

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <https://t-s.today/>

2017, Том 4, №4 / 2017, Vol 4, No 4 <https://t-s.today/issues/vol4-no4.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf>

DOI: 10.15862/09TS417 (<http://dx.doi.org/10.15862/09TS417>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Макаров А.С., Краев А.Н., Твердохлеб С.А., Шанхоев З.Ш. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09TS417

For citation:

Makarov A.S., Kraev A.N., Tverdokhlebs S.A., Shankhoyev Z.Sh. [Results of experimental research and numerical modeling of plane-parallel freezing of a soil sample in an experimental test-bed] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/09TS417

УДК 624.139.6

Макаров Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень
Аспирант кафедры «Геотехники»
E-mail: Mak351218@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=927606

Краев Алексей Николаевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень
Доцент кафедры «Строительные конструкции»
Кандидат технических наук
E-mail: kraev_aln@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546741

Твердохлеб Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень
Экспериментальная лаборатория
Заведующий лабораторией кафедры «Геотехники»
E-mail: tverdokhlebs.a@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=770742

Шанхоев Зураб Шабазгиреевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень
Аспирант кафедры «Геотехники»
E-mail: zurab_shanhoyev@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=906486

**Результаты экспериментального
исследования и численного моделирования
плоскопараллельного промораживания образца
грунта в экспериментальном стенде**

Аннотация. В статье авторами дан краткий обзор проблем строительства всепогодных автомобильных дорог с твердым покрытием на многолетнемерзлых грунтах. В целях экономической эффективности проведения исследований указанных автомобильных дорог при сезонном промораживании и оттаивании авторами предлагается проведение серии экспериментальных работ в лабораторных условиях. Приводится описание

экспериментального стенда, позволяющего моделировать температурно-влажностные условия основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах с заданными теплофизическими характеристиками грунтов основания. Приведена методика проведения исследований плоскопараллельного промораживания образца грунта с квазистационарным температурным режимом в лабораторных условиях. С целью верификации результатов эксперимента в лабораторных условиях предложено проведение численного моделирования промораживания идентичного основания. Авторами статьи было выполнено численное моделирование полного промораживания аналогичного образца грунта в экспериментальном стенде по двухслойной явной разностной схеме с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи. Даются результаты проведенного эксперимента в лабораторных условиях и численного моделирования экспериментального стенда с их сопоставлением. Выявлены наиболее вероятные причины расхождения результатов экспериментального и численного моделирования. Сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям.

Ключевые слова: автомобильная дорога; многолетнемерзлый грунт; экспериментальные исследования; численное моделирование; температура; суглинок; промораживание грунта; водонасыщенный грунт

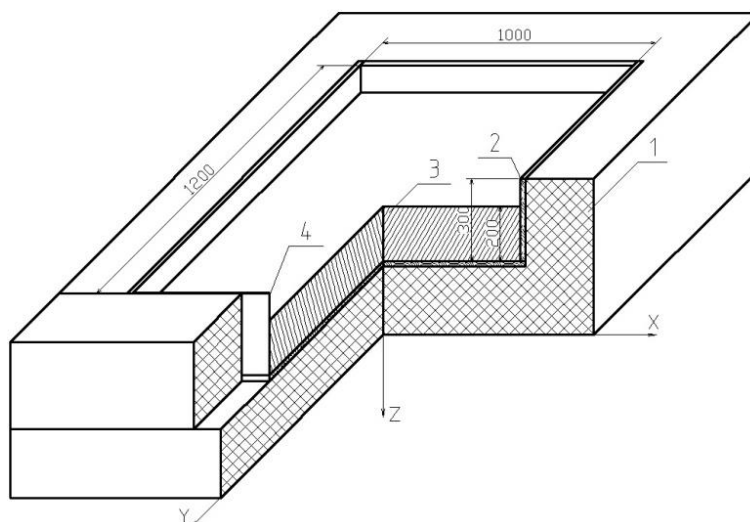
Освоение арктических пространств является актуальной задачей как гражданских отраслей промышленности, так и оборонного комплекса Российской Федерации. Возведение объектов любого типа и добыча полезных ископаемых не возможны без развития транспортной инфраструктуры, одним из видов которой являются автомобильные дороги. Строительство всесезонных автомобильных дорог с твердым покрытием связано с рядом определенных трудностей. Одной из таких проблем является трудоемкость и высокая продолжительность работ по добыче пригодного к строительству грунта в сложных инженерно-геологических условиях [4].

Кроме того, одной из проблем строительства всесезонных автомобильных дорог с твердым покрытием на многолетнемерзлых грунтах является стабилизация конструкции таких дорог [3, 6]. Существует множество способов решения данной проблемы таких как:

- армирование геосинтетическим материалом грунтов основания и земляного полотна автомобильной дороги;
- установка термостабилизаторов;
- устройство термослоек в слоях земляного полотна и основания дороги и др.

Так как проведение натурных экспериментов и мониторинг автомобильной дороги в условиях Арктики является дорогостоящим мероприятием, предложено разработать экспериментальный стенд, позволяющий моделировать температурно-влажностные условия основания автомобильной дороги и земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах.

Для выполнения лабораторных исследований в центральной научно-исследовательской лаборатории инженерного мерзлотоведения ФГБОУ ВО «ТИУ» коллективом авторов был разработан экспериментальный стенд, позволяющий моделировать температурно-влажностные условия основания автомобильной дороги и земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах [2, 5, 7]. Экспериментальный стенд выполнен в масштабе 1:30 к размерам моделируемого объекта. Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.



1 – утеплитель ППС-10, толщина утеплителя 250 мм; 2 – деревянный каркас стенда, толщина каркаса 25 мм;
3 – однородный грунт основания автомобильной дороги; 4 – органическое стекло, толщина стекла 3 мм

Рисунок 1. Схема экспериментального стенда для моделирования температурно-влажностных условий основания автомобильной дороги и земляного полотна в масштабе к моделируемому объекту 1:30 (рисунок сделан авторами)

Экспериментальный стенд представляет собой закрытую систему в виде лотка с жесткими стенками и дном с габаритными размерами в плане 1200x1000 мм и высотой 300 мм. Для исключения промерзания грунта через дно и боковые стенки лотка и для обеспечения одностороннего и плоскопараллельного промерзания, боковые поверхности и дно лотка оклеивались снаружи утеплителем пенополистиролом ППС-10 толщиной 250 мм. Плотность и теплопроводность пенополистирола ППС-10 соответственно равны $\rho = 10 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. С целью гидроизоляции водонасыщенного грунта на дно и боковые стенки лотка укладывался 1 слой полиэтиленовой пленки. Для фиксации температурных полей, тепловизором, в торцевой стенке экспериментального стенда было установлено органическое стекло толщиной 3 мм. Общий вид экспериментального стенда до и во время выполнения эксперимента в лабораторных условиях представлен на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2. Общий вид экспериментального стенда до выполнения эксперимента в лабораторных условиях (фото выполнено авторами)

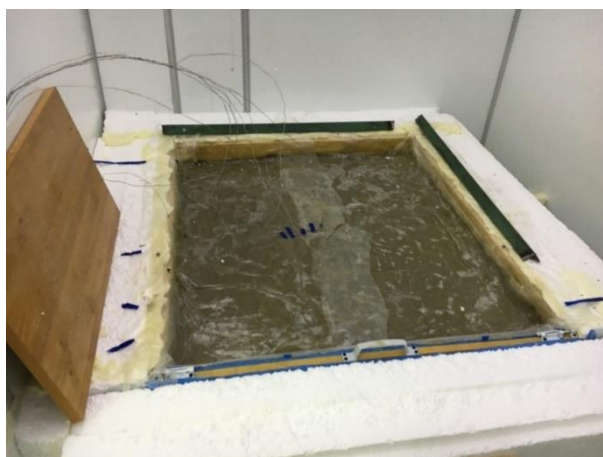


Рисунок 3. Общий вид экспериментального стенда во время выполнения эксперимента в лабораторных условиях (фото выполнено авторами)

На первом этапе эксперимента моделировалось основание автомобильной дороги, сложенное из однородного грунта. В качестве грунтового основания использовался водонасыщенный суглинок нарушенной структуры со следующими физическими характеристиками: плотность сухого грунта $\rho_d = 1508,7-1550,3$ кг/м³ и влажность $W = 28,7-32,1$ %. Водонасыщенный суглинок послойно с уплотнением укладывался в лоток мощностью 200 мм. Теплофизические характеристики грунта моделируемого основания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические характеристики грунта моделируемого основания (таблица выполнена авторами)

$\lambda_f, \text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$	$\lambda_{th}, \text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$	$C_f, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$	$C_{th}, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$	$L_v, \text{МДж}/\text{м}^3$
1,80	1,59	2805,58	3332,68	84,83

Примечание: в таблице 1 приняты следующие обозначения:

λ_f – теплопроводность грунта в мерзлом состоянии;

λ_{th} – теплопроводность грунта в талом состоянии;

C_f – удельная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии;

C_{th} – удельная теплоемкость грунта в талом состоянии;

L_v – теплота таяния (замерзания) грунта.

При моделировании температурных условий использовались данные из инженерно-гидрометеорологических изысканий на объекте «Строительство автомобильной дороги г. Сургут – г. Салехард, участок г. Новый Уренгой – г. Надым. 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936). Корректировка». Среднемесячная температура воздуха, моделируемая в эксперименте, представлена в таблице 2.

Таблица 2

Среднемесячная температура воздуха. Метеостанция Надым (таблица выполнена авторами)

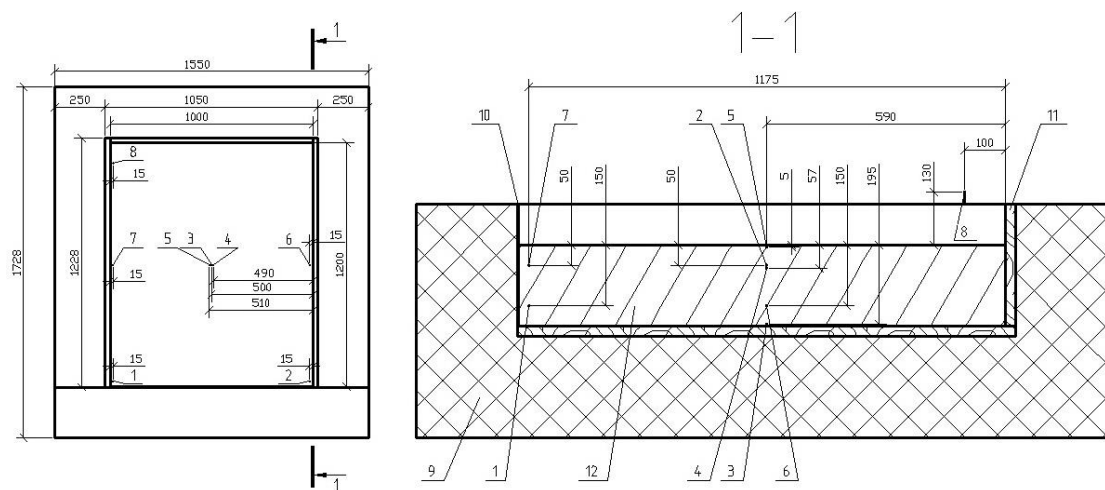
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	-24,5	-24,0	-16,8	-8,8	-1,0	8,8	15,5	11,4	5,6	-5,4	-16,1	-21,9

При моделировании температурных условий в эксперименте был осуществлен переход от нестационарного температурного режима к квазистационарному с принятием в расчете средних по многолетним данным температуры воздуха за период отрицательных и положительных температур: соответственно $T_{f,m} = -14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{th,m} = +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В эксперименте моделировался теплый и холодный период работы объекта. Продолжительность теплого и холодного периода была принята по методике Карлова В.Д. [1]. Во время проведения эксперимента в лабораторных условиях им был принят геометрический масштаб моделируемого объекта 1:10, а масштаб времени – 1:100, т. к. последний должен быть равен квадрату масштаба линейных размеров. Согласно ВСН 84-89 расчетный период отрицательных температур при масштабе 1:1 равен 5032,80 ч, расчетный период положительных температур при масштабе 1:1 – 3727,20 ч. Геометрический масштаб исследуемого объекта на экспериментальном стенде принят М 1:30, в результате, величина холодного периода для эксперимента в лабораторных условиях составила 5,59 ч, величина теплого периода – 4,14 ч.

Первоначально экспериментальная установка помещалась в морозильную камеру с поддерживаемой температурой $T = +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для стабилизации температуры по всему объему грунта. После стабилизации температуры по всему объему грунта в морозильной камере была задана температура $T = -14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. За полное промораживание грунта принимался период, когда значение температуры на нижнем слое грунта основания достигало значения температуры начала замерзания грунта $T_{bf} = -0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для фиксации температуры грунта в экспериментальном стенде и температуры воздуха в морозильной камере использовался измеритель теплопроводности многоканальный ИТ-2-48 с термоэлектрическими хромель-копелевыми преобразователями (термопара) типа L. Измерение значения температуры во времени в период проведения эксперимента производилось в верхнем (термопара № 5), нижнем (термопара № 3) слоях грунта и на глубине 57 мм (термопара № 4), что соответствует глубине деятельного слоя моделируемого объекта. Проверка условия плоскопараллельного промерзания грунта основания контролировалась термопарами № 1, 6 и № 2, 7, расположенными у боковых стенок экспериментального стенда на глубине 150 и 50 мм соответственно. Температура воздуха в морозильной камере измерялась термопарой № 8. Схема расстановки термоэлектрических преобразователей в экспериментальном стенде представлена на рисунке 4.



1-8 – номера термоэлектрических преобразователей; 9 – утеплитель ППС-10; 10 – органическое стекло; 11 – деревянный каркас стенда; 12 – однородный грунт основания автомобильной дороги

Рисунок 4. Схема расстановки термоэлектрических преобразователей в экспериментальном стенде (рисунок сделан авторами)

С целью проведения численных экспериментов описывающих водно-тепловой режим исследуемого объекта при промораживании и оттаивании выполнялось численное моделирование экспериментального стенда с последующим сопоставлением результатов моделирования и эксперимента.

Численное моделирование экспериментального стенда выполнялось двухслойной явной разностной схемой с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи [8, 9, 10].

При численном моделировании экспериментального стенда был осуществлен переход от нестационарного температурного режима к квазистационарному с принятием в расчете средних по многолетним данным температуры воздуха за период отрицательных и положительных температур: соответственно $T_{f,m} = -14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{th,m} = +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с граничными условиями третьего рода на поверхности. При численном моделировании теплоток на остальных границах моделируемого стенда не учитывался.

В численном эксперименте моделировался период полного промерзания образца грунта. Результаты численного моделирования показали, что принятие в расчете постоянного значения температуры воздуха при промораживании грунта приводит к значительным погрешностям. Мгновенное изменение температуры с $+10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к значительным расхождениям результатов численного моделирования и экспериментальных данных, т. к. в морозильной камере температура меняется не моментально. В результате при численном моделировании учитывалось изменение значения температуры воздуха в морозильной камере в период перехода от $+10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Закономерность изменения температуры воздуха до постоянной величины была получена по результатам замера температуры в морозильной камере.

Время полного промораживания грунта основания по всему объему по результатам численного моделирования составило $t_{числ} = 105,8\text{ ч}$, а по результатам эксперимента в лабораторных условиях – $t_{лаб} = 90,3\text{ ч}$. Расхождение результатов численного моделирования и эксперимента по времени составило 17,2 %, что обусловлено неравномерным распределением влаги по всему объему грунта в экспериментальном стенде.

Результаты эксперимента в лабораторных условиях и численного моделирования представлены на сравнительных графиках изменения температуры во времени в слоях грунта основания (см. рисунки 5, 6, 7).

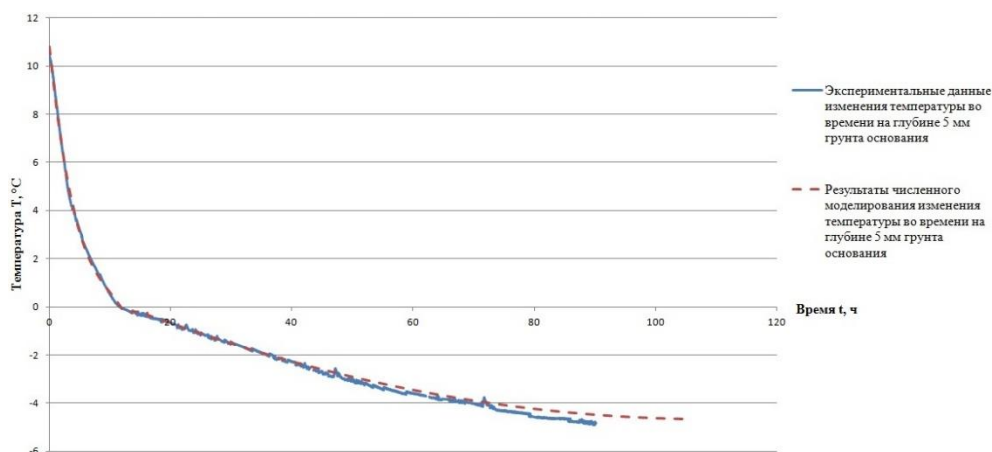


Рисунок 5. График изменения температуры во времени на глубине 5 мм грунта основания при эксперименте в лабораторных условиях и численном моделировании (рисунок сделан авторами)

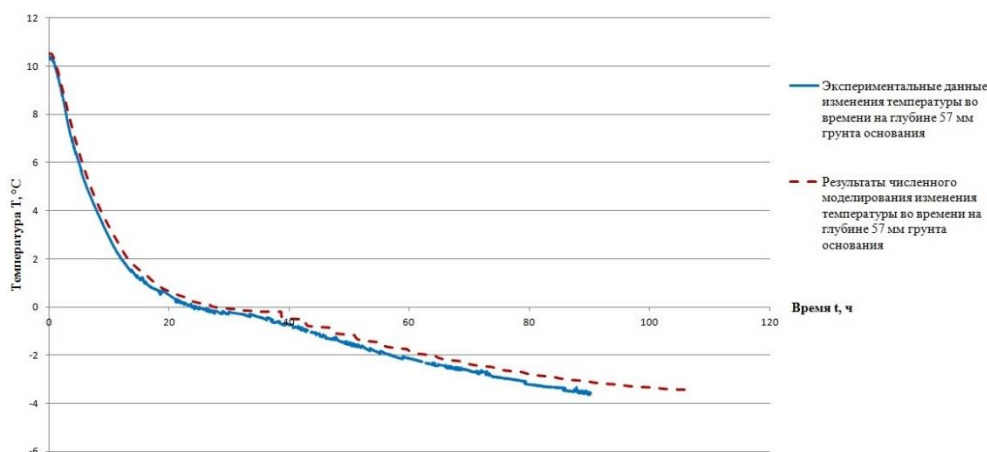


Рисунок 6. График изменения температуры во времени на глубине 57 мм грунта основания при эксперименте в лабораторных условиях и численном моделировании (рисунок сделан авторами)

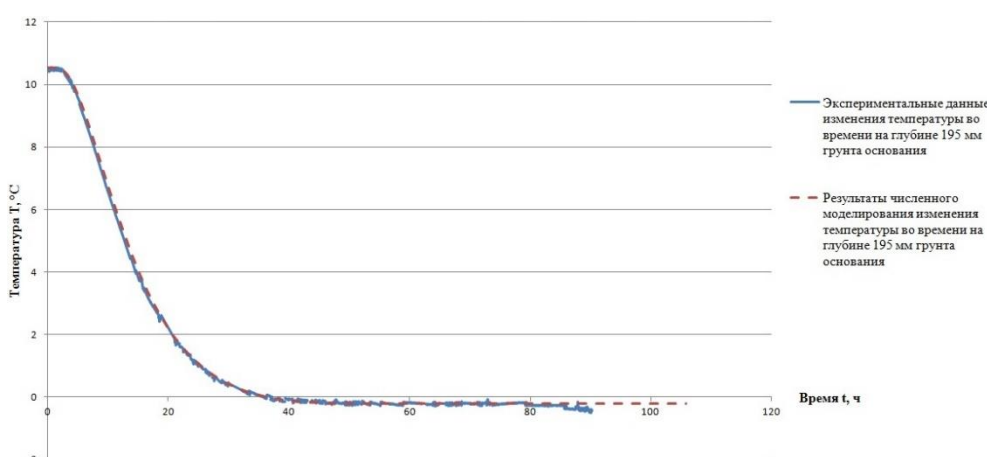


Рисунок 7. График изменения температуры во времени на глубине 195 мм грунта основания при эксперименте в лабораторных условиях и численном моделировании (рисунок сделан авторами)

Сопоставляя результаты экспериментальных данных и численного моделирования в момент времени, равный значению времени полного промораживания грунта основания по всему объему $t_{\text{лаб}} = 90,3$ ч, сделаны следующие выводы:

1. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 5 мм в момент времени $t = 90,3$ ч при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.5мм}} = -4,8$ °С, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.5мм}} = -4,6$ °С. Разница температур составляет $\Delta T_{\text{гл.5мм}} = 0,2$ °С.

2. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 57 мм в момент времени $t = 90,3$ ч при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.57мм}} = -3,6$ °С, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.57мм}} = -3,4$ °С. Разница температур составляет $\Delta T_{\text{гл.57мм}} = 0,2$ °С.

3. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 195 мм в момент времени $t = 90,3$ ч при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.195мм}} = -0,3$ °С, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.195мм}} = -0,2$ °С. Разница температур составляет $\Delta T_{\text{гл.195мм}} = 0,1$ °С.

4. Вероятными причинами разницы значений температур и времени полного промораживания грунта основания по всему объему при сопоставлении результатов

лабораторного и численного эксперимента в момент времени $t = 90,3$ ч могут быть следующие факторы:

- погрешность фиксации температуры термоэлектрическими преобразователями;
- в экспериментальном стенде не обеспечено идеальное плоскопараллельное промораживание грунта;
- колебания температуры в морозильной камере при проведении эксперимента в лабораторных условиях.

Результаты сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования указывают на высокую сходимость значений изменения температуры исследуемого объекта во времени, что позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего использования описанной методики проведения экспериментов в последующих исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карлов В.Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1998.
2. Краев А.Н., Пермитина Т.В. Методика проведения лабораторного исследования автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ – В 2-х т. – Т. I. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2015. – С. 64-72.
3. Кудрявцев, С.А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. – СПб: Группа компаний «Геореконструкция», 2014. – 248 с.
4. Макаров А.С., Краев А.Н. Использование некондиционных грунтов в теле насыпи автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ – В 2-х т. – Т. I. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2015. – С. 79-85.
5. Макаров А.С., Шанхоев З.Ш., Земеров И.В., Скворцов Д.С. Анализ масштабного фактора при моделировании автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 4. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 256-259.
6. Сергеев А.С., Юшков Б.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, №1 (2014) – Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/02TS114.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
7. Скворцов Д.С., Краев А.Н., Макаров А.С., Васенин П.И., Твердохлеб С.А. Экспериментальное исследование песчаной подушки с контурным армированием в сезоннопромерзающих пучинистых грунтах // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 4. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 317-321.
8. Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2015.
9. Хрусталева Л.Н., Черкасова Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания-оттаивания грунта // Изв. Сибирского отд. А.Н. СССР, серия техн. наук. – 1966. – Т. 6, № 2. – С. 12-24.
10. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Учебное пособие. М.: Высш. шк., 1973. – 448 с.

Makarov Aleksei Sergeevich

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen
E-mail: Mak351218@mail.ru

Kraev Alexey Nikolaevich

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen
E-mail: kraev_aln@mail.ru

Tverdokhleб Sergei Anatolyevich

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen
E-mail: tverdokhleб.s.a@yandex.ru

Shankhoev Zurab Shabazgireevich

Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen
E-mail: zurab_shankhoev@mail.ru

Results of experimental research and numerical modeling of plane-parallel freezing of a soil sample in an experimental test-bed

Abstract. In this article authors gave a brief overview of, all-season highways construction with a hard surface on permafrost soils, problems. For the purpose of economic efficiency of carrying out this researches, of the referred highways at seasonal freezing and thawing, the authors propose to conduct a series of experimental works in laboratory conditions. This article provides a description of the experimental test-bed that allows modeling of given temperature and humidity conditions of the highway foundation on permafrost soils with given thermophysical characteristics of the foundation soil. This article presents the technique, of carrying out the investigation of the plane-parallel freezing of a soil sample in the laboratory, with given quasi-stationary temperature regime and conditions. In order to verify the results of the experiment in laboratory conditions, it was proposed to perform a numerical freezing simulation of an identical base. The authors of this article performed a quantitative simulation of complete freezing of an analogical soil sample, in the experimental test-bed. This was achieved by using a bilayered explicit difference scheme, including the balance method and with the enthalpy formulation of the problem. This report provides the results and of the experiment with given laboratory conditions and compilation of quantitative simulation in the experimental test-bed. This report reveals the most probable causes of the diversification between the results of experimental and numerical modeling. The main conclusions on the conducted researches are formulated in this report.

Keywords: highway; permafrost soil; experimental research; quantitative simulation; temperature; clayey soil; complete freezing of soil; water-saturated soil

REFERENCES

1. Karlov V.D. (1998). Sezonnopromerzayushchie grunty kak osnovaniya sooruzhenij. [*Seasonally frozen soils as base of structures.*] Saint Petersburg.
2. Kraev A.N., Permitina T.V. (2015). Technique of carrying out laboratory research of a motor road on permafrost soils. *RIO TyumGASU*, 1, pp. 64-72. (in Russian).
3. Kudryavcev S.A., Saharov I.I., Paramonov V.N. (2014). Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoehlementnye raschety). [*Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations).*] Saint Petersburg: Group of companies "Georeconstruction", p. 248.
4. Makarov A.S., Kraev A.N. (2015). Use of substandard soils in the body of the embankment of highways in permafrost conditions. *RIO TyumGASU*, 1, pp. 79-85. (in Russian).
5. Makarov A.S., Shanhoev Z.SH., Zemerov I.V., Skvorcov D.S. (2017). Analysis of the scale factor in the modeling of the motor road on permafrost soils. *TIU*, 4, pp. 256-259. (in Russian).
6. Sergeev A.S., Yushkov B.S. (2014). On the freezing of clay soil and migration of water in the construction of pavement. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(1). Available at: <https://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (in Russian).
7. Skvorcov D.S., Kraev A.N., Makarov A.S., Vasenin P.I., Tverdohleb S.A. (2017). Experimental study of a sand cushion with contoured reinforcement in seasonally freezing subsoil soils. *TIU*, 4, pp. 317-321. (in Russian).
8. Spasennikova K.A. (2015). Komp'yuternoe modelirovanie teplomassoperenosa v gruntah pod sooruzheniyami, postroennymi na vechnoj merzlotte s ispol'zovaniem sezonnyh ohlazhdayushchih ustrojstv. [*Computer modeling of heat and mass transfer in soils under structures built on permafrost using seasonal cooling devices.*] Tyumen.
9. Hrustalev L.N., CHerkasova L.N. (1966). Numerical method for solving the problem of freezing-thawing of soil. *Izv. Siberian Branch. A.N. the USSR*, 2(6), pp. 12-24. (in Russian).
10. Cytovich N.A. (1973). *Mekhanika merzlyh gruntov. [Mechanics of frozen soils.]* Moscow: High school, p. 448.