

# КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 3, с. 52–62

<https://www.sibran.ru>

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК: 624.139.6  
DOI: 10.15372/KZ20240305  
EDN: GXWWUF

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ИЗ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А.Н. Краев, А.С. Макаров, Т.В. Мальцева\*, З.Ш. Шанхоев

Тюменский индустриальный университет,  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

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

Проведено экспериментальное и численное моделирование температурного режима и деформированного состояния геотехнической системы “земляное полотно и основание автомобильной дороги из мерзлого грунта”. Рассмотрены варианты нарушения температурного режима и предложено конструктивно-технологическое решение, способствующее термостабилизации грунтового основания под земляным полотном на подтопляемых участках. Решение заключается в использовании геоконтейнеров. Для изучения и оценки температурного режима конструкции автодороги проведена серия лабораторных экспериментов. Для учета в математической модели грунтового основания вязкоупругих свойств грунта получены временные функции деформаций грунтового основания с геоконтейнерами в выбранном температурном режиме.

**Ключевые слова:** температурный режим, автомобильная дорога, осадка грунта, лабораторные исследования, мерзлые вязкоупругие грунты.

**Ссылка для цитирования:** Краев А.Н., Макаров А.С., Мальцева Т.В., Шанхоев З.Ш. Моделирование термомеханического взаимодействия элементов конструкции автомобильной дороги из мерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 3, с. 52–62. DOI: 10.15372/KZ20240305. EDN: GXWWUF.

### MODELING THERMOMECHANICAL INTERACTION OF THE ELEMENTS OF A HIGHWAY CONSTRUCTED ON FROZEN SOILS

A.N. Kraev, A.S. Makarov, T.V. Maltseva\*, Z.Sh. Shankhoev

Tyumen Industrial University,  
Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia

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

Experimental and numerical modeling of the temperature regime and the deformed state of the highway structure, which is a geotechnical system of “subgrade and the foundation of the highway made of frozen soil”, was carried out. Potential disturbances of the temperature regime are considered, and a design and technological solution for thermal stabilization of the soil foundation under the subgrade in flooded areas is proposed. It implies the use of geocontainers. To study and evaluate the temperature regime of the highway structure, a series of laboratory experiments were carried out. To take into account the viscoelastic properties of the soil in the mathematical model of the soil foundation, time functions of the relative settling of the soil foundation with geocontainers in the chosen temperature regime were obtained.

**Keywords:** temperature regime, highway, soil settlement, laboratory research, frozen viscoelastic soils.

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем развития транспортной сети Арктики – это наличие значительной территории, не имеющей надежной круглогодичной транспортной доступности. Поэтому в сложных инженерно-геологических условиях актуальным является строительство всесезонных автомобильных дорог с твердым покрытием.

Трудность развития дорожной сети, особенно в пониженных местах застраиваемой территории, определяется сложными климатическими условиями [Анисимов и др., 2007; Кононович, 2008], накоплением воды в пониженных местах рельефа [Фага и др., 2015], формированием и распространением термокарстовых озер в Арктике [Кравцова и др., 2009].

В работах [Исаков и др., 2011; Губарыков и др., 2015; Фага и др., 2015] отмечено нарушение безопасной эксплуатации участков дорог на территории Арктики, расположенных в пониженных местах рельефа местности, вблизи водоемов. Наружение эксплуатации объясняется осадкой грунтов основания и земляного полотна дороги под отепляющим воздействием водоемов вдоль откосной части дорог и придорожных полос. Застой воды вызывает в дальнейшем ее фильтрацию через грунты основания и земляного полотна, оказывая отепляющий эффект на многолетнемерзлое грунтовое основание дороги. Фильтрация воды может иметь круглогодичный характер. Перечисленные факторы оказывают негативное влияние на температурный режим земляного полотна и многолетнемерзлых грунтов основания автомобильной дороги.

Дестабилизация температурного режима ухудшает со временем механические характеристики мерзлых грунтов. Для твердомерзлых и пластичномерзлых грунтов при деформировании характерно проявление ползучести: под действием постоянной нагрузки развитие деформаций со временем [Цытович, 1973; Вялов, 2000; Ланько, Куликова, 2023].

Известны исследования реологических, в частности вязкоупругих, свойств мерзлых грунтов, зависящих от типа грунтов, условий их работы как основания сооружения в различных приборах одноосного, трехосного сжатия, на сдвиг [Грешищев, 1963; Вялов, 2000]. Авторами работ [Minghao et al., 2021; Hongmiao, Lei, 2023] был проведен ряд экспериментов по изучению механических свойств мерзлых грунтов, таких как трехосные испытания на ползучесть искусственно мерзлого грунта при различных напряжениях и температурах, и предложена конститутивная модель дробного порядка мерзлого ила с песком. Экспериментального исследования в лабораторных условиях термомеханического взаимодействия элементов конструкции автомобильной дороги с грунтовым основанием и с конструктивным решением в литературных источниках не найдено.

В статье [Лопашук, 2021] приведены результаты измерения температуры грунтов земляного полотна и основания участков автомобильной дороги Петропавловск-Камчатский – Мильково. Оценена скорость промерзания грунтов в откосной части, под проезжей частью автомобильной дороги и в кюветах с учетом влияния обводнения. Отмечено температурное влияние снежного покрова на грунты откосной части и пенополистирола на границе земляного полотна и дорожной одежды. Различные способы стабилизации температурного режима кровли многолетнемерзлых грунтов рассматривались во многих работах [Исаков, 2014; Игошин и др., 2016; Макаров и др., 2017, 2018], в том числе и с помощью численного моде-

лирования в программах WARM, Termoground. В статье [Валиев, 2019] приведены результаты эксперимента на опытном участке Новочарской дистанции пути Восточно-Сибирской железной дороги и обосновано применение нового материала “Термокомплекс”, который эффективнее в 1.5 раза в сравнении с солнцеосадкозащитными навесами, внедренными на этом же участке.

В работе [Lanouette et al., 2015] предложена конструкция земляного полотна на основании из песчаных многолетнемерзлых грунтов, повышающая эффективность каменной наброски на откосах насыпи для охлаждения грунтов конвекцией и поднятия кровли многолетнемерзлых грунтов. Однако в этих работах отсутствуют лабораторные эксперименты с маломасштабными конструкциями автомобильных дорог на подтопляемых участках в условиях мерзлоты и моделирование деформированного состояния мерзлых грунтов. Проведение таких экспериментов позволило бы акцентировать внимание на факторах влажности, плотности, температуры грунтов, геометрических размеров земляного полотна, глубины поверхностных длительно стоящих вод, мощности снежного покрова и оценить их влияние на температурный режим и деформации сооружения. Проведение исследований влияния температурного режима на деформированное состояние пластичномерзлых грунтов, на основании которых возможно совершенствование методик расчета с учетом вязкоупругих характеристик грунта как функций времени, с внесением изменений в нормативную базу, позволит повысить надежность конструкции автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах.

Целью исследования является оценка влияния подтопляемых участков на температурный режим и деформированное состояние во времени грунтов основания и земляного полотна конструкции автомобильной дороги, выработка технических мероприятий, улучшающих эксплуатационное состояние конструкции.

### Лабораторное моделирование термомеханического взаимодействия земляного полотна и основания автомобильной дороги

Для моделирования температурно-влажностных условий земляного полотна и основания автомобильной дороги было проведено три варианта лабораторных экспериментов.

1. В закрытой системе (без подтока воды).

2. В открытой системе с увлажнением верхней толщи грунтов основания и подошвы земляного полотна при следующих условиях: участки с постоянным избыточным увлажнением, имитацией снежных отложений на откосах и придорожных полосах, фильтрационной прослойкой под подошвой земляного полотна.

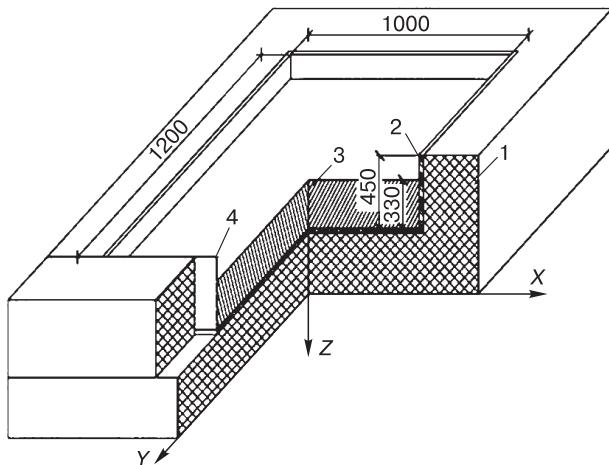


Рис. 1. Схема маломасштабного стенда.

1 – утеплитель ППС-10 толщиной 250 мм; 2 – деревянный каркас стена толщиной 25 мм; 3 – однородный грунт основания автомобильной дороги; 4 – органическое стекло толщиной 3 мм.

3. В открытой системе с увлажнением верхней толщи грунтов основания с имитацией снежных отложений на откосах и придорожных полосах, фильтрационной прослойкой под подошвой земляного полотна и внедрением предлагаемого конструктивно-технологического решения, которое направлено на сохранение грунтов основания в мерзлом виде и последующую стабилизацию температурного режима конструкции автомобильной дороги на участках с постоянным избыточным увлажнением, с применением геоконteinеров, заполненных гранулированным теплоизоляционным материалом [Макаров и др., 2018].

Внедрение предлагаемого конструктивно-технологического решения соответствует первому принципу проектирования земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах. Согласно [СП 313.1325800.2017], при проектировании земляного полотна по первому принципу должно быть обеспечено поднятие верхней границы многолетнемерзлых грунтов (ВГММГ) не ниже подошвы насыпи и сохранение положения этой границы в течение всего периода эксплуатации. Из-за неравномерного поднятия ВГММГ особое внимание следует уделять подоткосной части.

При проведении экспериментальных исследований на маломасштабном стенде учитывался геометрический и временной масштабный факторы. Геометрический масштаб стена был 1:30 к размерам моделируемого объекта [Карлов, 1998]. Масштаб времени принимался равным 1:900 согласно квадратичной зависимости в уравнении Йозефа Стефана при определении глубины промерзания и оттаивания грунтов.

Маломасштабный стенд выполнен в виде лотка с закрытой системой. Длина, ширина и высота

#### Усредненные физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого основания и земляного полотна

Наименование	Значение для основания	Значение для земляного полотна
$\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	1508	1508
$W_{tot}$ , %	30	14
$\lambda_f$ , Вт/(м·°C)	1.65	1.07
$\lambda_{th}$ , Вт/(м·°C)	1.45	0.95
$C_f$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·°C)	2805.6	1879.85
$C_{th}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·°C)	3332.7	2319.3
$L_v$ , МДж/м <sup>3</sup>	116.51	62.0

П р и м е ч а н и е.  $\rho_d$  – плотность сухого грунта;  $W_{tot}$  – суммарная влажность мерзлого грунта;  $\lambda_f$  – теплопроводность мерзлого грунта;  $\lambda_{th}$  – теплопроводность талого грунта;  $C_f$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта;  $C_{th}$  – объемная теплоемкость талого грунта;  $L_v$  – теплота замерзания грунта.

стенда составляли 1200, 1000, 450 мм соответственно. Каркас стена выполнен из древесины толщиной 25 мм. С фронтальной стороны стена было установлено органическое стекло толщиной 3 мм, через которое с помощью тепловизора измерялась температура грунтового массива. Для исключения теплопотерь через каркас стена под дно и с внешних сторон стенок был наклеен утеплитель – пенополистирол ППС-10 толщиной 250 мм и теплопроводностью  $\lambda = 0.037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ . С целью гидроизоляции во внутреннее пространство каркаса стена укладывалась полиэтиленовая пленка в два слоя. На рис. 1 представлена схема маломасштабного стена.

Для моделирования многолетнемерзлого грунтового основания в маломасштабный стенд был уложен и проморожен суглинок нарушенной структуры мощностью 330 мм. По отобранным пробам, согласно [ГОСТ 12248-2010], определялись физико-механические характеристики мерзлого суглинка: показатель текучести грунта  $I_L = -0.8\text{--}0.9$ ; коэффициент водонасыщения грунта  $S_r = 0.92\text{--}0.96$ ; естественная влажность грунта  $W = 25.8\text{--}29.5 \%$ ; удельный вес грунта  $\gamma = 18.2\text{--}18.6 \text{ кН}/\text{м}^3$ ; сцепление грунта  $c = 0.018\text{--}0.021 \text{ МПа}$ ; модуль деформации грунта  $E = 4.1\text{--}4.5 \text{ МПа}$ ; угол внутреннего трения  $\phi = 11\text{--}14^\circ$ .

Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого основания и земляного полотна дороги приведены в таблице.

Значения среднемесячной температуры воздуха ( $t_{cp}$ , °C) по метеостанции Надым (район моделируемых климатических условий) по месяцам:

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

При моделировании температурных условий в экспериментах по многолетним данным температуры воздуха г. Надым приняты средние температуры зимнего и летнего периодов:  $-14.8$  и  $+10^{\circ}\text{C}$  соответственно.

По предварительным расчетам и проведенным натурным испытаниям авторами было установлено, что для формирования циклического повторения величин мощности деятельного слоя грунта достаточно 10 периодов попеременного промерзания и оттаивания маломасштабной модели основания [Макаров и др., 2018]. Длительность периодов промерзания и оттаивания в цикле составила 5.59 и 4.14 ч в масштабе времени 1:900 при средней температуре летнего и зимнего периодов. Длительность периода промерзания и оттаивания в цикле равна 5032.80 и 3727.20 ч в масштабе времени 1:1. Мощность деятельного слоя моделируемого основания составляла 55–59 мм в геометрическом масштабе 1:30 и 1650–1770 мм в масштабе 1:1. Температура на дне лотка  $T_0 = -0.4\ldots-0.5^{\circ}\text{C}$  соответствовала температуре ММГ в естественных климатических условиях [Макаров и др., 2018].

При достижении циклической температурной стабилизации грунтового основания в маломасштабном стенде возводилось земляное полотно в период промерзания деятельного слоя основания. Длина, ширина и высота земляного полотна в масштабе 1:30 составили 1200, 400, 66 мм соответственно. Заложение откосов принималось 1:1.5.

Во втором варианте авторами моделировались поверхностные длительно стоящие воды (ПДСВ) за пределами земляного полотна; снежный покров на откосах и придорожных полосах путем укладки на поверхность грунта органического стекла; фильтрационная прослойка под подошвой земляного полотна путем укладки слоя торфа. Высота слоя ПДСВ от уровня дневной поверхности составила 3.3 см, что соответствовало 1.0 м в натурном размере. Моделирование ПДСВ осуществлялось без конвективного перемешивания. Согласно [Гречищев, 1963; Горелик, Земеров, 2020], при тепловом воздействии поверхностных вод (водоема) на нижележащие грунты авторами учтены следующие условия:

- с момента начала теплого периода необходимо рассчитать время для оттаивания водоема, затем глубину протаивания донных отложений;

- при отсутствии конвективного перемешивания водоема глубиной более 0.9 м образованный под водоемом талик не промерзает.

Время формирования ПДСВ заданной глубины (3.3 см) в теплый период составляло 3.1 ч. Подток воды осуществлялся спустя 1.04 ч с момента начала теплого периода. Температура воды при

подтоке варьировалась от  $+2$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ , что соответствовало натурным измерениям [Макаров и др., 2018].

При моделировании ПДСВ необходимо учесть мощность льда на водоеме ( $0.50\ldots0.65$  м) в конце холодного (зимнего) периода. Непромерзшая толща воды в этом случае будет служить теплоизолирующей прослойкой, препятствующей промерзанию нижележащего грунта. Мощность льда в конце холодного периода можно определить по теории Я.Б. Горелика [Горелик, Земеров, 2020]. Предварительными расчетами установлено, что моделируемые ПДСВ на конец холодного периода покроются льдом толщиной 2 см, что эквивалентно 0.6 м в масштабе 1:1. Было предложено на конец теплого (летнего) периода откачивать часть (2 см) воды и сразу же накладывать сверху органическое стекло, имитирующее снежный покров и лед. Толщина органического стекла, укладываемого на откосы земляного полотна (ЗП), составила 9 мм, что соответствовало 0.62 м снежного покрова в масштабе 1:1. Толщина оргстекла, располагаемого поверх водоема, составила 11 мм, что соответствовало 0.62 м снежного покрова и 0.6 м льда в водоеме.

Теплопроводность оргстекла принималась в расчетах равной  $0.20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , теплопроводность снежного покрова  $0.45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , теплопроводность льда  $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ . Расчет толщины оргстекла проводился из условия равенства термического сопротивления оргстекла и термических сопротивлений снежного покрова и льда соответственно.

Моделирование снежных отложений на откосах ЗП и поверх льда на ПДСВ началось при достижении температуры воздуха в холодильном оборудовании  $0^{\circ}\text{C}$  с дальнейшим понижением температуры воздуха в холодный период. Окончание моделирования снежных отложений на откосах ЗП и поверх ПДСВ происходило в момент достижения температуры воздуха в холодильном оборудовании  $0^{\circ}\text{C}$  с дальнейшим ее повышением в теплый период. Период моделирования льда на водоеме заканчивался перед подтоком воды. Лед полностью оттаивал через 1.04 ч с начала теплого периода, что соответствовало 39 сут в масштабе 1:1.

В феврале–марте 2013 г. при реализации конструктивно-технологического решения по ремонту и усилению земляного полотна на участке автомобильной дороги (пос. Пангоды (км 877+210) – пос. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90) и проведения последующего мониторинга этого участка (натурный эксперимент) было выявлено [Макаров и др., 2018], что под подошвой ЗП располагался уплотненный слой торфа, через который формировался круг-

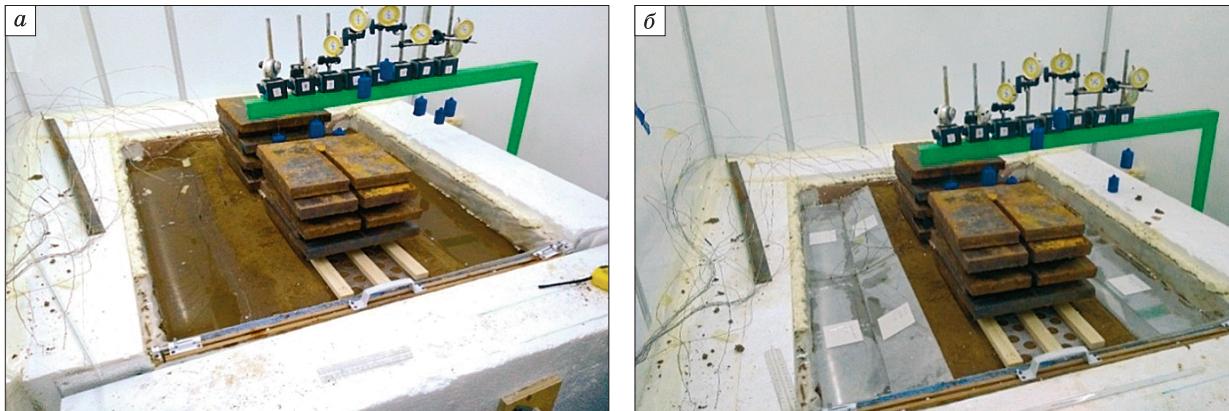


Рис. 2. Маломасштабный стенд конструкции дороги для 2-го варианта эксперимента в период оттаивания (а) и промерзания (б).

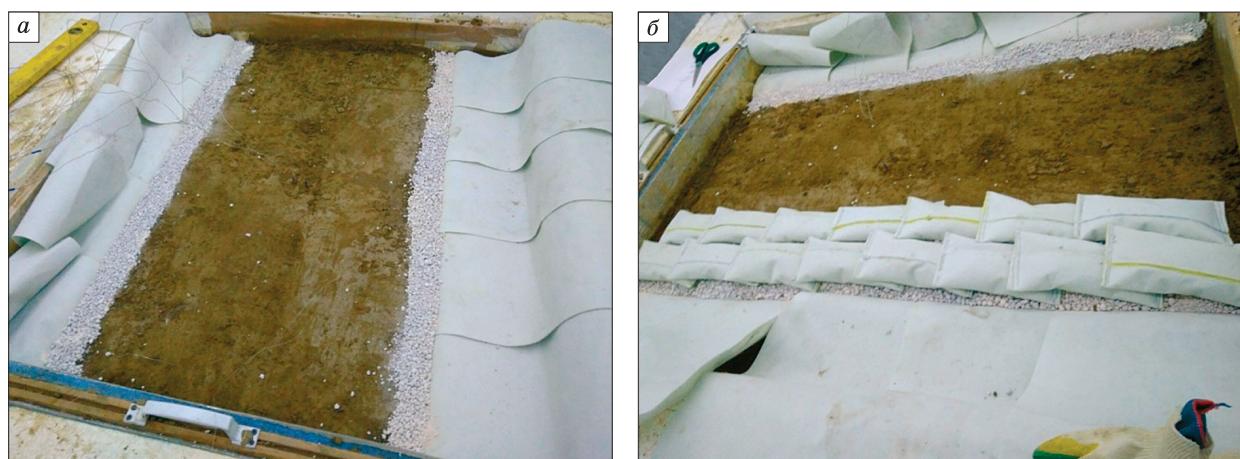


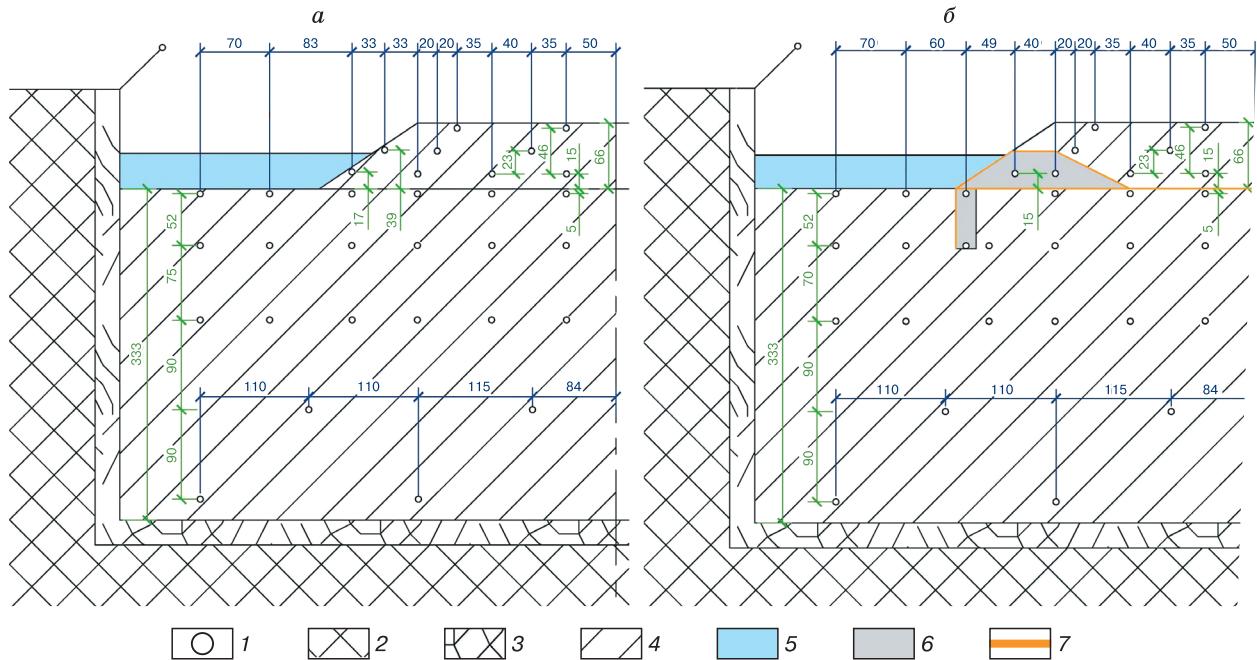
Рис. 3. Размещение гранулированного теплоизоляционного материала в продольных траншеях ширины 5 см (а) и под откосом насыпи земляного полотна в водонепроницаемых геоконтейнерах (б).

логодичный фильтрационный поток воды (коэффициент горизонтальной фильтрации  $k_{\phi} = 1.20 \text{ м}/\text{сут}$ ). В лабораторном эксперименте для моделирования теплового влияния фильтрации воды через слой торфа на границе “земляное полотно–основание” использовали также слой торфа. Торфяной слой устраивался на поверхности промерзшего стабилизированного основания, уплотнялся древесно-стружечной плитой до средней толщины 0.7 см, что соответствовало толщине торфа 20 см в натурном эксперименте.

Маломасштабный стенд моделируемых грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания для второго варианта эксперимента представлен на рис. 2, для третьего – на рис. 3.

Отличие 3-го варианта от 2-го заключалось в применении конструктивно-технологического решения на стадии возведения земляного полотна конструкции дороги (см. рис. 3). В качестве теплоизоляционного материала авторы использовали “ДиатомИК”, толщиной 2–5 мм с характеристиками: теплопроводность  $0.1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , теплоемкость  $575 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , плотность  $450 \text{ кг}/\text{м}^3$ , водопоглощение 4 %. В качестве геосинтетического и гидроизоляционного материала использовали материал “Теплонит 600”.

Измерение температуры грунтового основания из суглинка производилось с помощью термопар (термометрические преобразователи), расположение которых показано на рис. 4.



**Рис. 4. Схемы расположения термометрических преобразователей для 1-го и 2-го (а), 3-го (б) вариантов экспериментов.**

1 – термометрические преобразователи; 2 – теплоизоляционный материал ППС-10; 3 – каркас экспериментального стенда из древесины; 4 – грунт земляного полотна и основания; 5 – поверхностные длительно стоящие воды; 6 – “Диатомик” в продольной траншее шириной 2 см; 7 – “Теплонит 600” (геоконтайнер). Размеры (мм) стендов выделены зеленым и синим цветами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам лабораторных экспериментов были составлены термограммы на конец первого и десятого теплых периодов. На рис. 5 приведены изотермы на фрагментах поперечных разрезов маломасштабной конструкции автомобильной дороги для трех вариантов экспериментов. За пределами фрагментов (по оси  $X$  от 0.3 м до оси симметрии конструкции дороги (0.5 м) и по оси  $Y$  от 0.11 м до дна стендса (0.33 м)) изменение температуры практически отсутствует.

В 1-м варианте эксперимента (см. рис. 5, а) наблюдалась высокая скорость промерзания откосной части земляного полотна и придорожной полосы основания из-за отсутствия снежных отложений и влияния поверхностных длительно стоящих вод. Высокая скорость промерзания рассматриваемой конструкции не согласуется с результатами натурных наблюдений и исследованиями других авторов.

При сравнении термограмм 2-го варианта моделирования (см. рис. 5, б) с 1-м (см. рис. 5, а) на конец десятого теплого периода наблюдалось снижение верхней границы многолетнемерзлых грунтов на 0.027 м под бровкой земляного полот-

на и повышение температуры грунта под откосом на 2 °C.

Согласно [СП 313.1325800.2017], выбран первый принцип – обеспечение поднятия верхней границы ММГ не ниже подошвы насыпи и сохранение ее на этом уровне в течение всего периода эксплуатации дороги. Поднятие верхней границы ММГ до подошвы основания насыпи или несколько выше происходит не по всей площади основания. Поэтому предложено конструктивное решение (см. рис. 5, в) для сохранения в мерзлом состоянии части основания, расположенной под откосом.

Отепляющее влияние было спровоцировано ПДСВ, снежными отложениями на откосах, фильтрационной прослойкой под подошвой земляного полотна. В 3-м варианте эксперимента (см. рис. 5, в) внедрение конструктивно-технологического решения, направленного на сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии при влиянии ПДСВ, позволило ограничить тепловой поток от ПДСВ и существенно уменьшить фильтрационный и тепловой потоки под подошвой земляного полотна. Конструктивно-технологическое решение способствовало поднятию кровли многолетнемерзлых грунтов к подошве насыпи в середине ее подоткосной части на конец теплого

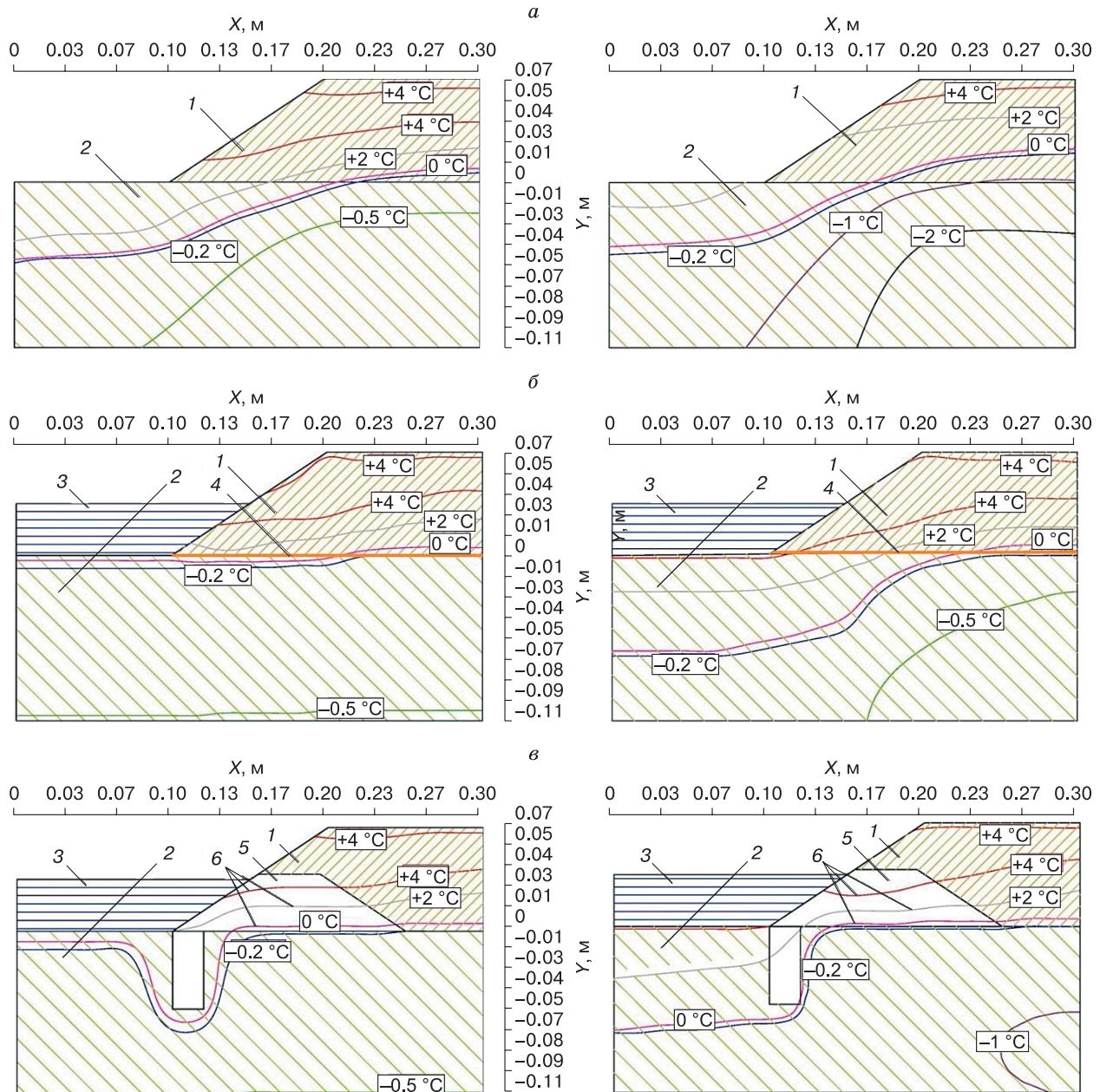


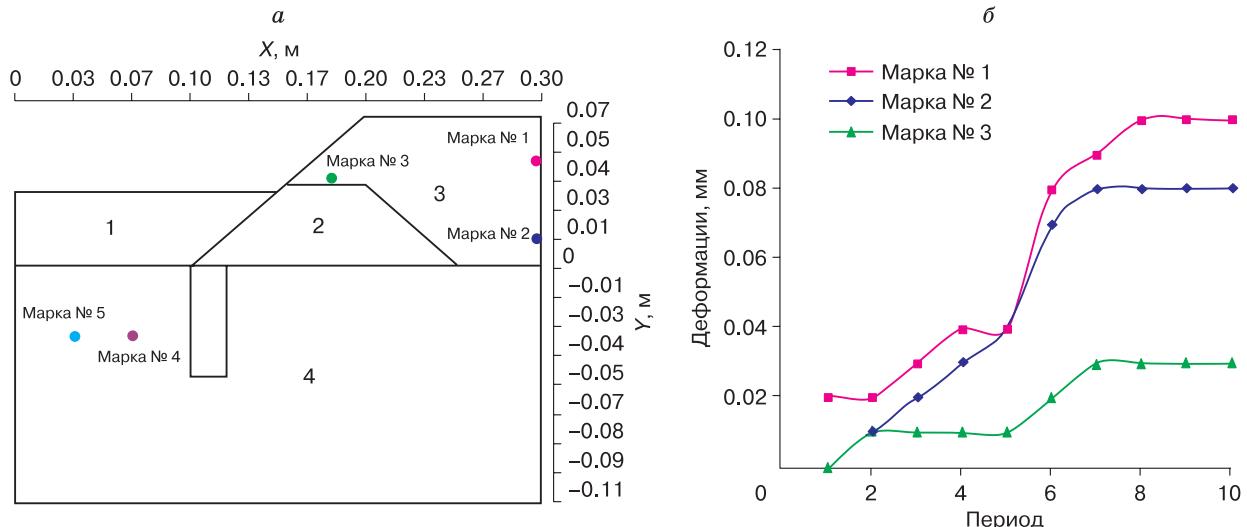
Рис. 5. Температурный режим маломасштабной конструкции автомобильной дороги на конец первого (слева) и десятого (справа) теплых периодов (октябрь) для 1-го (*а*), 2-го (*б*) и 3-го (*в*) вариантов экспериментов.

1, 2 – грунты земляного полотна и основания; 3 – поверхностные длительно стоящие воды; 4 – фильтрационная прослойка; 5 – “ДиатомИК”; 6 – изотермы.

периода 10-го цикла на 0.047 м, что соответствует 1.4 м в масштабе 1:1. На конец теплого периода 10-го цикла температура грунта в середине подоткосной части на границе земляного полотна и многолетнемерзлого основания снизилась на 2.5 °С.

В 3-м варианте эксперимента для оценки работы конструктивного решения (геоконteinеров)

моделировалась нагрузка от транспортных средств при помощи дополнительного пригруза (металлической пластины), действующего на протяжении всего эксперимента. Для измерения перемещений в земляном полотне и основании придорожной полосы были установлены грунтовые марки (рис. 6, *a*). На окончание каждого периода



**Рис. 6. Расположение грунтовых марок (а) и деформации в теле земляного полотна маломасштабной автомобильной дороги (б) на конец 1–10 теплых периодов (максимальное оттаивание в октябре).**

1 – поверхности длительно стоящие воды; 2 – геоконтеинер; 3 – земляное полотно; 4 – грунт основания.

оттаивания (октябрь) смещения марок внутри грунтового массива замеряли индикаторами часового типа ИЧ-50 с точностью измерения 0.01 мм (производитель ООО “НПО КировИнструмент”, Россия). Марки № 4 и 5 не показали перемещений, так как в придорожной полосе автомобильной дороги отсутствует силовое воздействие от насыпи и транспортной нагрузки. Силовое воздействие от водоема при оттаивании пренебрежимо мало, так как датчиками ИЧ-50 перемещения не зафиксированы. Марки № 1–3 показали развитие деформаций (относительные осадки) во времени (см. рис. 6, б). Максимальные перемещения показала марка № 1 в центральной части земляного полотна.

Одним из факторов изменения во времени деформаций грунта под нагрузкой (марки № 1–3) является его ползучесть и, как частный случай ползучести, вязкоупругость [Maltseva, 2022]. В результате обработки экспериментальных данных по методу ломаных [Мальцев, Карпенко, 1999] получили функции ползучести грунта земляного полотна.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

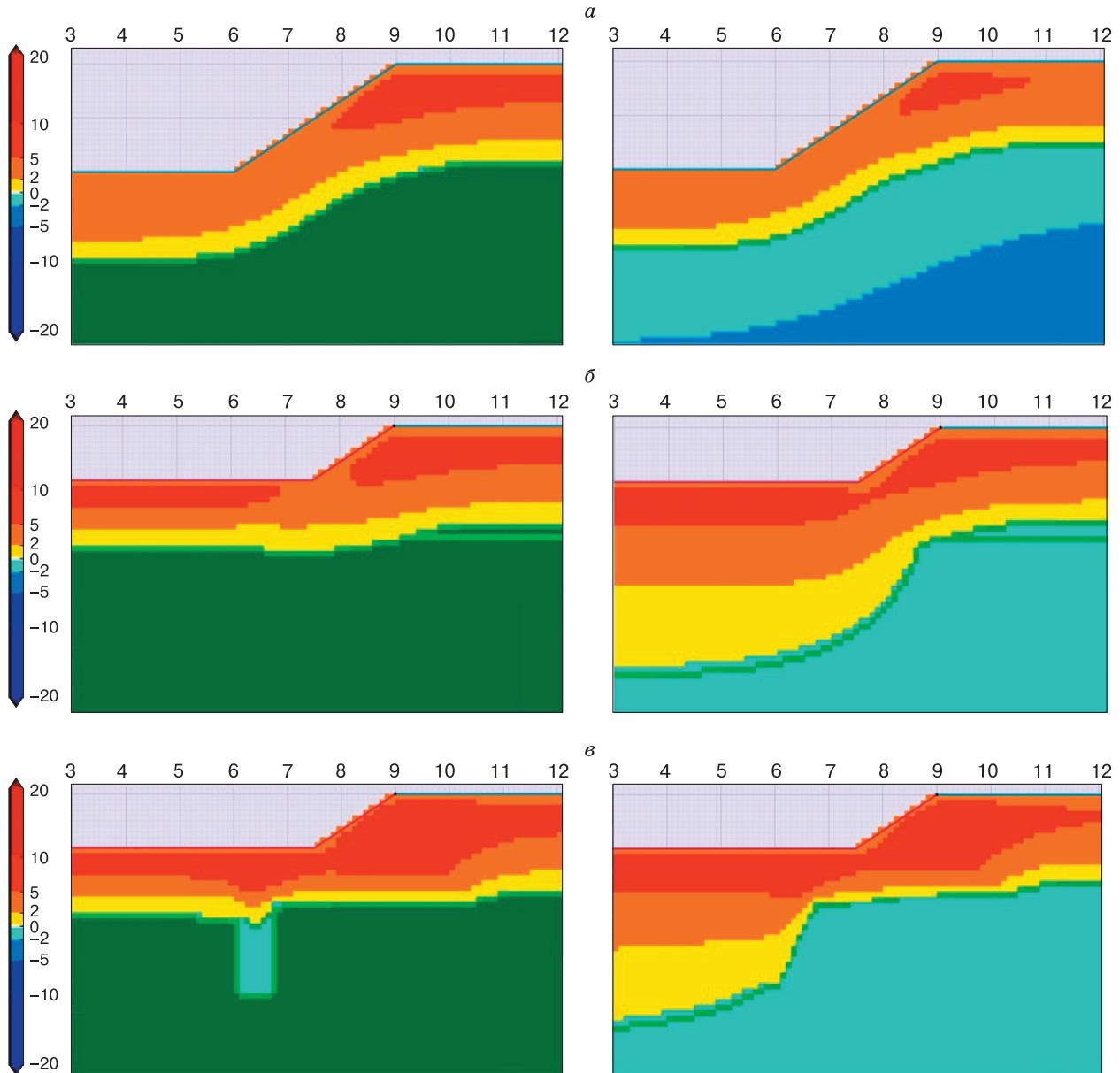
На основе данных лабораторных экспериментов авторами выполнено численное моделирование (в программе QFrost) температурного поля поперечного разреза реальной конструкции автомобильной дороги в геометрическом и временном масштабах на период 10 лет (рис. 7). Длительность периода промерзания и оттаивания составила 5032.80 и 3727.20 ч соответственно. Ширина и вы-

сота земляного полотна составили 12 и 2 м, мощность грунтового основания 10 м, ширина 30 м. Границные условия первого рода заданы на поверхностях земляного полотна, придорожной полосы (среднемесячная температура воздуха приведена выше). Для нижней и боковых границ грунтового основания заданы граничные условия второго рода – это нулевой теплопоток. Мощность внутреннего теплоисточника в виде фильтрации воды под подошвой земляного полотна принималась равной 5.805 Вт/м<sup>3</sup> согласно данным натурных наблюдений [Макаров и др., 2018]. Начальная температура в грунтах основания и земляного полотна составила –0.2 °C. Теплофизические свойства грунта указаны в таблице, характеристики поверхности стоящих вод для холодного (индекс *f*) и теплого (индекс *w*) периодов принятые следующие: теплопроводность  $\lambda_f = 2.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ,  $\lambda_w = 0.5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ , удельная теплоемкость  $C_f = 1930 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ,  $C_w = 4180 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ .

Ширина водоема в верхнем уровне принималась 7.5 м, глубина 1.0 м. Граничные условия для поверхности водоема идентичны граничным условиям для придорожных полос. Чтобы найти глубину промерзания донных отложений, рассчитано время таяния льда водоема ( $t_{th,w}$ , ч) с момента начала теплого периода по формуле [Горелик, Земеров, 2020]:

$$t_{th,w} = \frac{H_r L_w}{\alpha_{th} T_{th}}, \quad (1)$$

где  $L_w$  – объемная теплота фазового перехода лед–вода (93 000 Вт·ч/м<sup>3</sup>);  $H_r$  – глубина водоема, м;  $\alpha_{th}$  – коэффициент теплообмена за теплый (летний)



**Рис. 7. Температурные поля земляного полотна и основания автомобильной дороги на конец первого (слева) и десятого (справа) теплых периодов (октябрь) для 1-го (а), 2-го (б) и 3-го (в) вариантов экспериментов.**

Зеленый цвет соответствует температуре грунта  $-0.2^{\circ}\text{C}$  (в силу малости на шкале не видна).

период,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T_{th}$  – средняя летняя температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Как видно на рис. 7, смещение границы мерзлого грунта произошло в сторону откоса земляного полотна для 3-го варианта эксперимента, в котором применено конструктивное решение. Расчет температурного режима дороги, смоделированной на экспериментальном стенде, показал высокую сходимость с экспериментальными дан-

ными температуры грунта конструкции дороги. Погрешность расхождения глубины оттаивания грунтового массива под серединой откоса земляного полотна в численном и экспериментальном моделировании составила: в 1-м варианте для первого цикла – 6.2 %, для десятого цикла – 10.3 %; во 2-м варианте для первого цикла – 13.4 %, для десятого цикла – 6 %; в 3-м варианте для первого цикла – 6.2 %, для десятого цикла – 4.8 %.

## ВЫВОДЫ

Из сопоставления температурных полей 2-го и 3-го вариантов эксперимента следует, что применение конструктивно-технологического решения способствовало сохранению отрицательной температуры  $-1.5^{\circ}\text{C}$  в грунтовом основании под подошвой земляного полотна на протяжении десяти периодов поочередного оттаивания и промерзания основания насыпи. Сохранение грунтов основания откосной части земляного полотна в твердомерзлом состоянии обусловлено ограничением теплового влияния через откосную часть длительно стоящих вод, ограничением фильтрации воды в тело земляного полотна и прекращением фильтрации воды на границе основание–сооружение.

В результате экспериментальных исследований установлено, что отсутствие конструктивно-технологического решения привело к оттаиванию грунта основания в середине подоткосной части земляного полотна на глубину 1.4 м и повышению температуры грунта в этой части основания на  $2.5^{\circ}\text{C}$ .

Сопоставление результатов численного и экспериментального моделирования показало практическую сходимость значений глубины оттаивания в середине откосной части, так как расхождение значений варьирует от 4 до 13 %. На основе численного моделирования возможно проведение анализа температурного режима полномасштабной конструкции автомобильной дороги на подтопляемых участках при наличии или отсутствии тепло- и гидроизоляции откосной части.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 23-29-00118).*

## Литература

**Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А.** Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века // Метеорология и гидрология, 2007, № 10, с. 20–30.

**Валиев Н.А.** Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Трансп. инфраструктура Сиб. региона, 2019, т. 1, с. 538–541.

**Вялов С.С.** Реология мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 2000, 464 с.

**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. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40.

**ГОСТ 12248-2010.** Грунты. Методы лабораторных характеристик прочности и деформируемости. М., Росстандарт, 2011, 82 с.

**Грешищев С.Е.** Прочность и ползучесть мерзлых грунтов при сложном напряженном состоянии: Автoref. дис. ... канд. техн. наук. М., 1963, 16 с.

**Губарьков А.А., Дворников Ю.А., Ишков А.А. и др.** Геокриологические условия месторождений им. Р. Требса, им. А. Титова (побережье Баренцева моря и Большеземельская тундра) // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Тр. Междунар. конф. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 84–88.

**Игошин М.Е., Парамонов М.В., Воронцов В.В.** Моделирование температурного режима основания эксплуатирующей автомобильной дороги с учетом конструктивного решения по стабилизации границы многолетнемерзлых грунтов // Геотехника, 2016, № 3, с. 34–41.

**Исаков В.А.** Прогноз температурного режима грунтов насыпи и естественного основания земляного полотна в различных регионах криолитозоны // Инж. геология, 2014, № 4, с. 56–63.

**Исаков В.А., Наумов М.С., Телков Ф.С.** Результаты обследования грунтов основания железной дороги Улак–Эльга на участке 0–54 км // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инж. мерзлотоведению, посвящ. XX-летию создания ООО НПО “Фундаментстройаркос”. Тюмень, Сити-Пресс, 2011, 456 с.

**Карлов В.Д.** Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1998, 349 с.

**Кононович И.А.** Национальные интересы России в арктических морях // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена, 2008, № 70, с. 198–201.

**Кравцова В.И.** Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 33–42.

**Ланько С.В., Куликова Д.М.** Реологические модели мерзлых грунтов // Молодой ученый, 2023, № 7 (454), с. 16–22.

**Лопашук В.В., Лопашук А.В., Ермолин В.Н., Казаринов А.Е.** Исследование температурного режима земляного полотна автомобильной дороги Петропавловск–Камчатский – Мильково // Вестн. Евраз. науки, 2021, № 2, с. 8–20.

**Макаров А.С., Краев А.Н., Твердохлеб С.А., Шанхоеv З.Ш.** Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде // Интернет-журн. Трансп. сооружения, 2017, т. 4, № 4, с. 1–10. DOI: 10.15862/09TS417.

**Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоеv З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // Интернет-журн. Трансп. сооружения, 2018, т. 5, № 4, с. 1–12. DOI: 10.15862/17SATS418.

**Мальцев Л.Е.** Теория вязкоупругости для инженеров-строителей / Л.Е. Мальцев, Ю.И. Карпенко. Тюмень, Вектор бул., 1999, 240 с.

**СП 313.1325800.2017.** Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. Введ. 2018-06-15. М., Стандартинформ, 2017, 141 с.

**Фага А.Н., Зайцев А.Н., Гидеон А.А.** Перспективы развития современных геофизических исследований ЯНАО: многоцелевая инженерно-геофизическая лаборатория // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Тр. Междунар. конф. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 387–390.

**Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высп. шк., 1973, 448 с.

**Hongmiao Lv., Lei Ch.** Time-dependent creep damage model of frozen soil with unsteady fractional order under temperature and stress coupling // Math. Probl. Eng., 2023, vol. 2023, ID 3791177, 15 p. DOI: 10.1155/2023/3791177.

**Lanouette F., Doré G., Fortier D.** Influence of snow cover on the ground thermal regime along an embankment on permafrost: in situ measurements // GéoQuébec 2015: Proc. of the 68th Can. Geotech. Conf. and the 7th Can. Permafrost Conf. (Québec, 20–23 Sept., 2015). Québec, Canada, Can. Geotech. Soc., 2015, p. 1–7. DOI: 10.13140/RG.2.1.2482.1848.

**Maltseva T.** Modeling a weak foundation in interaction with reinforced sand piles under a low-rise building // Key Eng. Materials, 2022, vol. 906 KEM, p. 39–45. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.906.39.

**Minghao L., Jing L., Liang Zh., Xin Ju.** A new mitigation measure to counter thermal instability of air-cooled embankment in sandy permafrost zones of Tibet plateau, advances in materials science and engineering // Hydraulic Eng. Cold Regions: Materials, structures, and climate impacts, 2021, vol. 2021, ID 5548638, p. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5548638.

## References

- Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A. Analysis of changes in air temperature in Russia and an empirical forecast for the first quarter of the 21st century. Meteorologiya i Gidrologiya [Meteorology and Hydrology], 2007, No. 10, p. 20–30.
- Valiev N.A. Thermocomplex, protection against degradation of subgrade foundations on permafrost soils. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, vol. 1, p. 538–541.
- Vyalov S.S. Reologiya merzlykh gruntov [Rheology of frozen soils]. Moscow, Stroyizdat, 2000, 464 p. (in Russian).
- Gorelik Ya.B., Zemerov I.V. Influence of surface watering on the temperature regime of frozen soils. Vestnik Tyumenskogo universiteta [Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy], 2020, vol. 6, No. 1 (21), p. 10–40. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40.
- GOST 12248-2010. Grunty. Metody laboratornyh harakteristik prochnosti i deformiruyemosti [Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics]. Moscow, 2011, 82 p.
- Grechishchev S.E. Strength and creep of frozen soils under complex stress states: Abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 1963, 16 p. (in Russian).
- Gubarkov A.A., Dvornikov Yu.A., Ishkov A.A., Khomutov A.V., Yakimov A.S., Elantsev E.V. Geocryological conditions of the deposits named after. R. Trebs, named after. A. Titova (the coast of the Barents Sea and the Bolshezemelskaya tundra). In: Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the cryosphere: Proc. of the Int. Conf. Tyumen, Epoch, 2015, p. 84–88 (in Russian).
- Igoshin M.E., Paramonov M.V., Vorontsov V.V. Modeling the temperature regime of the base of an operating highway taking into account a design solution for stabilizing the boundary of permafrost. Geotekhnika [Geotechnika], 2016, No. 3, p. 34–41.
- Isakov V.A. Forecast of the temperature regime of embankment soils and the natural base of the subgrade in various regions of the permafrost zone. Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology], 2014, No. 4, p. 56–63.
- Isakov V.A., Naumov M.S., Telkov F.S. Results of an examination of the foundation soils of the Ulak–Elga railway on the section 0–54 km. In: Materials of the Int. Sci. and Practical Conf. on Engineering Permafrost, dedicated to the 20th anniversary of the creation of LLC NPO “Fundamentstroikos”. Tyumen, City-Press, 2011, 456 p. (in Russian).
- Karlov V.D. Seasonally freezing soils as foundations of structures: Dissertation ... Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, 1998, 349 p. (in Russian).
- Kononovich I.A. National interests of Russia in the Arctic seas. Izvestiya RGPU [News of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen], 2008, No. 70, p. 198–201.
- Kravtsova V.I. Distribution of thermokarst lakes in Russia within the zone of modern permafrost. Vestnik Moskovskogo Universiteta [Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography], 2009, No. 3, p. 33–42.
- Lopashuk V.V., Lopashuk A.V., Ermolin V.N., Kazarinov A.E. Study of the temperature regime of the roadbed of the Petropavlovsk-Kamchatsky – Milkovo highway. Vestnik Evraziiskoi nauki [Bulletin of Eurasian Science], 2021, No. 2, p. 8–20.
- Lanko S.V., Kulikova D.M. Rheological models of frozen soils. Molodoi uchenyi [Young scientist], 2023, No. 7 (454), p. 16–22.
- Makarov A.S., Kraev A.N., Tverdokleb S.A., Shankhoev Z.Sh. Results of an experimental study and numerical modeling of plane-parallel freezing of a soil sample in an experimental stand. Internet magazine Transport Constructions, 2017, vol. 4, No. 4, p. 1–10. DOI: 10.15862/09TS417.
- Makarov A.S., Kraev A.N., Shankhoev Z.Sh. Structural and technological solutions for the construction of highways on permafrost soils. Internet magazine Transport Structures, 2018, No. 4, p. 1–12. DOI: 10.15862/17SATS418.
- Maltsev L.E., Karpenko Yu.I. Teoriya vyazkouprugosti dlya inzhenerov-stroitelei [Theory of viscoelasticity for civil engineers]. Tyumen, Vector beech, 1999, 240 p. (in Russian).
- SP 313.1325800.2017. Dorogi avtomobil'nyye v rayonakh vechnoy merzloty. Pravila proyektirovaniya i stroitel'stva [Roads in permafrost zone. Design and construction rules]. 2018-06-15. Moscow, 2017, 141 p.
- Faga A.N., Zaitsev A.N., Gideon A.A. Prospects for the development of modern geophysical research in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug: a multi-purpose engineering geophysical laboratory. In: Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the cryosphere: Proc. of the Int. Conf. Tyumen, Epoch, 2015, p. 387–390 (in Russian).
- Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vyshaya shkola, 1973, 448 p. (in Russian).
- Hongmiao Lv., Lei Chen. Time-dependent creep damage model of frozen soil with unsteady fractional order under temperature and stress coupling. Math. Probl. Eng., 2023, vol. 2023, ID 3791177, p. 1–15. DOI: 10.1155/2023/3791177.
- Lanouette F., Doré G., Fortier D. Influence of snow cover on the ground thermal regime along an embankment on permafrost: in situ measurements. In: GéoQuébec 2015: Proc. of the 68th Can. Geotech. Conf. and the 7th Can. Permafrost Conf. (Québec, 20–23 Sept. 2015). Québec, Canada, Can. Geotech. Soc., 2015, p. 1–7. DOI: 10.13140/RG.2.1.2482.1848.
- Maltseva T. Modeling a weak foundation in interaction with reinforced sand piles under a low-rise building. Key Eng. Materials, 2022, vol. 906 KEM, p. 39–45. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.906.39.
- Minghao L., Jing L., Liang Zh., Xin Ju. A new mitigation measure to counter thermal instability of air-cooled embankment in sandy permafrost zones of Tibet plateau”, advances in materials science and engineering. Hydraulic Eng. Cold Regions: Materials, structures, and climate impacts, 2021, vol. 2021, ID 5548638, p. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5548638.

Поступила в редакцию 30 ноября 2023 г.,  
после доработки – 25 февраля 2024 г.,  
принята к публикации 1 апреля 2024 г.