — EDN TKOZUB. (дата обращения: 21.09.2024).

Сведения об авторах:

Шанхоев Зураб Шабазгиреевич — старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=906486

Статья получена: 20.11.2024. Принята к публикации: 06.03.2025. Опубликовано онлайн: 20.03.2025.

Выполнено при поддержке гранта РФФ № 23-29-00118

REFERENCES

1. Black R.F. Permafrost: a review. *GSA Bulletin*. 1954;65(9): 839–856. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65\[839:PR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[839:PR]2.0.CO;2).
2. Kotov P. [Permafrost research at the present stage]. *Bulletin of Engineering Research*. 2020;(8): 10–14. Available at: <https://istina.msu.ru/publications/article/441591248/> (accessed 07th September 2024). (In Russ.).
3. Minaylov G.P., Yusupov S.N. Osnovnyye sposoby stabilizatsii mnogoletnikh osadok nasypey, vozvedennykh na prosadochnykh pri ottaivanii vechnomerzlykh gruntakh, v yugo-vostochnoy chasti kriolitozony Rossii [The main methods of stabilizing long-term settlements of embankments erected on subsidence during thawing of permafrost soils in the south-eastern part of the cryolithozone of Russia]. *Railway Track and Facilities*. 2001;(5): 42–49. (In Russ.).
4. Minaylov G.P., Yusupov S.N. K voprosu o ratsional'nykh sposobakh perekhvata i otvoda poverkhnostnoy vody ot zemlyanogo polotna avtomobil'nykh i zheleznnykh dorog v rayonakh rasprostraneniya vechnoy merzloty [On the issue of rational methods of intercepting and diverting surface water from the roadbed of highways and railways in areas of permafrost]. *Problemy kriologii Zemli = [Problems of Earth cryology]*. 1998;(4): 91–96. (In Russ.).

5. Zhdanova S.M., Tukmakova O.V. The Actual Problems of Maintenance A Road Bed in Line Building in Difficult Conditions (Results of Experimental Implementation the New Developments FESTU). In: [Improving the efficiency of the regional transport system: problems and prospects: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation: In 3 volumes, Khabarovsk, October 21–22, 2015]. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2015. p. 47–53. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24995610> (accessed 07th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Nepomnyaschikh E., Klochkov Ya. Improvement of Water and Thermal Regime Drainage Structures. *Transbaikal State University Journal*. 2014;(12): 12–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24504173> (accessed 07th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Snakin V.V. Global Climate Change: Forecasts and Reality. *Life Of the Earth*. 2019;41(2): 148–164. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39143213> (accessed 07th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Shuvaev A.N., Panova M.V., Kartavy S.V. Analysis of the subgrade design concept in areas of permafrost soil distribution in Western Siberia. *Oil and Gas Studies*. 2020;(1): 114–121. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2020-1-114-121>.
9. Kraev A.N., Kraev A.N., Shankhovev Z.Sh., Makarov A.S. *Motor Road at Permafrost Grounds*. RU 2732774 C1 (Patent) 2020. (accessed 21st September 2024).
10. Pesotskiy D.G. *QFrost*. RU 2016614404 (Patent) 2016. (accessed 21st September 2024).
11. Khrustalev L.N., Cherkasova L.N. Chislenny metod resheniya zadachi promerzaniya-ottauvaniya grunta [Numerical method for solving the problem of soil freezing and thawing]. *Izvestiya Sibirskogo otd. A.N. SSSR, seriya tekhnicheskije nauki = [News of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, technical sciences series]*. 1966;6(2): 12–24. (In Russ.).
12. Gorelik J.B., Zemerov I.V. Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2020;6(1): 10–40. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40>.
13. Makarov A.S., Kraev A.N., Shankhovev Z.Sh. Structural-technological solutions for the construction of roads on permafrost soils. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018;5(4): 17SATS418. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/17SATS418>.
14. Kraev A.N., Makarov A.S., Maltseva T.V., Shankhovev Z.Sh. Modeling Thermomechanical Interaction of The Elements of a Highway Constructed on Frozen Soils. *Kriosfera Zemli*. 2024;28(3): 52–62. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15372/KZ20240305>.
15. Kraev A.N., Shankhovev Z.Sh. Modeling the deformed state of the roadway on permafrost. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019;6(1): 05SATS119. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS119>.
16. Ivanov K.S., Melnikova A.A., Korotkov E.A., Smirnov P.V. Diatomite Rocks of Yamal Region in Technology of Building Materials for Arctic Conditions. *Industrial And Civil Engineering*. 2016;(1): 18–23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25280646> (accessed 21st September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Korotkov E.A., Konstantinov A.O., Melnikova A.A., Ivanov K.S. "Diatomik" — New Thermal Insulating Material for Road Construction in The Conditions of Cryolithic Zone. *The Siberian State Automobile and Highway University (SIBADI)*. 2015;(1): 55–61. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23057939> (accessed 21st September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Zurab Sh. Shankhovev — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: shanhovevs@tyuiu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=906486

Submitted: 20th November 2024. Revised: 6th March 2025. Published online: 20th March 2025.

Supported by RSF grant No. 23-29-00118