

СТАТЬИ

УДК 624.139.34(571.56)
DOI 10.17513/use.38454

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПИ АВТОДОРОГИ И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЯКУТИИ

¹Малышев А.В., ¹Тимофеев А.М., ¹Большев К.Н., ²Цеева А.Н.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутск, Российская Федерация, e-mail: k.bolshev@mail.ru;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация

С целью прогнозной оценки устойчивости и состояния насыпи, откосов и грунтового основания автомобильной дороги в условиях многолетнемерзлых грунтов была разработана и реализована математическая модель теплового взаимодействия асфальтовой автодороги с подстилающим грунтом и атмосферой. Модель учитывает фазовые переходы поровой влаги, сезонные колебания температуры воздуха, изменения скорости ветра, приток тепла за счет солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхности, влияние сезонного снегового покрова и его профиль в результате регулярной очистки автодороги от снега. В ходе моделирования для определения параметров модели и граничных условий были использованы как нормативные методики, так и альтернативные полуэмпирические выражения, что обеспечило устойчивость и адекватность модели. Реализация и решение модели проводилось в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics с применением метода конечных элементов. Полученные в результате математического моделирования прогнозные данные показывают постепенное охлаждение грунтов основания и насыпи и подтверждают ее стабильное мерзлое состояние на период эксплуатации при условии отсутствия влияющих на тепловой режим нештатных ситуаций (изменение грунтовых условий, переувлажнение и заболачивание территории, разрушение участка автодороги и прочие нарушения эксплуатации).

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, автодорога, насыпь, температурный режим, моделирование, основания

MODELING THE TEMPERATURE REGIME OF ROAD EMBANKMENT AND SOILS BASED ON PERMAFROST CONDITIONS IN YAKUTIA

¹Malyshev A.V., ¹Timofeev A.M., ¹Bolshev K.N., ²Tseeva A.N.

¹Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center

“Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North, Yakutsk,

Russian Federation, e-mail: k.bolshev@mail.ru;

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education

«Industrial University of Tyumen», Tyumen, Russian Federation

To predict the stability and condition of the embankment, slopes, and subgrade of a highway in permafrost conditions, a mathematical model of the thermal interaction of an asphalt road with the underlying soil and the atmosphere was developed and implemented. The model takes into account phase transitions of pore moisture, seasonal fluctuations in air temperature, changes in wind speed, heat gain from solar radiation, taking into account surface reflectivity, the impact of seasonal snow cover, and its profile resulting from regular snow removal. During the simulation, both standard methods and alternative semi-empirical expressions were used to determine the model parameters and boundary conditions, ensuring the model's robustness and adequacy. The model was implemented and solved in the Comsol Multiphysics simulation environment using the finite element method. The predictive data obtained as a result of mathematical modeling show a gradual cooling of the foundation and embankment soils and confirm its stable frozen state during the period of operation, provided that there are no abnormal situations affecting the thermal regime (changes in soil conditions, waterlogging and swamping of the territory, destruction of the road section and other operational disruptions).

Keywords: permafrost soils, highway, embankment, temperature regime, modeling, foundations

Введение

Для районов многолетнемерзлых грунтов вопросы сохранения мерзлого состояния и несущей способности грунтовых оснований инженерных сооружений всегда имеют особую важность. Актуально это

и для автомобильных дорог как для протяженных линейных объектов, проходящих через участки различных геологических и геокриологических условий. При этом основным определяющим критерием устойчивости является стабильный температур-

ный режим с сохранением мерзлого состояния грунтовых оснований. Во избежание дальнейших проблем с эксплуатацией сооружений необходимо выполнять численное моделирование теплового режима грунтового основания и прогнозную оценку его устойчивости [1].

Для прогнозной оценки состояния грунта основания, насыпи и откосов асфальтowej автодороги в среде численного мультифизического моделирования Comsol была разработана и реализована модель системы «автодорога – грунт – атмосфера», учитывающая фазовые переходы поровой влаги, сезонные колебания температуры воздуха, изменения скорости ветра, приток тепла за счет солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхностей, влияние сезонного снежного покрова и его про-

филь в результате регулярной очистки автодороги от снега.

Цель работы – дать прогнозную оценку состояния грунта основания асфальтowej автодороги на период ее эксплуатации в условиях многолетнемерзлых грунтов Якутии.

Материалы и методы исследования

Исследование температурного состояния грунтов оснований автодороги проводилось методами математического моделирования с решением методом конечных элементов.

Постановка математической модели переноса тепла в теле насыпи автодороги и грунтов оснований описывается уравнением теплопроводности с фазовыми переходами в спектре температур (1) с соответствующими начальным (2) и граничными условиями (3).

$$\left(C(T) + L\rho \frac{dW_{\text{HB}}(T)}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad x, y \in \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$T(x, y, 0) = T_0(y), \quad x, y \in \Omega \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_y \left(T_a(t) - T \Big|_{\Gamma_1} \right), \quad t > 0, \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Gamma_2} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_4} = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

где $C(T)$ и $\lambda(T)$ – соответственно, объемная теплоемкость, Дж/ (м³·°C) и теплопроводность строительных материалов, насыпи и грунтов оснований, Вт/(м·°C); L – скрытая теплота фазового перехода вода-лед, Дж/кг; ρ – плотность скелета дисперсного материала, кг/м³; $W_{\text{HB}}(T)$ – функция незамерзшей воды, кг/кг; $T_0(y)$ – начальный профиль температуры по глубине массива насыпи и грунтов оснований, °C; α_y – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $T_a(t)$ – температура атмосферного воздуха, °C.

Постановка такой задачи теплопроводности для промерзающих-протаивающих влажных дисперсных материалов, коими являются дорожная полотно, насыпь и грунты основания, отличается от традиционной постановки задачи Стефана [2, с. 358] тем, что вместо дельта-функции Дирака, характеризующей интенсивность фазовых переходов в объемной теплоемкости, стоит производная от функции незамерзшей воды

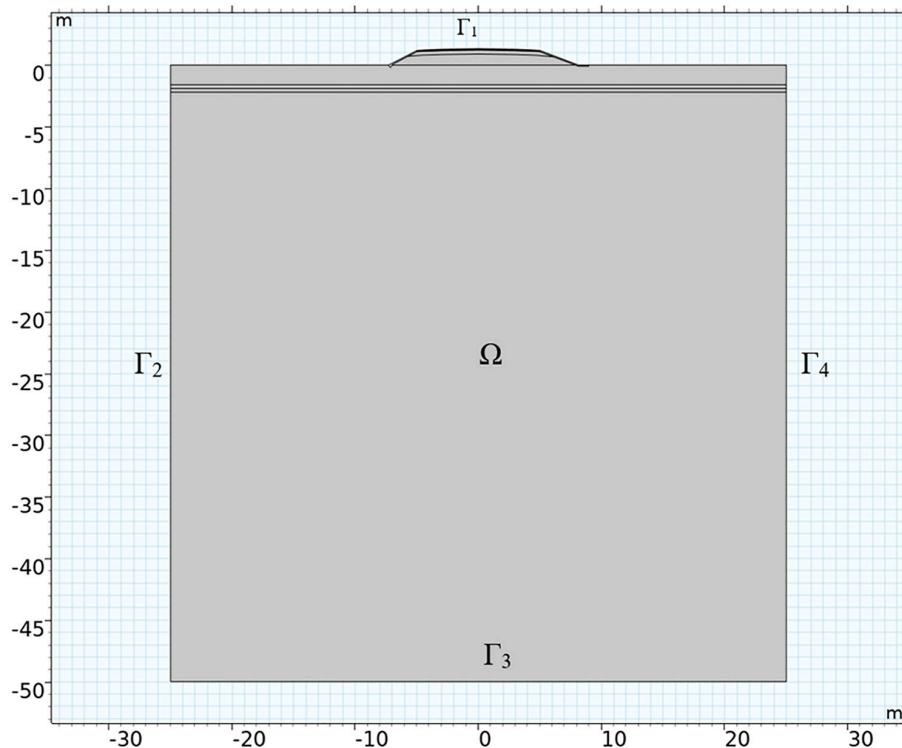
по температуре. Таким образом, производится «естественное сглаживание» функций теплопроводности и объемной теплоемкости влажных дисперсных материалов.

Область Ω с соответствующими границами от Γ_1 до Γ_4 , в которой отыскивается решение поставленной задачи, имеет следующий вид (рис. 1).

Как видно, входящие в уравнение теплопроводности коэффициенты представляют собой теплофизические свойства отдельных слоев, слагающих дорожное полотно, насыпь и грунты основания, которые зависят от температуры. Объемная теплоемкость в случае промерзания или протаивания становится эффективной и содержит скрытую теплоту фазового превращения воды в лед. Данная задача нелинейна из-за зависимости теплофизических свойств дисперсных грунтов от температуры и наличия фазовых переходов, происходящих в спектре температур, поэтому решение такой задачи возможно получить только численно. Для

решения нелинейной задачи теплопроводности можно применить метод конечных разностей или метод конечных элементов. Последний в данном случае будет эфек-

тивным, так как область, где отыскивается температурное поле, представляет собой сложную геометрию, при дискретизации которой получаются нерегулярные узлы.



*Рис. 1. Расчетная область
Примечание: сформировано авторами по результатам данного исследования*

Таблица 1

Физические и теплофизические свойства материалов дорожного покрытия, насыпи и грунтов основания (г. Якутск)

Вид слоя	$L, \text{м}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$W, \text{д.е.}$	$I_p, \text{д.е.}$	$W_p, \text{д.е.}$	$\lambda_{th}, W/(m*K)$	$\lambda_f, W/(m^2*K)$	$C_{th} \cdot 10^6, J/(m^3*K)$	$C_f \cdot 10^6, J/(m^3*K)$	$T_b, ^\circ\text{C}$
Асфальтобетон плотный	0,05	2400	-	-	-	1,4	1,4	3,12	3,12	-
Асфальтобетон пористый	0,07	2300	-	-	-	1,25	1,25	3,22	3,22	-
Щебень	0,31	1800	0,05	-	-	1,39	1,48	2,4	2,22	0,0
Грунт земляного полотна (песок средней крупности)	0,9	1550	0,22	-	-	2,14	2,38	2,85	2,15	-0,6
Суглинок легкий пылеватый, засоленный	1,6	1370	0,31	0,09	0,25	1,48	1,59	3,07	2,2	-1,0
Песок мелкий, засоленный	0,6	1460	0,25	-	-	2,09	2,32	2,87	2,14	-0,5 (-0,24)
Песок средней крупности	11,9	1520	0,23	-	-	2,13	2,37	2,86	2,15	-0,12

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования, а также источника [5].

Поставленная задача решалась методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics. Выбор этого программного пакета обусловлен его широкими возможностями, в первую очередь гибкостью задания вида уравнения переноса тепла, граничных условий, возможностью настройки и реализации различного уровня сложности математических функций, а также задания пользователем своих уравнений или их систем. Сравнение COMSOL Multiphysics с альтернативными программными приложениями для моделирования методом конечных элементов показывает, что оно ни в чем им не уступает, и более того, обладает определенными преимуществами [3; 4].

Теплофизические свойства слоев, слагающих дорожное полотно, насыпь и грунты основания, определялись по справочным таблицам для строительных материалов и из СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [5]. В этом своде правил приводятся формулы для определения температуры начала замерзания грунтов, расчета засоленности, объемных теплоемкостей в талом и мерзлом состояниях, а также таблицы и формулы для теплопроводностей в этих же состояниях. Для учета фазовых превращений поровой воды в лед и обратно в этом же своде имеются таблицы и формула для расчета количества незамерзшей воды. При построении функции незамерзшей воды на основе расчетных значений количества незамерзшей воды от температуры применялась аппроксимация, предложенная в работе [6, с. 18; 7, с. 41]. Основные данные по структуре грунта для модели взяты из таблиц инженерных изысканий и приведены в таблице 1.

В граничное условие (3) теплообмена с атмосферным воздухом входит темпера-

тура воздуха в зависимости от времени. Данная величина должна иметь поправку на температуру за счет воздействия солнечной радиации. Оценка среднемесячной температуры поверхности дорожной насыпи производилась с привлечением нормативных документов СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требование к инженерной подготовке территории» [8] и СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты» [9]. Для естественной поверхности грунта воздействие солнечной радиации согласно [9], п. 7, приложение А

$$T(t) = T_a(t) + \Delta T_r + \Delta T_e, \quad (5)$$

где $T_a(t)$ – среднемесячная температура атмосферного воздуха, приведенная в таблице 2, ΔT_r и ΔT_e – поправки на теплообмен за счет солнечной радиации и испарения, °C.

$$\Delta T_r = \frac{R(t)}{\alpha}, \quad \Delta T_e = k \cdot T_r, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C); $R(t)$ – радиационный баланс различных поверхностей, Вт/м²; k – коэффициент, учитывающий характер поверхности. В первом приближении равный для естественной поверхности – 0,8, а для оголенной – 0,3.

Для определения коэффициента теплообмена в зависимости от скорости ветра использовалась широко применяемая формула Юргенса [10; 11]:

$$\alpha = \begin{cases} 6.16 + 4.19v, & 0 \leq v \leq 5 \\ 7.56v^{0.78}, & v > 5 \end{cases} \quad (7)$$

Радиационный баланс для различных поверхностей регламентируется в п. 5.2.13 СП 498.1325800.2020 [12].

Таблица 2

Климат (среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра и солнечной радиации) (г. Якутск)

Параметр	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
T_a , °C	-39,1	-34,6	-20,3	-4,7	7,5	16,2
v , м/с	1,1	1,1	1,7	2,6	3,1	2,9
Q_c , Вт/м ²	12,69	47,12	122,83	196,37	220,65	253,86
Параметр	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
T_a , °C	19,3	15,2	5,9	-7,8	-27,8	-37,8
v , м/с	2,6	2,5	2,4	2,2	1,6	1,1
Q_c , Вт/м ²	234,09	175,10	109,18	52,64	20,83	6,72

Примечание: составлено авторами на основе источника [12].

Таблица 3

Высота и средняя плотность снежного покрова (г. Якутск)

Параметр	Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
H_s , м	0,01	0,05	0,08	0,10	0,19	0,19	0,19	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24
ρ_s , г/см ³	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
Параметр	Февраль			Март			Апрель					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
H_s , м	0,25	0,25	0,25	0,26	0,24	0,24	0,18	0,18	—			
ρ_s , г/см ³	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,22	0,20	—			

Примечание: составлено авторами на основе источника [12].

Таблица 4

Полевые данные замеров температур по глубине (15 мая 2023 г.)

z , м	1	2	3	4	5	6	7
T_0 , °C	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
z , м	8	9	10	11	12	13	14
T_0 , °C	-0.9	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-1.2

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Так, для песчаных, щебеночных и асфальтовых поверхностей $R(t)$ определяется по формуле:

$$R(t) = 0,61Q_c(t) - 20, \quad (8)$$

а для бетонных и железобетонных поверхностей:

$$R(t) = 0,61Q_c(t) - 40, \quad (9)$$

где $Q_c(t)$ – суммарная солнечная радиация, приведенная в таблице 2 и определяемая согласно документу СП 131.13330 «Строительная климатология» [12].

В модели предполагается, что поверхность асфальта в зимний период не имеет снежного покрова, поэтому температурные поправки учитываются на все месяцы, остальные поверхности, такие как естественный грунт и оба откоса дорожной насыпи, поправки на температуру воздуха, учитываются только с мая по октябрь.

Коэффициент теплопередачи от холодного воздуха к поверхности снежного покрова через его толщу к поверхности грунта или поверхности насыпи, как в работах [13; 14], определяется по формуле:

$$\alpha_y = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h_s}{\lambda_s} \right)}, \quad (10)$$

где h_s – высота снежного покрова, приведенная в таблице 3 и определяемая по данным

ближайшей станции по метеонаблюдениям, m ; λ_s – теплопроводность снега, Вт/(м·°C).

Теплопроводность снежного покрова рассчитывалась по формуле, предложенной Б.В. Проскуряковым [15]:

$$\lambda_s = 0,02093 + 1,01_s, \quad (11)$$

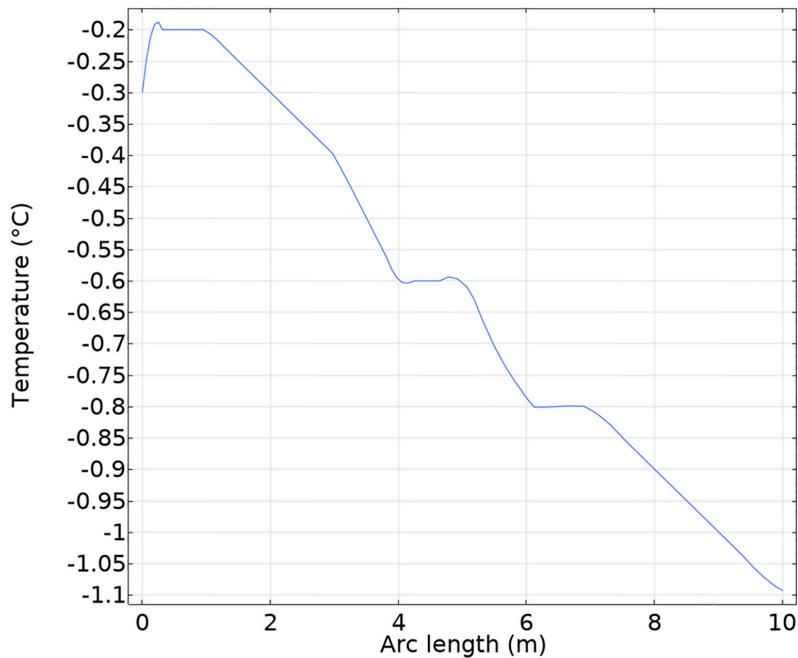
где s – плотность снега, значения приводятся в таблице 3.

Замеры начального профиля температур слоев грунтового массива проводятся изыскательской организацией. Для этого проводится обустройство температурной скважины глубиной до 15 м, путем бурения и далее установки термотрубки с размещением в ней термокос из датчиков температур (логгеров). Замер температур по глубине проводится с шагом в 1 метр. Данные по начальному распределению температуры по глубине массива приведены в таблице 4.

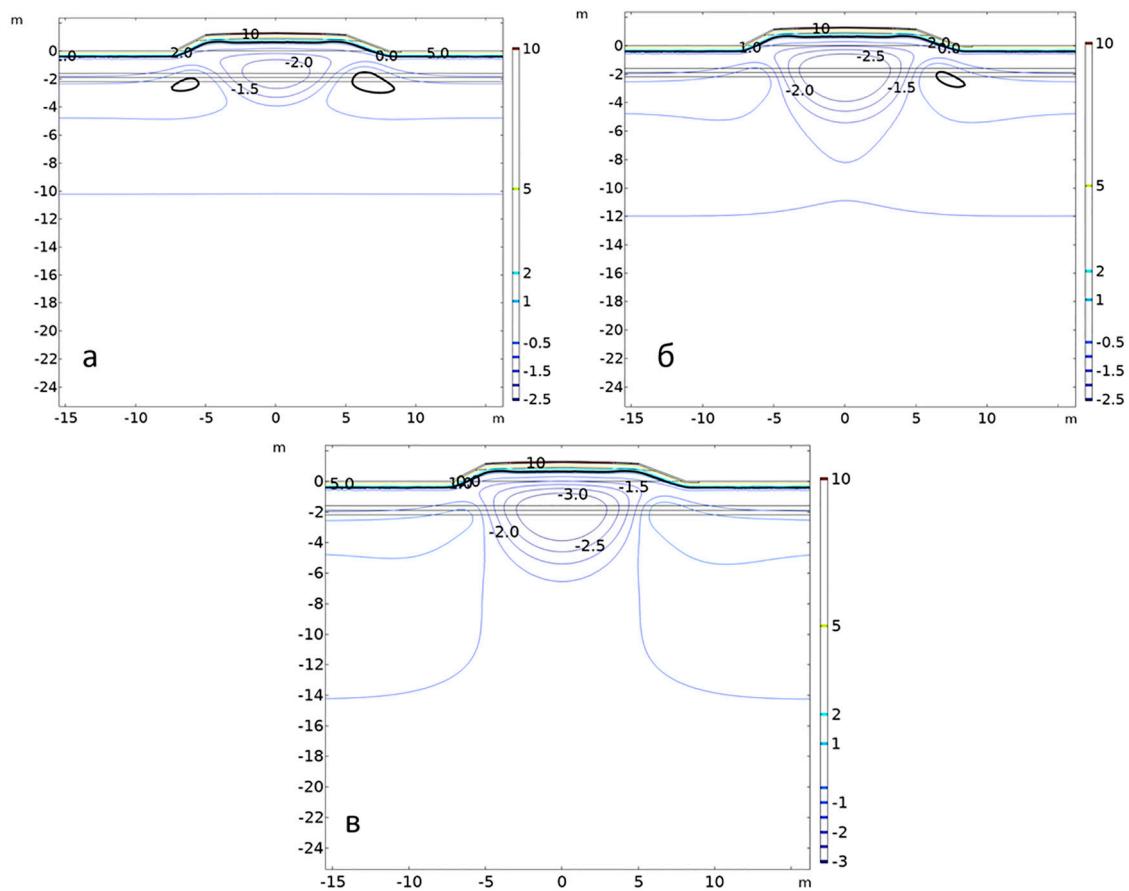
Результаты исследования и их обсуждение

В результате численного моделирования получены прогнозные значения температур автодорожного полотна насыпи и грунтов оснований за счет теплообмена с наружным атмосферным воздухом для различных моментов времени.

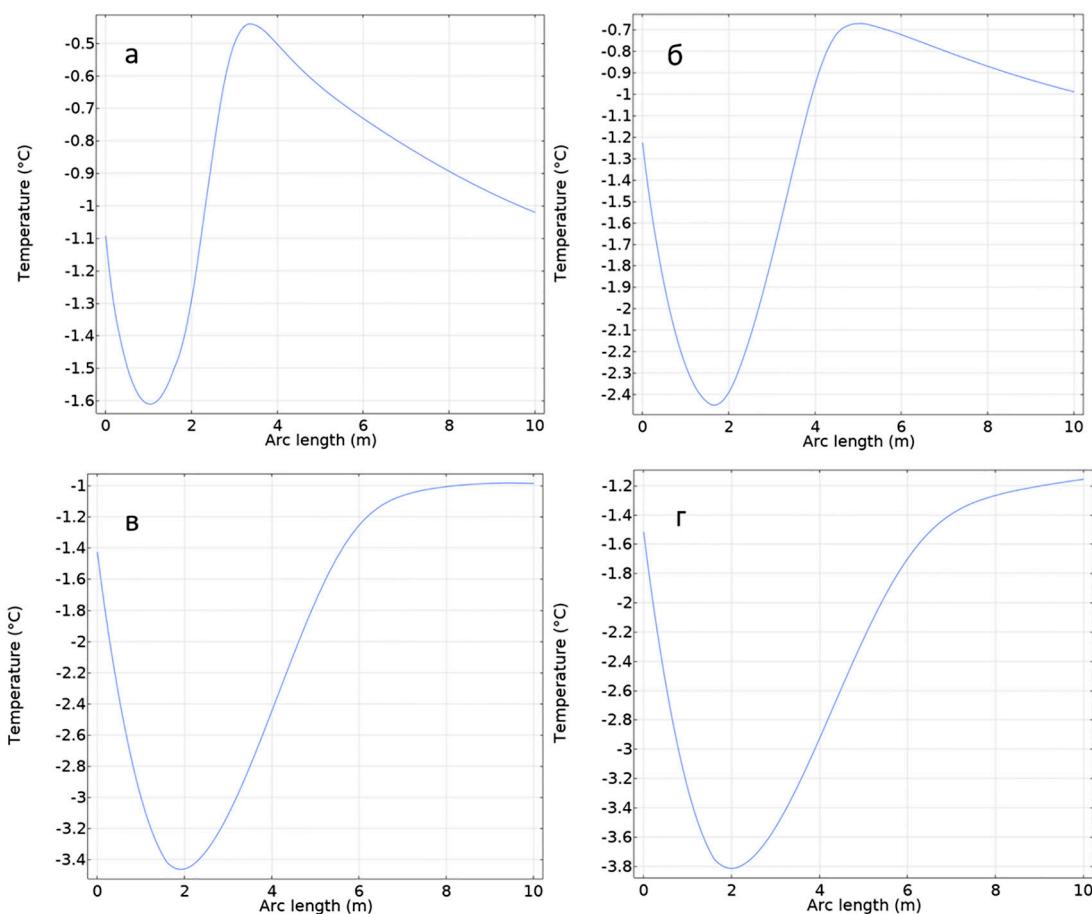
Распределение температур по глубине массива в начальный момент времени (рис. 2) имело растянутый характер из-за возведения насыпи в зимний период.



*Рис. 2. Профиль распределения температуры по глубине на начальный момент времени (15.05.2023 г.)
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования*



*Рис. 3. Конфигурации изотерм: а) через 2 года; б) через 5 лет; в) через 10 лет
Жирной черной линией обозначены нулевые изотермы
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования*



*Рис. 4. Профили распределения температуры по глубине:
а) через 1 год; б) через 2 года; в) через 5 лет; г) через 10 лет
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования*

Анализ полученных изотерм (рис. 3) показывает, что после первого расчетного года формируется ядро промерзания под насыпью с постепенным понижением температур в последующие годы.

Характер распределения температур по глубине массива, начиная с первого расчетного года, изменяется в сторону отрицательных значений (рис. 4).

Температура на глубине нулевых амплитуд (10 м) в начале расчетов немного повышается, за первые три года достигая $-0,96^{\circ}\text{C}$, а затем в последующие годы уменьшается, доходя до значения $-1,15^{\circ}\text{C}$ на десятом году. Повышение температуры на начальном периоде объясняется отложенным влиянием растепления верхних слоев грунта в процессе строительных работ.

Все графики распределения температур представлены для середины мая, т.к. исходная точка моделирования – 15 мая 2023 года. При этом минимум температуры в середине

мая смещается с глубины 1 метр со значением $-1,6^{\circ}\text{C}$ в первый год на глубину 2 метра со значением $-3,8^{\circ}\text{C}$ через 10 лет.

Полученный характер изменения температурного режима грунта после строительства автодороги с понижением значений температуры – следствие изменения профиля грунта с обустройством насыпи, а также регулярной расчистки с поверхности автодороги снегового покрова, имеющего теплоизолирующие свойства для подстилающих поверхностей.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и реализована математическая модель, позволяющая осуществлять прогнозный расчет температурного режима автодороги с учетом фазовых переходов поровой влаги, сезонных колебаний температуры воздуха, изменения скорости ветра, притока тепла к поверхности за счет

солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхностей, влияния сезонного снегового покрова и его профиля в результате регулярной очистки автодороги от снега.

Результаты проведенного численного моделирования дают прогнозную оценку на постепенное охлаждение и стабильное мерзлое состояние грунтового основания и насыпи автомобильной дороги на период эксплуатации в 10 лет при условии отсутствия влияющих на тепловой режим нештатных ситуаций (изменение грунтовых условий, переувлажнение и заболачивание территории, разрушение участка автодороги и прочие нарушения эксплуатации).

Список литературы

1. Степанов С.П., Цеева А.Н., Васильев В.И., Сирдит И.К. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 1. С. 142–159. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28376474> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-142-159.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 782 с. URL: <https://elibrary.ru/QJVMAV> (дата обращения: 08.09.2025). ISBN: 978-5-397-00761-0.
3. Шабанов А.С., Нейман В.Ю. Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 5 (13). С. 96-100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30363053> (дата обращения: 08.09.2025).
4. Токтаров Д.Д., Ильясова З.А., Березовская И.Э., Габитова З.Х. Компьютерное моделирование для изучения физических процессов // Universum: технические науки. 2022. № 4-1 (97). С. 64-68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48507421> (дата обращения: 08.09.2025).
5. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Дата принятия: 30.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/> (дата обращения: 08.09.2025).
6. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 86 с. URL: <https://ntrs.ru/open/7237> (дата обращения: 08.09.2025) ISBN: 5-02-029664-3.
7. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов / Отв. ред. И.И. Рожин. Новосибирск: СО РАН, 2023. 160 с. <https://ntrs.ru/open/105982> (дата обращения: 08.09.2025). ISBN: 978-5-6048539-7-2.
8. СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории» Дата принятия: 30.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/120037/> (дата обращения: 08.09.2025).
9. СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования» Дата принятия: 04.02.2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/18767/> (дата обращения: 08.09.2025).
10. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Киселев В.В., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование формирования искусственного ледяного массива методом факельного намораживания на дне отработанного карьера криолитозоны // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2022. Т. 9. № 2. С. 53-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54799238> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.15372/FPVGN2022090208.
11. Грибовский Г.В. Шупляков М.Ю. Обзор методик по определению коэффициента теплообмена для различных поверхностей в условиях // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 года / Под ред. Р.Г. Мотенко. М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 595–599. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49415774&selid=49415882> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.
12. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99 Строительная климатология». Дата принятия: 20.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/82b/SP-131.pdf> (дата обращения: 08.09.2025).
13. Семенова Н.П., Малышев А.В., Тимофеев А.М., Большев К.Н. Математическая модель температурного режима в основании здания с плитным фундаментом на уплотненном трамбованием сезоннооттаивающим слое // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 4. С. 34-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54896350> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.1007/s11204-023-09906-y.
14. Малышев А.В., Васильев С.С., Пермяков П.П., Большев К.Н. Моделирование теплового взаимодействия системы трубопроводов центрального хладоснабжения с мерзлым грунтом // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50089421> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.17513/use.37966.
15. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 3. С. 60-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29234635> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.