

Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна

Д.А. Ковенькин✉, Д.Н. Насников, И.С. Чернецкая

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

В ходе исследования был проведен теплотехнический расчет трех вариантов проектных решений по стабилизации деформаций земляного полотна, расположенного на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов на участках Байкало-Амурской магистрали. Расчет проводился с применением программного комплекса Frost 3D Universal. Проведено сравнение расчетных температур с фактическими температурами, зафиксированными в первый год эксплуатации. Данные фактических температур представлены по результатам наблюдений Новочарской дистанции пути. Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с данными наблюдений, при этом имеется разница 0,1–0,5 °С в сторону более низких температур. В связи с этим можно сделать вывод, что программный комплекс Frost 3D Universal может с достаточно высокой эффективностью использоваться для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна. Изучены проблемы и способы стабилизации деформаций земляного полотна на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов, разработаны проектные решения по стабилизации таких деформаций. В проекте рассмотрены три основных варианта, которые применяются на Байкало-Амурской магистрали: скальная наброска, сезоннодействующие охлаждающие установки и солнцезащитный навес. Применение этих проектных решений будет способствовать сохранению и восстановлению мерзлого состояния грунтов в основании земляного полотна. Общий вывод по данной работе можно сделать следующий: каждая конструкция применима в условиях вечной мерзлоты на участках Байкало-Амурской магистрали.

Ключевые слова

теплотехнический расчет, программный комплекс Frost 3D Universal, стабилизация, земляное полотно, вечная мерзлота, проектные решения

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна / Д.А. Ковенькин, Д.Н. Насников, И.С. Чернецкая // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.09.2022 г.; принята к публикации: 27.09.2022 г.

Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed

D.A. Kovenkin✉, D.N. Nasnikov, I.S. Chernetskaya

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

In the course of this work, a thermal engineering calculation was carried out of three variants of design solutions for stabilizing the deformations of the roadbed located on thawing foundations of permafrost soils on sections of the Baikal-Amur mainline. The calculation was carried out using the Frost 3D Universal software package. The calculated temperatures are compared with the actual temperatures in the 1st year of operation. The data of actual temperatures are presented based on the results of observations of the Novocharsky distance of the path. The calculations showed a fairly good convergence with the observational data, with a difference of 0,1–0,5 °C towards lower temperatures. In this regard, it can be concluded that the use of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed can be used with sufficiently high efficiency. The problems and methods of stabilizing the deformations of the roadbed on thawing bases of permafrost soils have been studied. Constructive solutions have been developed to stabilize the deformations of the roadway on thawing bases from permafrost soils. The project considers the main three options that are used on the Baikal-Amur mainline: a rock outline, seasonal cooling units and a sunshade canopy. The application of these design solutions will contribute to the preservation and restoration of the frozen state of the soil at the base of the roadbed. The general conclusion from this work can be made as follows: each design is applicable in permafrost conditions on sections of the Baikal-Amur mainline.

Keywords

thermal engineering calculation, software package Frost 3D, stabilization, roadbed, permafrost, design solutions

For citation

Koven'kin D.A., Nasnikov D.N., Chernetskaya I.S. Primenenie programmno kompleksa Frost 3D dlya provedeniya teplotekhnicheskikh raschetov zemlyanogo polotna [Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal calculations of the roadbed]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 80–90. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

Article info

Received: July 25, 2022; Revised: September 26, 2022; Accepted: September 27, 2022.

Введение

Существенная часть железнодорожного пути Восточного полигона расположена в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Железные дороги в этой зоне характеризуются самой повышенной деформативностью земляного полотна в сравнении с остальной сетью.

Актуальность проблемы обусловлена тем, что на значительном протяжении (более 1 000 км) существующих железных дорог Забайкалья, Байкало-Амурской магистрали, расположенных на высокотемпературных вечномерзлых грунтах, проявляются часто неравномерные и недопустимые искажения продольного профиля и плана линии, негативно влияющие на безопасность и бесперебойность движения поездов [1–11].

При проектировании различных конструкций и сооружений в условиях распространения ММГ проведение теплотехнических расчетов является обязательным условием. Из всех грунтов оснований ММГ наиболее чувствительны к изменению температурного режима и предрасположены к таким опасным процессам, как термокарст, морозное пучение, термоденудация (солюфикация, термоэрозия) и наледеобразование.

Использованию результатов инженерных изысканий при теплотехнических расчетах ММГ способствует программное обеспечение, которое позволяет учитывать метеоданные и литологию, теплофизические и гидрогеологические свойства грунта, строить графики содержания незамерзшей воды (как функции температуры). Примером такого программного обеспечения является программный комплекс Frost 3D Universal, разработанный ООО «Симмэйкер».

Назначение программного комплекса Frost 3D

Одной из основных задач при проектировании сооружений является обоснованное

определение принципа использования многолетнемерзлых грунтов. Возможно как сохранение мерзлого состояния грунтов (I принцип), так и использование оснований в талом состоянии (II принцип) [12]. Выбор принципа осуществляется по результатам геокриологического прогноза – теплотехнического прогноза, учитывающего множество факторов, таких как строение грунта, температура каждого инженерно-геологического элемента до начала строительства, метеорологические условия, тепловое воздействие от сооружений в период эксплуатации. При проведении таких прогнозных расчетов в условиях вечной мерзлоты одной из важных задач является определение трехмерного теплового состояния грунтов в процессе эксплуатации сооружения, так как от того, будут ли грунты находиться в мерзлом или талом состоянии, зависит устойчивость и надежность сооружения.

Frost 3D – программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учетом влияния внешних тепловых воздействий. Он позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММГ в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, зданий, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта.

Математическая модель

Расчет нестационарной задачи распространения тепла в трехмерном пространстве [13] в программе Frost 3D основан на широко апробированном уравнении теплопроводности (1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции:

$$\left(C(T) + \rho_b L \frac{\partial w_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} +$$
(1)

$$+ \nabla(-\lambda(T)\nabla T) + C_w u \nabla T = 0,$$

где T – температура, °C; $C(T)$ – зависимость

объемной теплоемкости грунта от температуры, Дж/(м³·°C); $w_w(T)$ – зависимость количества незамерзшей воды в грунте от температуры, д. е.; ρ_b – плотность грунта, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; t – время, с; $\lambda(T)$ – зависимость теплопроводности грунта от температуры, Вт/(м·°C); C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·°C); u – вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с; ∇T – градиент температуры, °C.

Для всех имеющихся в моделируемой области материалов и сезоннодействующих охлаждающих устройств необходимо задать соответствующие физические свойства. Также для всех используемых в модели условий теплообмена необходимо определить параметры граничных условий. В программном комплексе доступно задание следующих граничных условий:

1. Граничное условие первого рода (2) – задается зависимость температуры от времени:

$$T = T_{ext}(t). \quad (2)$$

2. Граничное условие второго рода (3), где необходимо задать зависимость теплового потока от времени:

$$n(\lambda \nabla T) = q_0(t). \quad (3)$$

3. Граничное условие третьего рода (теплообмен по Ньютону) (4), где необходимо задать зависимость температуры, коэффициента теплообмена, а также при необходимости дополнительного теплового потока от времени:

$$n(\lambda \nabla T) = \alpha(t)(T_{ext}(t) - T) + q_0(t), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C); T_{ext} – температура внешней среды, °C; T – температура грунта, °C; q_0 – тепловой поток, Вт/м²; t – время, с.

4. Граничное условие четвертого рода с учетом теплообмена излучением (теплообмен по Стефану – Больцману) (5), где по сравнению с граничным условием третьего рода есть возможность учесть влияние теплообмена путем теплового излучения на основании закона Стефана – Больцмана:

$$n(\lambda \nabla T) = \varepsilon \sigma (273,15 + T_{amb}(t))^4 - (273,15 + T_{amb})^4 + \alpha(t) \cdot (T_{ext}(t) - T) + q_0(t). \quad (5)$$

где T_{amb} – температура источника теплового излучения, °C; σ – постоянная Стефана – Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); ε – степень черноты поверхности.

Моделирование фильтрации грунтовых вод в программе Frost 3D основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунто-

вых вод (6), выведенном из закона Дарси [14]:

$$\nabla(-K \nabla H) = 0, \quad (6)$$

откуда вектор скорости фильтрации воды в грунте вычисляется по формуле (7):

$$u = -K \nabla H, \quad (7)$$

где H – гидравлический напор, м; K – коэффициент фильтрации, м/с; u – вектор скорости фильтрации воды; ∇H – градиент гидравлического напора, м.

В качестве гидрологического граничного условия доступно следующее: величина гидравлического напора, которая вычисляется по формуле (8):

$$H = H_{ext}(t), \quad (8)$$

где H_{ext} – скорость втекающего потока, м/с.

Решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [15]. Конечно-разностный метод является сеточным методом, т. е. расчетная область дискретизируется прямоугольной сеткой, а решение происходит непосредственно в узлах сетки. Для каждого узла сетки составляется разностное уравнение в соответствии с используемым шаблоном разностной схемы. Получается система линейных уравнений, решение которой позволяет получить необходимый результат в рассматриваемой расчетной области.

Проектные решения для проведения теплотехнического расчета

Для проведения теплотехнического расчета были разработаны проектные решения основных мероприятий по стабилизации деформаций земляного полотна, расположенного на протаивающих основаниях из многолетнемерзлых грунтов на участках Байкало-Амурской магистрали. К таковым можно отнести скальную охлаждающую наброску, сезоннодействующие охлаждающие устройства и солнцезащитный навес. Участок проектирования расположен на 1 841 км перегона Олонгдо – Хани Восточно-Сибирской железной дороги. Основным фактором, определяющим режим подземных вод данной территории, является многолетняя мерзлота, имеющая повсеместное распространение. Существенным источником питания служат атмосферные осадки, а в меньшей степени – оттаивающие верхние слои мерзлоты.

Насыпь проектировалась высотой 5 м. Откос насыпи с уклоном 1:1,5. Многолетне-

мерзлые грунты представлены в виде галечникового грунта с песчаным наполнителем, песка и суглинка.

Скальная наброска проектировалась в виде каменной наброски на откосах из скального грунта фракцией от 200 до 500 мм с предварительным рыхлением откоса (ширина 2 м). Для повышения надежности работы устраиваются местные возвышения (туры), которые обеспечивают проникновения холодного воздуха в поры камня (рис. 1).

Сезоннодействующие охлаждающие конструкции сооружаются с применением тепловых труб, заполненных хладагентом. Установка представляет собой трубу диаметром 50 мм с

заглушенным нижним торцом и крышкой в верхней части, имеющей запорно-зарядную арматуру. Запорно-зарядная арматура предназначена для пневматических испытаний установки на герметичность, ее вакуумирование, зарядки хладагентом, а также манометрического контроля в процессе эксплуатации. Выполняется в виде вентилей, располагаемых на конденсаторе в месте, удобном для зарядки и проверки. Диаметр вентилей должен составлять 6–10 мм. Длина установок принималась исходя из того, чтобы они были заглублены в мерзлые грунты на глубину 2 м. Установки располагались в плане в шахматном порядке с расстоянием между рядами 2 м (рис. 2).

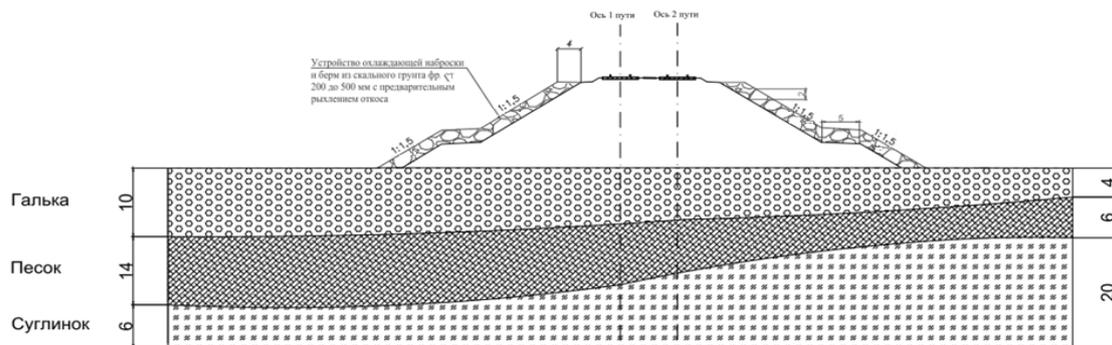


Рис. 1. Проект скальной наброски
Fig. 1. The project of strengthening the slope with a stone

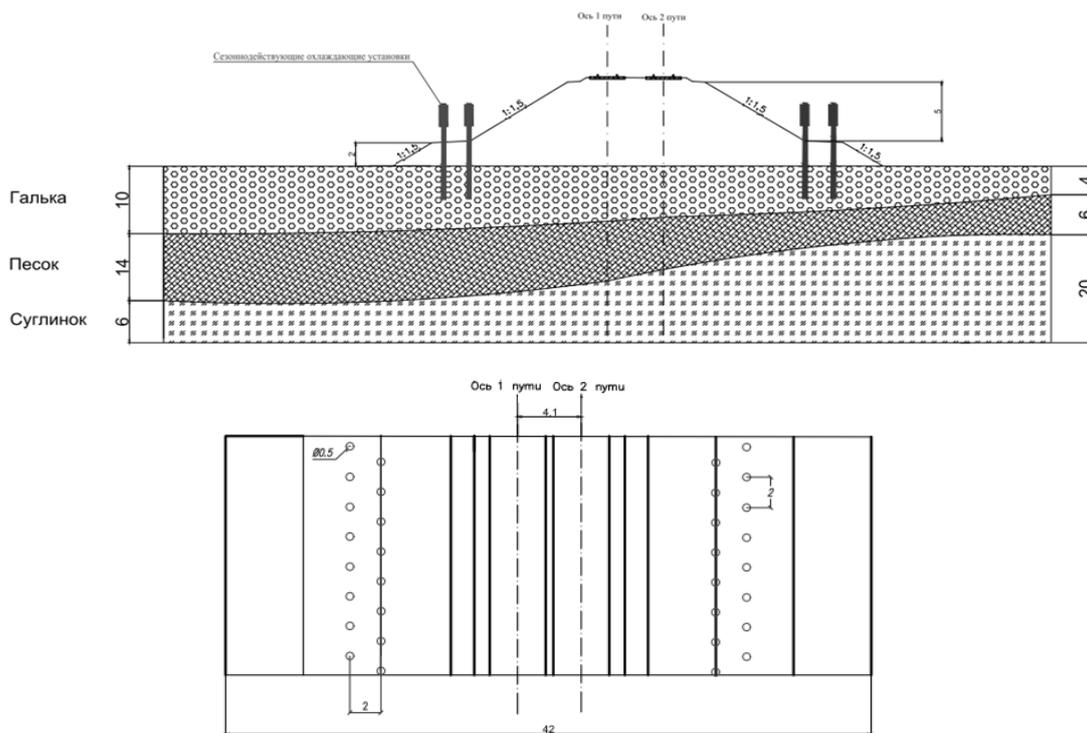


Рис. 2. Проект сезоннодействующих охлаждающих установок
Fig. 2. The project of seasonal cooling units

Солнцезащитный навес устраивается таким образом, чтобы под снежным покровом у поверхности откоса насыпи создавалась воздушная полость, в которую имелся бы доступ для холодного наружного воздуха. Навес состоит из следующих конструктивных элементов: кровля навеса; продольные уголки, располагаемые на кровле навеса; обрешетка, к которой крепится кровля навеса; уголок поперечный, для крепления к нему обрешетки; продольные балки, для крепления к ним поперечных уголков; стойки, опорные части навеса; подставки под стойки; защитные теплоизоляционные экраны, устанавливаемые в верхней и нижней части навеса, а также с его торцевых сторон.

Высота полости применяется в проекте 3 м, ширина равна 5 м. Вентиляционные стояки устраиваются периодически по длине покрытия

вдоль пути с шагом не более 10 м. Для усиления защиты от нагрева в летнее время в верхней части полости размещается слой теплоизоляции из профнастила (рис. 3).

Многолетние средние значения температур воздуха и высоты снежного покрова взяты по новым климатическим нормам (данные геофизической станции г. Иркутска за период 1971–2000 гг.): $T_{\text{воздуха ср. год.}} = -7,4 \text{ } ^\circ\text{C}$; $h_{\text{снега}} = 0,22 \text{ м}$ при плотности $0,17 \text{ г/см}^3$. В табл. 1 представлены природно-климатические условия метеостанции Чара, в табл. 2 – теплофизические свойства грунтов.

Прогноз эффективности действия – 5 лет.

Результаты расчета

Результаты теплотехнических расчетов с применением программного комплекса Frost 3D представлены в виде изоповерхностей тем-

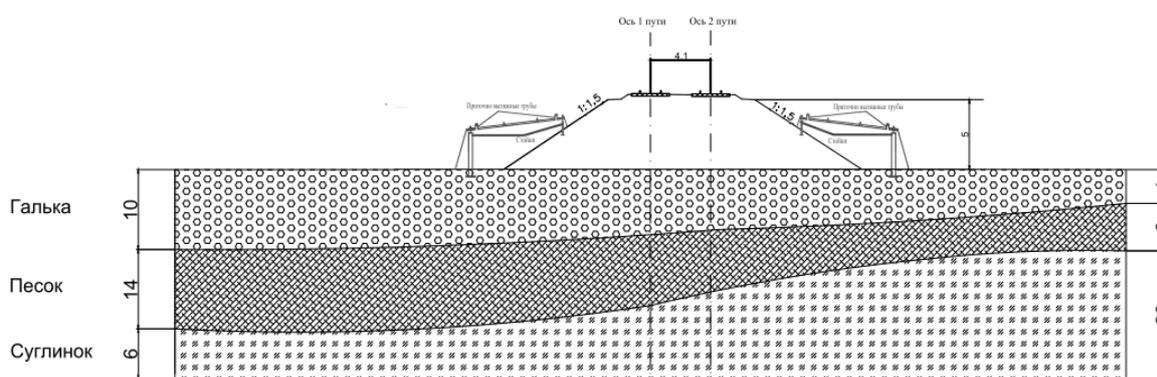


Рис. 3. Проект солнцезащитного навеса

Fig. 3. The project of a sunshade canopy

Таблица 1. Природно-климатические условия метеостанции Чара

Table 1. Natural and climatic conditions of the Chara weather station

Номер месяца	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	Суммарная солнечная радиация, $\text{ккал/см}^2 \text{ мес.}$	Скорость ветра, м/с	Высота снежного покрова, м	Плотность снежного покрова, г/см^3
1	-33,0	1,5	0,6	0,12	0,16
2	-28,0	3,3	0,7	0,13	0,16
3	-18,0	7,8	1,5	0,11	0,17
4	-4,4	10,2	2,5	0,03	0,21
5	5,1	11,3	2,7	–	–
6	12,0	13,8	1,8	–	–
7	1,0	12,9	1,3	–	–
8	13,1	11,2	1,3	–	–
9	5,1	6,8	1,4	–	–
10	-6,3	4,4	1,2	0,05	0,15
11	-20,8	1,9	0,9	0,08	0,15
12	-30,1	1,1	0,6	0,10	0,15
Среднее значение	-7,4	7,2	1,4	0,09	0,16

Таблица 2. Теплофизические свойства грунтов
Table 2. Thermophysical properties of soils

Параметр	Материал			Место нахождения	
	Щебенисто-галичниковый грунт с песчаным заполнителем	Песок	Суглинок	Основание насыпи	Верх насыпи
Объемная теплоемкость талого грунта, МДж/м ³ ·°С	3,11	3,13	3,15	2,61	2,35
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, МДж/м ³ ·°С	2,12	2,14	2,35	2,42	2,18
Теплопроводность талого грунта, Вт/(м·°С)	1,49	1,57	1,51	2,09	1,45
Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°С)	1,57	1,79	1,68	2,15	1,51
Суммарная весовая влажность грунта, д.е.	0,10	0,38	0,25	0,03	0,05
Плотность сухого грунта, кг/м ³	2000	1220	1600	2060	1900
Температура фазового перехода, °С	-0,16	-0,28	-0,2	0	0

пературного распределения по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 4 показано такое распределение на примере сезоннодействующих охлаждающих установок.

В данном случае расчеты показали, что сезоннодействующие охлаждающие установки действуют локально в местах их расположения.

Минимальная температура на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации в местах установок равна $-2,5\text{ °C}$ (рис. 5).

Расчет с применением скальной наброски показал ее действие практически сразу с момента обустройства. Промерзание грунта происходит под основанием насыпи по всей его

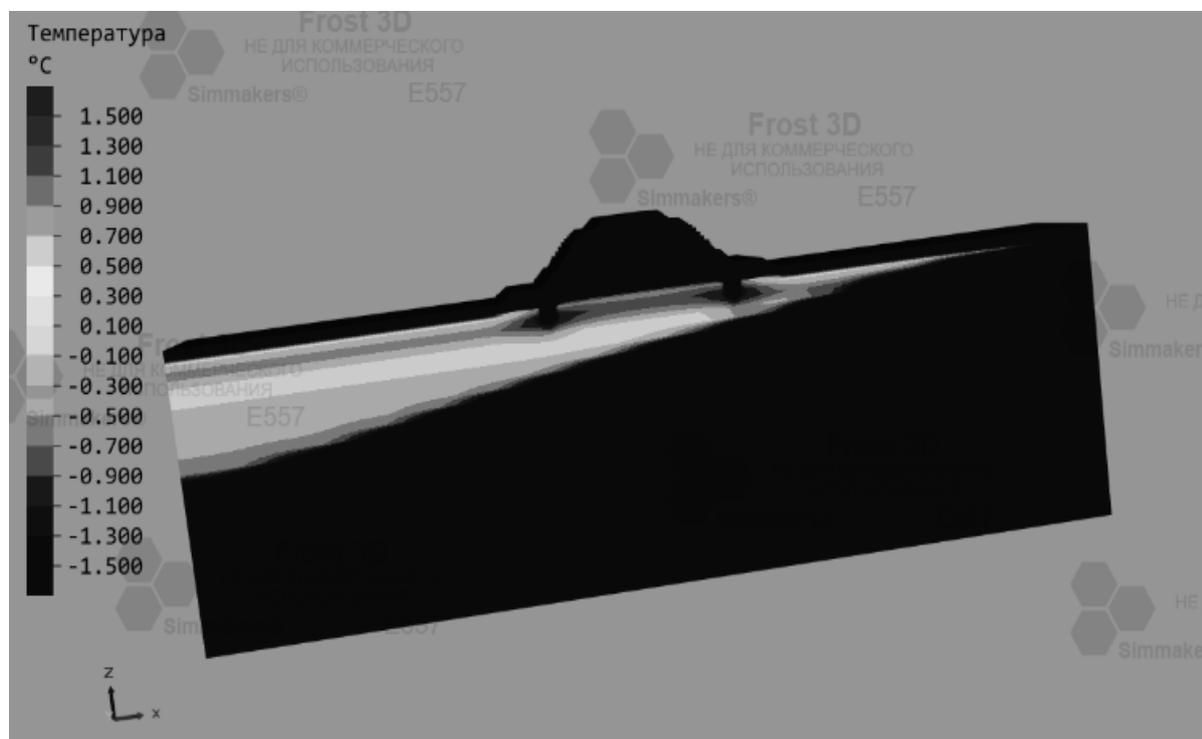


Рис. 4. Распределение температуры в теле и основании земляного полотна с применением сезоннодействующих охлаждающих установок

Fig. 4. Temperature distribution in the roadbed with the use of seasonal cooling units

ширине. Температура под скальной наброской на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации равна $-1,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6).

Расчет с применением солнцезащитных навесов показал их действие сразу по-

сле сооружения. Промерзание грунта происходит под навесами и основанием насыпи по всей его ширине. Температура под навесами на глубине 1,5 м в первый год эксплуатации равна $-1,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

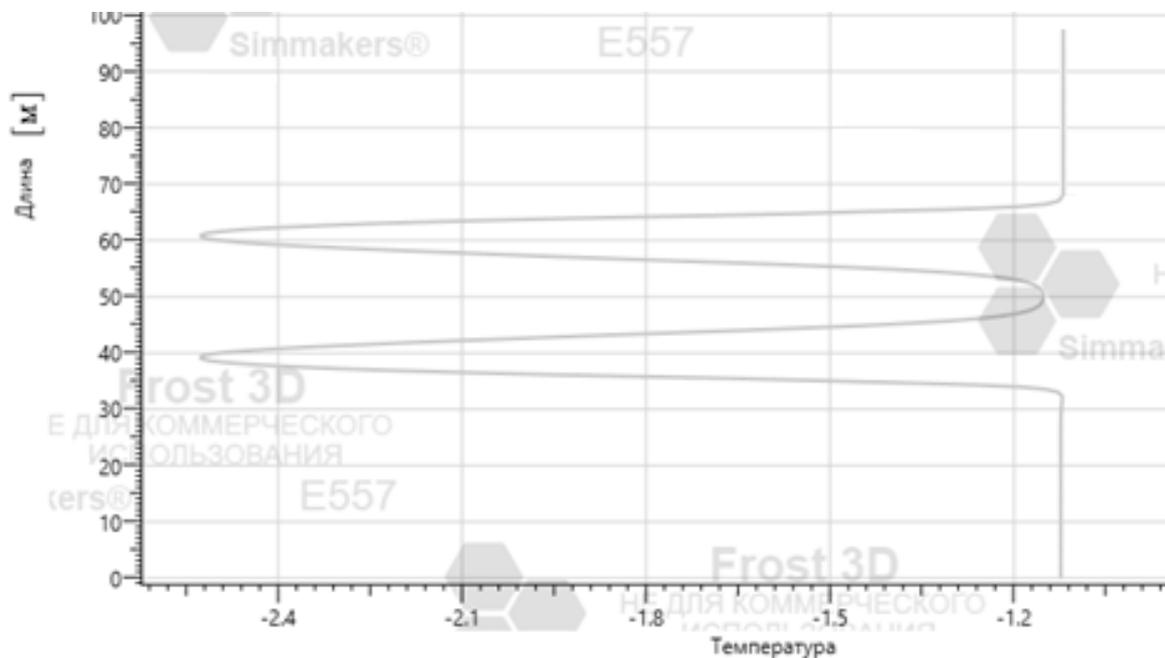


Рис. 5. Расчетная температура грунтов при применении сезоннодействующих охлаждающих установок в первый год эксплуатации

Fig. 5. Estimated soil temperature when using seasonally active cooling units in the first year of operation

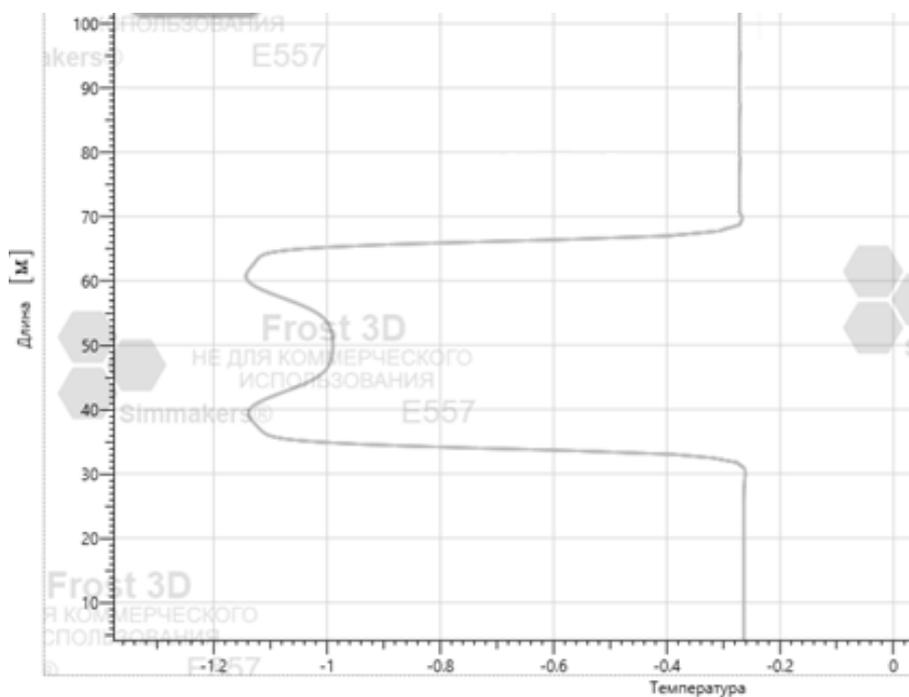


Рис. 6. Расчетная температура грунтов при применении скальной наброски в первый год эксплуатации

Fig. 6. The estimated temperature of soils when using stone protection in the first year of operation

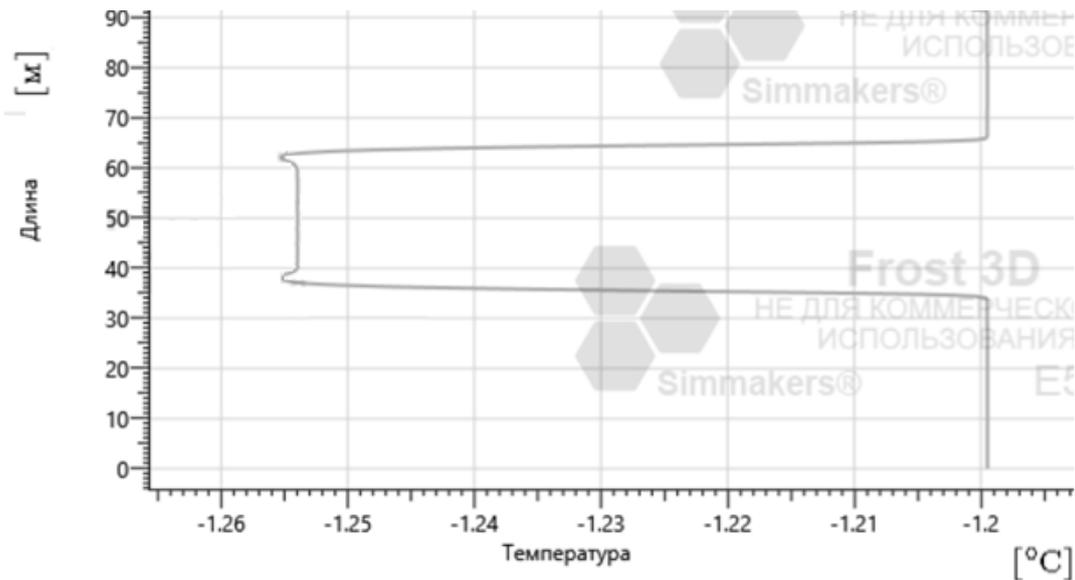


Рис. 7. Расчетная температура грунтов при применении солнцесадкозащитных навесов в первый год эксплуатации

Fig. 7. The estimated temperature of soils when using sunshade canopies in the first year of operation

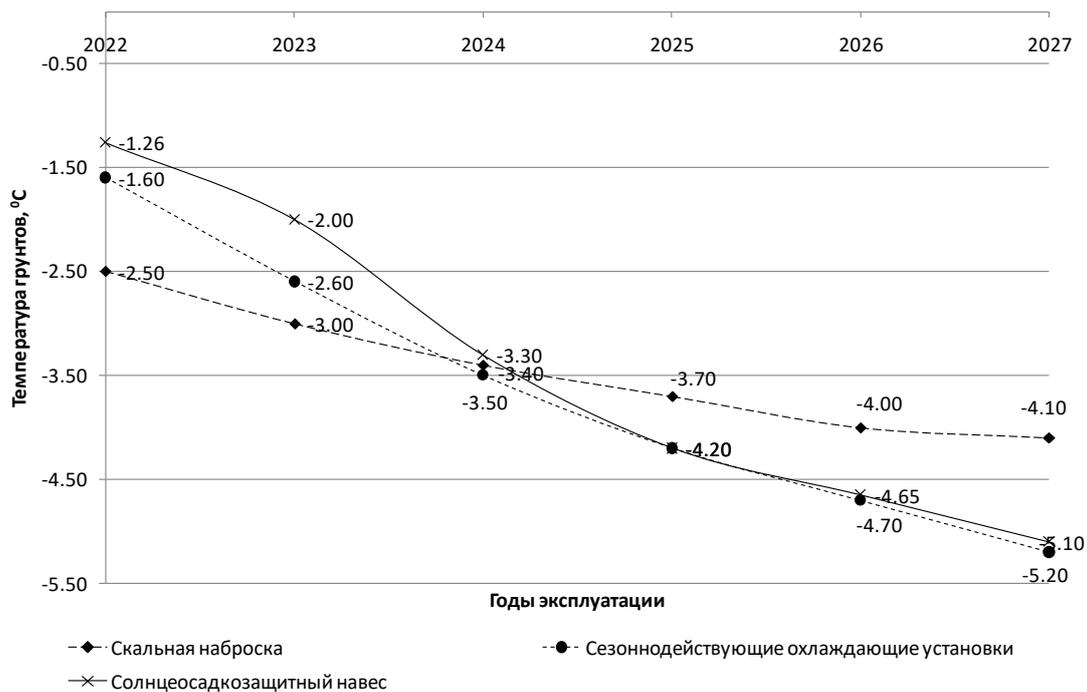


Рис. 8. Интенсивность промерзания грунтов с прогнозом на пять лет

Fig. 8. The intensity of soil freezing with a forecast for five years

По результатам теплотехнических расчетов был составлен обобщенный график интенсивности промерзания грунтов для всех трех проектных сооружений на пять лет эксплуатации (рис. 8).

Все проектные решения обеспечивают повышение и стабилизацию кровли многолетнемерзлых пород. Применение этих способов будет

способствовать сохранению и восстановлению мерзлого состояния грунтов в основании земляного полотна. Все три сооружения не дают растепления грунтов основания. С каждым годом эксплуатации грунт под основанием земляного полотна промерзает в среднем с интенсивностью от 0,82 до -1,04 °C в год.

В дальнейшем было проведено сравнение расчетных температур с фактическими температурами, зафиксированными в первый год эксплуатации. Данные фактических температур представлены по результатам наблюдений Новочарской дистанции пути [16–18]. Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с данными наблюдений, при этом отмечалась разница 0,1–0,5 °С в сторону более низких температур (рис. 9).

В связи с этим можно сделать вывод, что программный комплекс Frost 3D Universal может быть использован для проведения теплотехнических расчетов земляного полотна. Расчеты имеют достаточно высокую точность при условии соблюдения достоверности всех исходных данных.

Заключение

Общий вывод по данной работе можно сделать следующий: каждая конструкция применима в условиях вечной мерзлоты на участках Байкало-Амурской магистрали.

Скальная наброска одна из самых эффективных, бюджетных и долговечных охлаждающих конструкций. Зимой холодный воздух через снег, размыты в камнях и «продухи» сво-

бодно проникает к земляному полотну через воздушные поры, таким образом, в разы снижается отепляющее воздействие снежного покрова. Летом работает как затеняющий навес, нагреваются только верхний слой конструкции, за счет точечного контакта между собой и свободной конвекции воздуха тепло не проникает в глубину. Для ее эффективной работы следует применять породы крупных фракций. В ходе эксплуатации необходимо предотвращать загрязнение скальной наброски. Избыточное содержание мелочи приводит к снижению водопроницаемости и сдвиговой прочности этой конструкции.

Сезоннодействующие охлаждающие конструкции работают только с небольшой высотой снежного покрова и имеют ограниченный радиус теплового влияния, поэтому эффективны только большими, тесными группами. Функционируют только в зимнее время за счет выноса тепла посредством конвекции теплоносителя, либо за счет цикла испарения-конденсации. Могут устанавливаться в выемках, где нельзя установить солнцезащитный навес.

Для солнцезащитного навеса расчетная толщина снежного покрова не является

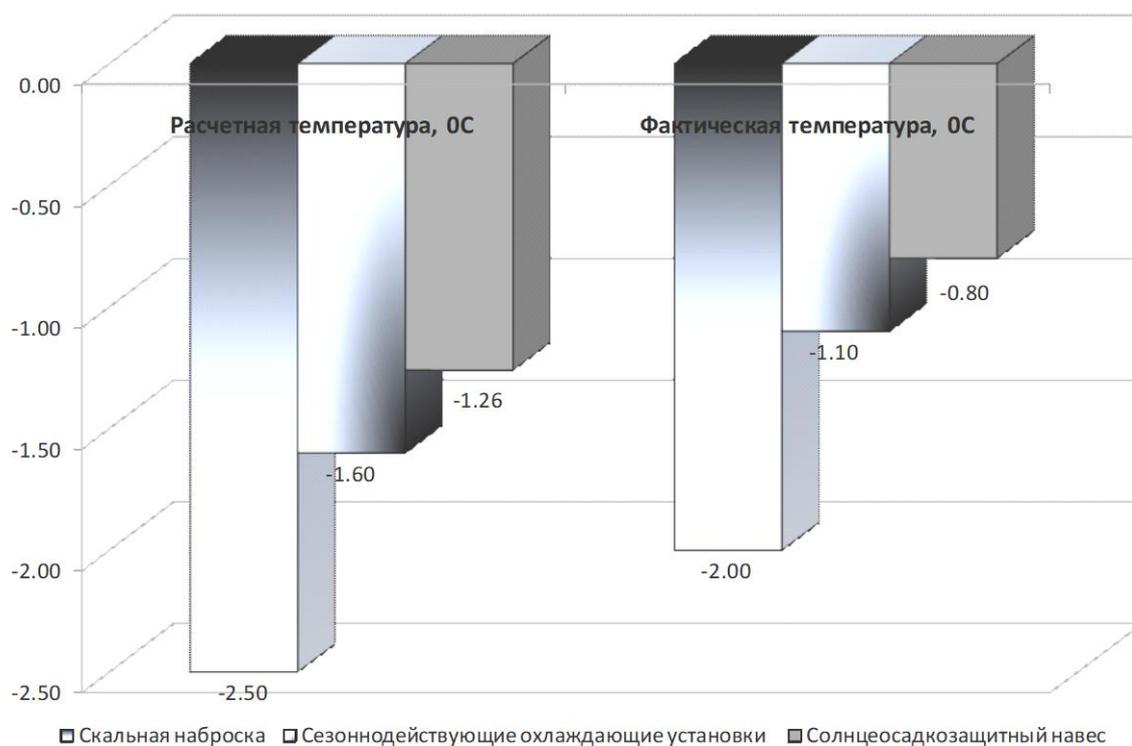


Рис. 9. Сравнение расчетных и фактических температур в первый год эксплуатации

Fig. 9. Comparison of calculated and actual temperatures in the first year of operation

ограничивающим фактором для применения. Работают круглогодично. Летом защищают откосы от солнечной радиации, зимой пропускают холодный воздух. Солнцезащитный

навес является эффективным и экономически обоснованным решением в текущем содержании земляного полотна для устранения локальных тепловых деформаций.

Список литературы

1. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Забтранс, 2001. 100 с.
2. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Полиграф-Ресурс, 2011. 176 с.
3. Пат. 1740555 СССР. Железнодорожный путь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах / В.Г. Кондратьев, А.А. Королев, М.И. Карлинский и др. № 4812664/03 ; заявл. 17.01.1990 ; опубл. 15.06.1992, Бюл. № 22. 4 с.
4. Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снегозаносимых участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 11. С. 23–26.
5. Защита водопропускной трубы на железной дороге от воздействия наледи / В.А. Подвербный, Д.А. Ковенькин, Е.В. Филатов и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 136–146.
6. Принятие решений при выборе конструкций и параметров сезонных охлаждающих устройств / В.А. Подвербный, А.А. Перельгина, Л.Ю. Гагарин и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 147–160.
7. Перспективы транспортного, промышленного, гражданского строительства в Тайшетском районе Иркутской области и предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов / В.А. Подвербный, Д.А. Ковенькин, Е.В. Филатов и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 129–147.
8. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, О.А. Суслов и др. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф., чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахуняца. 2016. М., 2017. С. 138–140.
9. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.
10. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Сигачев Н.П. Устройство дренажных сооружений в районах вечной мерзлоты // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 96–101.
11. Подвербный В.А., Перельгина А.А. Принятие решения по выбору типа укрепления водоотводных и нагорных канав на основе метода идеальной точки // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 57–62.
12. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : утв. приказом Минстроя РФ № 915/пр от 30.12.2020. Введ. 2021-07-01. М. : Минстрой России, 2020. 140 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М. : Научный мир, 2003, 316 с.
14. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М. : Изд-во ЦПИ при мех.-мат. фак. МГУ, 2009. 88 с.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1989. 616 с.
16. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцезащитных навесов // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 56–63.
17. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Результаты опытно-экспериментальных работ по охлаждению многолетнемерзлых грунтов в основании железнодорожного пути на центральном участке БАМ // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва, 2016. Т. 1. С. 168–175.
18. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2019. № 1. С. 538–541.

References

1. Kondrat'ev V.G. Aktivnye sposoby ukrepleniya osnovaniya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Active methods of strengthening the foundation of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Zabtrans Publ., 2001. 100 p.
2. Kondrat'ev V.G. Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Stabilization of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Poligraf-Resurs Publ., 2011. 176 p.
3. Kondrat'ev V.G., Korolev A.A., Karlinskii M.I., Pozin V.A., Rozanov A.S. Patent SU 1740555 A1, 15.06.1992.
4. Koven'kin D.A., Valiev N.A. Zashchita ot degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov na snegozanosimyykh uchastkakh [Protection from degradation of permafrost soils on snow-bearing areas]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 11, pp. 23–26.
5. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V., Ivashevich A.A. Zashchita vodopropusknoi truby na zheleznoi doroge ot vozdeistviya naledi [Protection of the culvert on the railway from the effects of ice]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t) [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]*. Chita, 2018, vol. 1, pp. 136–146.
6. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A., Gagarin L.Yu., Uralskii D.A. Prinyatie reshenii pri vybore konstruktssii i parametrov sezonnykh okhlazhdayushchikh ustroystv [Decision-making when choosing designs and parameters of seasonal cooling devices]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]*. Chita, 2019, pp. 147–160.
7. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V., Valiev N.A. Perspektivy transportnogo, promyshlennogo, grazhdanskogo stroitel'stva v Taishet'skom raione Irkutskoi oblasti i predotvrashchenie degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Prospects of transport,

industrial, civil construction in the Taishet district of the Irkutsk region and prevention of degradation of permafrost soils]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, pp. 129–147.

8. Pevzner V.O., Petropavlovskaya I.B., Suslov O.A. [et al.]. Rabota puti v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya [Railway operation in heavy traffic conditions]. *Trudy XIII Mezhduнародnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»*. Chitaniya, posvyashchennnye pamyati professora G.M. Shakhun'yantsa [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference «Modern problems of railway track design, construction and operation». Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhun'yantsa], 2016, pp. 138–140.

9. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 92–96.

10. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Sigachev N.P. Ustroistvo drenaznykh sooruzhenii v raionakh vechnoi merzloty [Installation of drainage structures in permafrost areas]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, Vol. 1, pp. 96–101.

11. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A. Prinyatie resheniya po vyboru tipa ukrepleniya vodootvodnykh i nagornykh kanav na osnove metoda ideal'noi toчки [Decision-making on the choice of the type of strengthening of drainage and upland ditches based on the ideal point method]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 2 (69), pp. 57–62.

12. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh, SP 25.13330.2020 (Grounds and foundations on permafrost soils, Set of rules 25.13330.2020). Moscow: Minstroj Publ., 2020. 140 p.

13. Samarskii A.A., Gul'in A.V. Chislennyye metody matematicheskoi fiziki [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2003. 316 p.

14. Leont'ev N.E. Osnovy teorii fil'tratsii [Fundamentals of filtration theory]. Moscow: Izd-vo TsPI pri mekhaniko-matematicheskome fakul'tete MGU, 2009. 88 p.

15. Samarskii A.A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 616 p.

16. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Eksperimenty po stabilizatsii zemlyanogo polotna na tsentral'nom uchastke Baikalo-Amurskoi magistrali s pomoshch'yu solntseosadkozashchitnykh navesov [Experiments on the stabilization of the roadbed on the central section of the Baikal-Amur highway with the help of sunshade canopies]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2015, no. 4, pp. 56–63.

17. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Rezul'taty opytно-eksperimental'nykh rabot po okhlazhdeniyu mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii zheleznodorozhnogo puti na tsentral'nom uchastke BAM [Results of experimental work on the cooling of permafrost soils at the base of the railway track on the central section of the BAM]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, vol. 1, pp. 168–175.

18. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, no. 1, pp. 538–541.

Информация об авторах

Ковенькин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Насников Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nasnikov_dn@irgups.ru.

Чернецкая Ирина Сергеевна, старший преподаватель кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: irina.irk@bk.ru.

Information about the authors

Dmitrii A. Koven'kin, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Dmitrii N. Nasnikov, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nasnikov_dn@irgups.ru.

Irina S. Chernetskaya, Assistant Professor of the Department of Track and track facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: irina.irk@bk.ru.