

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/05SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/05SATS119>)

Статья поступила в редакцию 01.01.2019; опубликована 16.02.2019

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Краев А.Н., Шанхоев З.Ш. Моделирование деформированного состояния земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/05SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05SATS119

**For citation:**

Kraev A.N., Shankhoyev Z.Sh. (2019). Modeling the deformed state of the roadway on permafrost. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/05SATS119

**УДК 624.139.6**

**Краев Алексей Николаевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Доцент кафедры «Строительные конструкции»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [kraev\\_aln@mail.ru](mailto:kraev_aln@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=546741](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546741)

**Шанхоев Зураб Шабазгиреевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Аспирант кафедры «Геотехники»

E-mail: [zurab\\_shanhoyev@mail.ru](mailto:zurab_shanhoyev@mail.ru)

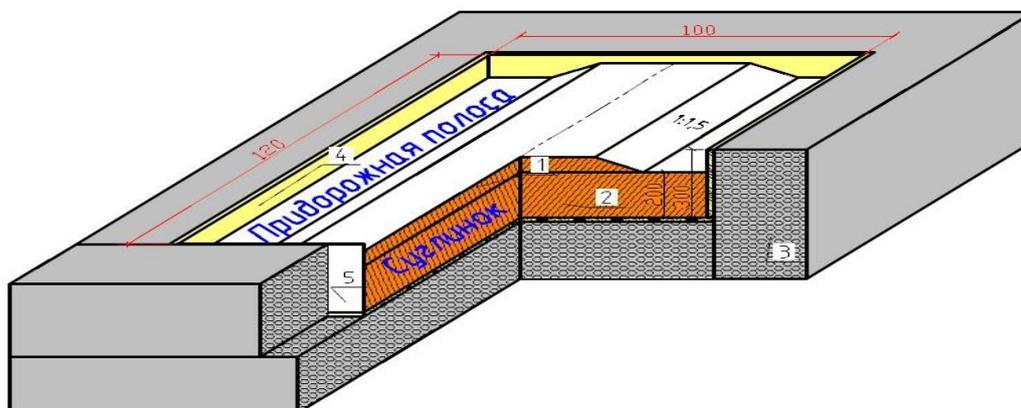
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=906486](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=906486)

## **Моделирование деформированного состояния земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах**

**Аннотация.** Для экономической эффективности авторы предлагают провести экспериментальное исследование деформированного состояния модели земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в лабораторных условиях в закрытой системе (без подтока воды) с применением геометрического масштаба М 1:30 и временного М 1:900. Приводится описание экспериментального лотка, позволяющего моделировать не только деформированное состояние линейного сооружения, но и температурный режим. При проведении исследования выполнялась фотофиксация дефектов и измерение деформаций сооружения. В программном комплексе «Питон» были построены изолинии распределения вертикальных перемещений при промораживании-оттаивании, представлена термограмма изменения температуры в теле земляного полотна и основания автомобильной дороги. Сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; многолетнемерзлый грунт; численное моделирование; насыпь; промораживании-оттаивании; земляное полотно; температурный режим

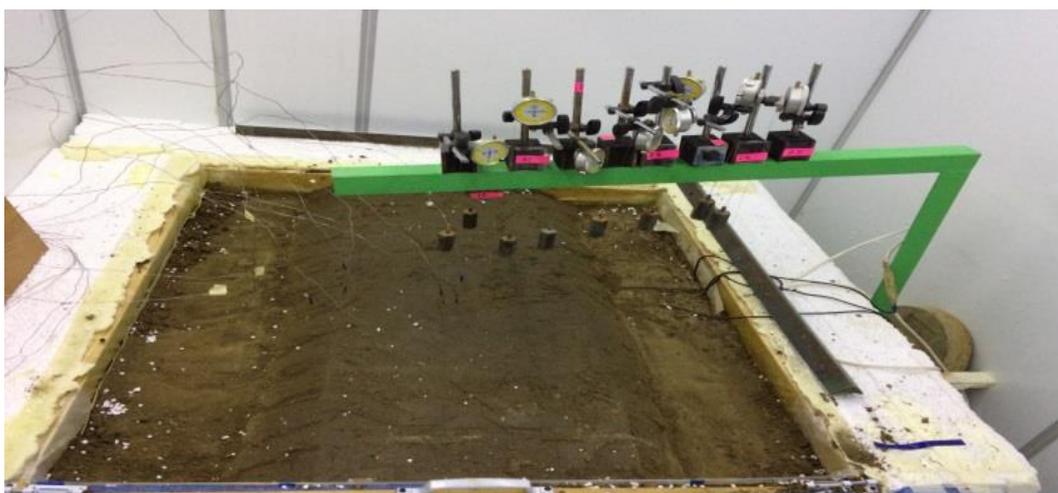
На базе центральной научно-исследовательской лаборатории «Строительство на вечной мерзлоте» Тюменского индустриального университета (ТИУ) было проведено экспериментальное лабораторное исследование модели земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах [1; 9]. Для проведения лабораторных исследований был разработан экспериментальный лоток с геометрическими размерами 1200x1000x300 мм. Схема испытательного лотка представлена на рисунке 1.



1 – земляное полотно автомобильной дороги, 2 – основание земляного полотна автомобильной дороги, 3 – утеплитель ППС-10, 4 – деревянный каркас испытательного лотка, 5 – органическое стекло для выполнения фотофиксации

**Рисунок 1.** Схема испытательного лотка для исследования деформированного состояния модели автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах (рисунок выполнен авторами)

На первом этапе экспериментальных исследований испытывалась модель в закрытой системе (без подтока воды). Общий вид испытательного лотка представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Общий вид испытательного лотка (рисунок выполнен авторами)

При моделировании земляного полотна и основания автомобильной дороги в масштабе 1:30 [3; 4] использовали однородный водоносный суглинок, нарушенной структуры.

В морозильной камере предварительно выполнялась температурно-влажностная стабилизация основания, путем циклического замораживания и оттаивания [3]. На предварительно стабилизированном основании мощностью  $h = 20$  см возводили земляное полотно из охлажденного грунта. Грунт для возведения земляного полотна выдерживался в морозильной камере в течении 24 часов при температуре  $T = 0$  °С, что обеспечивало условия

возведения земляного полотна близкие к натурным. Земляное полотно автомобильной дороги моделировалось по первому принципу проектирования.

Модель земляного полотна возводилась с послойным уплотнением. Высота моделируемой насыпи автомобильной дороги составляла  $h = 6,6$  см. После возведения насыпи земляного полотна выполнялось профилирование откосной части сооружения. Заложение откоса принималось равным 1:1,5.

Для имитации сложных климатических условий, приближенных к объекту: «Строительство автомобильной дороги г. Сургут – г. Салехард, участок г. Новый Уренгой – г. Надым. 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохетгинский (км 936). Корректировка» испытательный лоток помещался в морозильную камеру. Температурные условия  $T_{f,m} = -14,8$  °C и  $T_{th,m} = +10,0$  °C были приняты как средние значения по многолетним наблюдениям положительных и отрицательных температур натурального объекта [3]. Продолжительность теплого и холодного периода была принята по методике Карлова В.Д. [10]. При проведении эксперимента в лабораторных условиях был принят геометрический масштаб исследуемого объекта в лотке 1:30, масштаб времени – 1:900, 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. В результате, величина холодного периода для эксперимента в лабораторных условиях составила 5,59 ч, величина теплого периода – 4,14 ч [3]. Общий вид морозильной камеры представлен на рисунке 3.

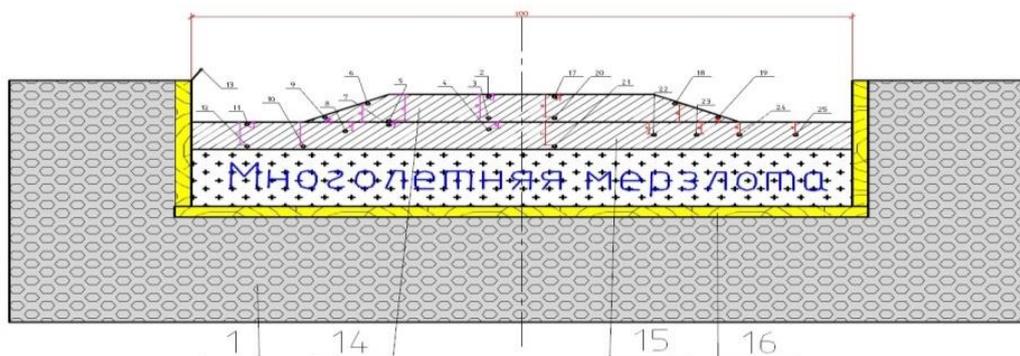


*Рисунок 3. Общий вид морозильной камеры (рисунок выполнен авторами)*

Общее количество циклов промораживания-оттаивания земляного полотна и основания автомобильной дороги составило 15, что соответствуют 15-ти годам эксплуатационного срока службы линейного объекта. Качественные и количественные изменения температурного режима и деформированного состояния объекта наблюдались в первые 10 циклов. В последующих 5 циклах наблюдались циклические повторения деформированного и температурного режима экспериментальной модели.

Для измерения деформаций тела земляного полотна и основания автомобильной дороги использовались грунтовые марки. Температура грунта фиксировалась при помощи термоэлектрических хромель-копелевых преобразователей (термопара) типа L. Так как исследуемая модель симметрична относительно продольной оси сооружения, грунтовые марки и термопары были распределены следующим образом: с правой стороны были расположены грунтовые марки, с левой термопары. Расположение марок и термопар выполнялось симметрично [6; 7]. Фиксация перемещений выполнялась при помощи реперной системы, на которую закреплялись индикаторы часового типа с точностью измерения 0,01 мм.

Для фиксации температуры использовался многоканальный измеритель теплопроводности ИТ-2-48. Схема расстановки грунтовых марок и термомпар представлена на рисунке 4.



1 – утеплитель ППС-10; 2-13 – номера термомпар; 14 – земляное полотно автомобильной дороги; 15 – основание автомобильной дороги; 16 – деревянный каркас; 17-25 – грунтовые марки

**Рисунок 4.** Схема расстановки грунтовых марок и термомпар (рисунок выполнен авторами)

При проведении эксперимента выполнялась фотофиксация состояния объекта [5]. На рис. 5 представлены фотографии дефектов. На третьем цикле промораживания в теле насыпи выявлены трещины в продольном и поперечном направлении. Трещины развивались до восьмого цикла с максимальной величиной раскрытия  $\Delta = 1$  мм, длиной  $L = 60$  мм.



**Рисунок 5.** Трещина в теле насыпи земляного полотна автомобильной дороги (рисунок выполнен авторами)

На рис.6 зафиксировано отслоение откосной части земляного полотна от основания автомобильной дороги [2]. Данный дефект был зафиксирован в период четвертого цикла промораживания-оттаивания. Вероятной причиной развития деформаций является поднятие моделируемой границы многолетнемерзлых грунтов под земляным полотном. Отслоение откосной части земляного полотна развивалось до 8 цикла (см. рис. 6), с максимальной величиной раскрытия  $\Delta = 3$  мм, длиной  $L = 1200$  мм.



**Рисунок 6.** Отслоение откосной части земляного полотна от основания автомобильной дороги (рисунок выполнен авторами)

В период шестого цикла эксперимента в откосной части модели земляного полотна автомобильной дороги зафиксирована трещина (см. рис. 7), расположенная поперечно оси. Максимальная величина раскрытия трещины  $\Delta = 1$  мм, длина  $L = 100$  мм.



**Рисунок 7.** Трещины в откосной части земляного полотна автомобильной дороги (рисунок выполнен авторами)

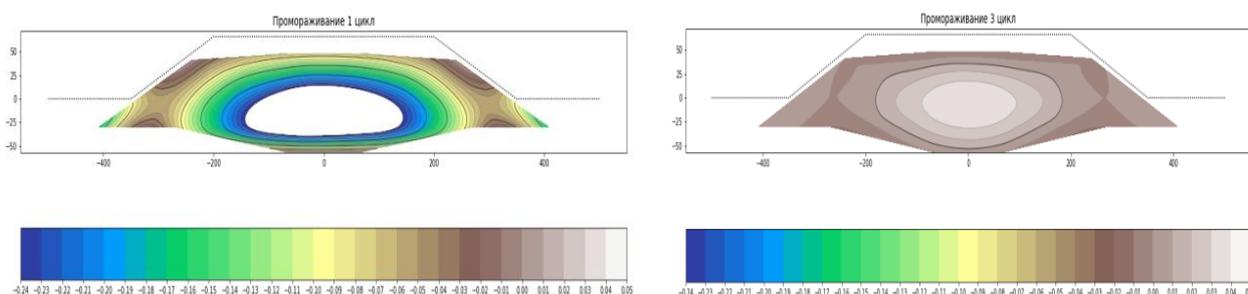
К окончанию эксперимента (15 цикл промораживания-оттаивания) на поверхности модели были зафиксированы продольные и поперечные трещины. Вид сверху земляного полотна экспериментальной модели представлен на рис. 8.



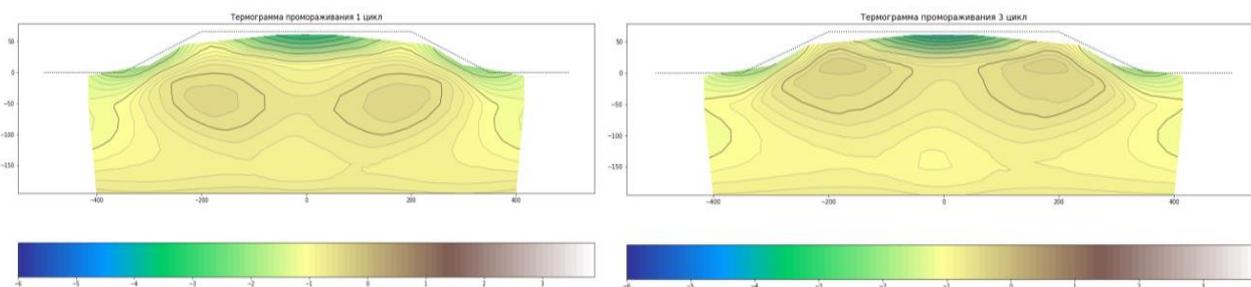
**Рисунок 8.** Вид сверху экспериментальной модели (рисунок выполнен авторами)

В результате проведенных экспериментальных исследований модели земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах были получены данные о развитии деформированного состояния земляного полотна и основания автомобильной дороги.

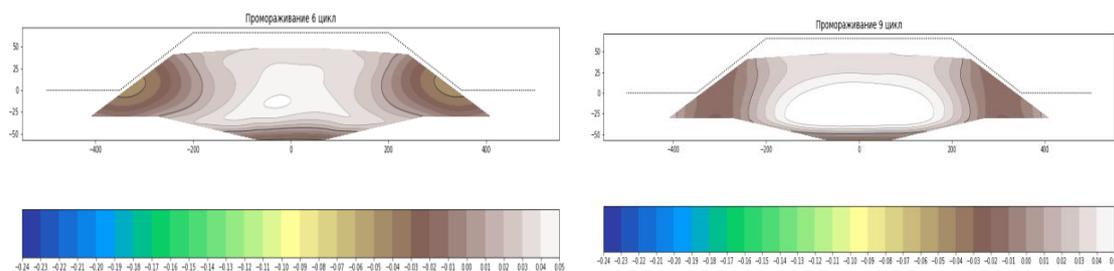
Для наглядного представления развития вертикальных перемещений модели земляного полотна и основания автомобильной дороги в программном комплексе «Питон» были построены изолинии распределения вертикальных перемещений при промораживании-оттаивании (рисунки 9, 11, 13, 15) [8], а также представлены термограммы изменения температуры в теле земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах, в период оттаивания и промораживания (рисунки 10, 12, 14, 16).



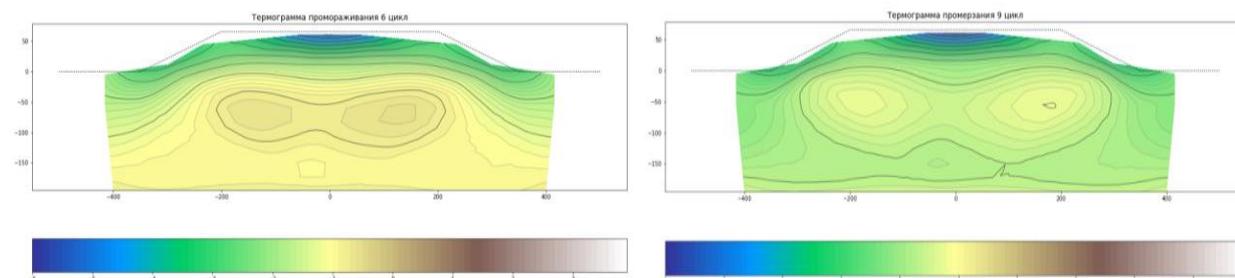
**Рисунок 9.** Изолинии вертикальных перемещений в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период промораживания, мм (рисунок выполнен авторами)



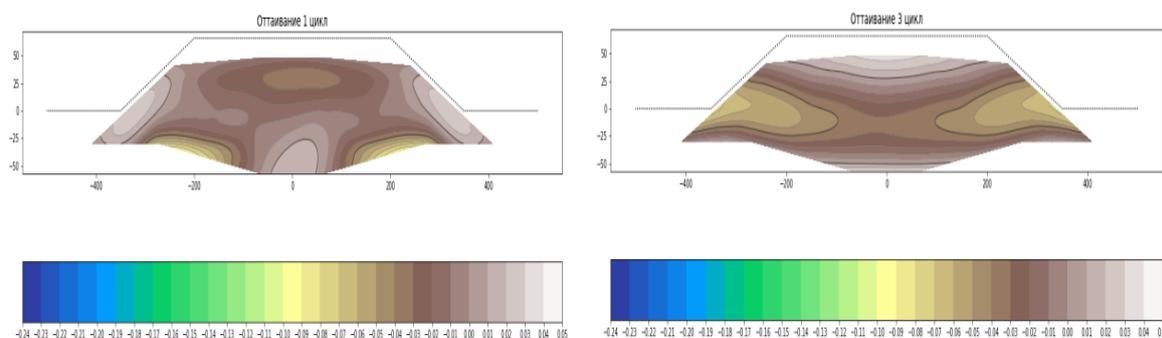
**Рисунок 10.** Термограмма изменения температуры в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период промораживания,  $C^{\circ}$  (рисунок выполнен авторами)



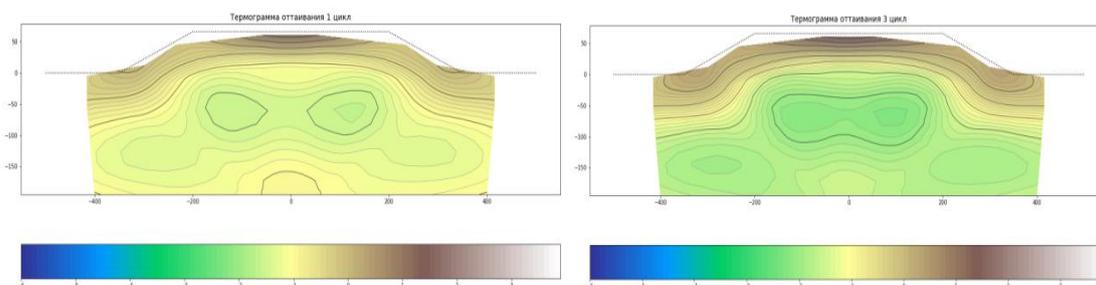
**Рисунок 11.** Изолинии вертикальных перемещений в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период промораживания, мм (рисунок выполнен авторами)



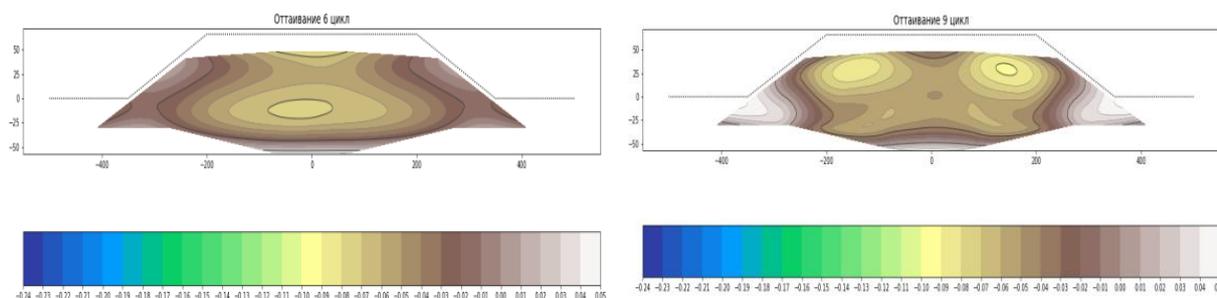
**Рисунок 12.** Термограмма изменения температуры в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период промораживания,  $C^{\circ}$  (рисунок выполнен авторами)



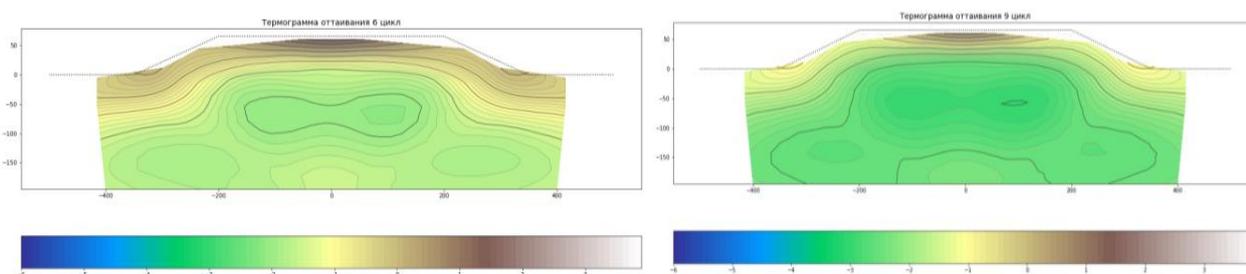
**Рисунок 13.** Изолинии вертикальных перемещений в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период оттаивания, мм (рисунок выполнен авторами)



**Рисунок 14.** Термограмма изменения температуры в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период оттаивания,  $^{\circ}\text{C}$  (рисунок выполнен авторами)



**Рисунок 15.** Изолинии вертикальных перемещений в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период оттаивания, мм (рисунок выполнен авторами)



**Рисунок 16.** Термограмма изменения температуры в модели тела земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в период оттаивания,  $^{\circ}\text{C}$  (рисунок выполнен авторами)

Вертикальные перемещения (рисунки 9, 11, 13, 15), зафиксированные вдоль оси сооружения и в откосной части земляного полотна, указывают на циклическое поднятие-опускание верхнего горизонта вечной мерзлоты. При каждом последующем цикле промораживания-оттаивания прослеживается формирование мерзлого ядра в теле земляного полотна, что характерно для автомобильных дорог в криолитозоне и хорошо согласуется с результатами наблюдений других авторов.

По результатам экспериментальных измерений температурного режима (рисунки 10, 12, 14, 16) модели земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах видно, что процесс оттаивания-промораживания конструкции земляного полотна быстрее происходит на поверхности и в откосной части сооружения, об этом свидетельствуют и данные изолинии перемещений.

Результаты измерений перемещений и температуры грунта в статье представлены за 10 циклов, так как с 10 по 15 цикл изменения величины температуры и деформации в модели

циклически повторяются, то есть земляное полотно и основание автомобильной дороги условно стабилизируются.

По результатам экспериментальных исследований деформированного состояния модели земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах можно сделать следующие выводы:

1. Проведение лабораторных экспериментов, моделирующих работу сооружений в сложных климатических и инженерно-геологических условиях, является экономически целесообразной доступной задачей, позволяющей исследовать и реализовать новые технические решения.
2. Для моделирования наиболее неблагоприятных условий эксплуатации сооружения необходимо реализовать в экспериментальном лотке открытую систему основания автомобильной дороги (обеспечить подток влаги) и выполнить моделирование снежного покрова.
3. Высокая скорость промораживания откосной части земляного полотна и придорожной полосы основания не согласуется с результатами натурных наблюдений и исследованиями других авторов, что указывает на необходимость моделирования снежного покрова при промораживании.
4. Работоспособность новых конструктивно-технических решений по стабилизации земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах предложено оценивать результатами численных экспериментов с последующим моделированием сооружения в лабораторных условиях с использованием критериев подобия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Краев Ал.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.
2. Шанхоев З.Ш., Краев Ал.Н. Анализ и причины разрушения автомобильных дорог 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. 206–213.
3. 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 // Транспортные сооружения, 2017 №4, <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09TS417.
4. 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.
5. Шанхоев З.Ш., Макаров А.С., Пермитина Т.В. Системы мониторинга автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах в рамках реализации проекта «Умные дороги» // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 5. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 335–337.
6. Маслов А.Д., Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Шполянская Н.А. Основы геоэкологии. Учебное пособие. Ухта, 2005.
7. Воронцов, В.В. Стабилизация критических деформаций земляного полотна автомобильной дороги в криолитозоне / В.В. Воронцов, Ал.Н. Краев, М.Е. Игошин // Вестник Сибирской Государственной Автомобильно-Дорожной Академии. – Омск: ФГБОУ ВПО «Сибирская Государственная Автомобильно-Дорожная Академия (СибАДИ)», 2014. – 67–72 с.
8. Игошин, М.Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния тела насыпи и деятельного слоя в основании дорожной конструкции с применением различных схем армирования геотекстилем / М.Е. Игошин, Ю.В. Огороднова, Ю.С. Корян, Т.В. Пермитина // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО, 2012. – 115–118 с.
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Учебное пособие. М.: Высш. шк., 1973. – 448 с.
10. Карлов В.Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений: дис. д-ра техн. наук. СПб., 1998.

**Kraev Alexey Nikolaevich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
E-mail: kraev\_aln@mail.ru

**Shankhoyev Zurab Shabazgireevich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
E-mail: zurab\_shankhoyev@mail.ru

## **Modeling the deformed state of the roadway on permafrost**

**Abstract.** For economic efficiency, the authors offer to conduct an experimental study of the deformed state of the sub-grade model on permafrost soils in the laboratory environment in a closed system (without a water flow) applying a geometric scale value of M 1:30 and time scale of M 1:900. The description of the research flume, which allows simulating not only the deformed state of the linear structure, but also the temperature regime, is given. During the study, the defects were photo-recorded and the deformations of the structure were measured. Distribution isolines of vertical movements while freezing-thawing were built in the software system "Python", a thermogram of temperature changes in the body of the roadbed and the base of the road is given. The main conclusions of the research are formulated.

**Keywords:** road; permafrost ground; numerical simulation; mound; freeze-thaw; roadbed; temperature condition

## REFERENCES

1. Kraev A.I.N., Permitina T.V. (2015). Metodika provedeniya laboratornogo issledovaniya avtomobil'noy dorogi na mnogoletnemerzlykh gruntakh. [*Methods of conducting laboratory studies of the highway on permafrost soils.*] Tyumen: Russian Innovation Education Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 64–72.
2. Shankhoyev Z.Sh., Kraev A.I.N. (2015). Analiz i prichiny razrusheniya avtomobil'nykh dorog na mnogoletnemerzlykh gruntakh. [*Analysis and causes of the destruction of roads on permafrost.*] Tyumen: Russian Innovation Education Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 206–213.
3. Makarov A.S., Kraev A.N., Tverdokhleby S.A., Shankhoyev Z.Sh. (2017). 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*, [online] 2017, 4(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/09TS417.
4. Makarov A.S., Shankhoyev Z.Sh., Zemerov I.V., Skvortsov D.S. (2017). Analiz masshtabnogo faktora pri modelirovanii avtomobil'noy dorogi na mnogoletnemerzlykh gruntakh. [*Analysis of the scale factor in the simulation of the road on permafrost.*] Tyumen: Tyumen Industrial University, pp. 256–259.
5. Shankhoyev Z.Sh., Makarov A.S., Permitina T.V. (2017). Sistemy monitoringa avtomobil'nykh dorog na mnogoletnemerzlykh gruntakh v ramkakh realizatsii proekta «Umnye dorogi». [*Monitoring systems of roads on permafrost in the framework of the project "Smart Roads".*] Tyumen: Tyumen Industrial University, pp. 335–337.
6. Maslov A.D., Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Shpolyanskaya N.A. (2005). Osnovy geokriologii. Uchebnoe posobie. [*Fundamentals of geocryology. Tutorial.*] Ukhta.
7. Vorontsov V.V., Kraev A.I.N., Igoshin M.E. (2014). Stabilizatsiya kriticheskikh deformatsiy zemlyanogo polotna avtomobil'noy dorogi v kriolitozone. [*Stabilization of critical deformations of the roadway in the cryolithozone.*] Omsk: Siberian State Automobile and Highway Academy, pp. 67–72.
8. Igoshin M.E., Ogorodnova Yu.V., Koroyan Yu.S., Permitina T.V. (2012). Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tela nasypi i deyatel'nogo sloya v osnovanii dorozhnoy konstruksii s primeneniem razlichnykh skhem armirovaniya geotekstilem. [*Numerical simulation of the stress-strain state of the body of the embankment and the active layer at the base of the road structure using various geotextile reinforcement schemes.*] Tyumen: Russian Innovation Education, pp. 115–118.
9. Tsytovich N.A. (2012). Sezonnopromerzayushchie grunty kak osnovaniya sooruzheniy. [*Mechanics of frozen soils. Tutorial.*] Moscow: High School, p. 448.
10. Karlov V.D. (1998). Mekhanika merzlykh gruntov. Uchebnoe posobie. [*Season-freezing soils as bases of structures.*] Saint Petersburg.