

Определение расчетной толщины теплоизоляции из золошлаковых отходов

Д.А. Ковенькин✉, Д.О. Туманов, Ю.А. Ходырев

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

✉kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

Земляное полотно железнодорожного пути зачастую подвержено деформациям. Это происходит из-за изменения его теплофизических, физико-механических и физико-химических характеристик. Развитие деформаций в связи с осадкой оттаивающих грунтов или их пучения в результате промерзания представляет собой сложный многофакторный процесс. Для борьбы с указанными явлениями в настоящее время применяют теплоизоляционный слой из плит экструдированного пенополистирола. Однако, как показывает опыт эксплуатации данного материала, он имеет ряд недостатков, которые напрямую влияют на стабильность земляного полотна. Одним из возможных заменителей для теплоизоляции земляного полотна можно рассмотреть новый материал, производимый из золошлаковых отходов. Лабораторные исследования подтверждают, что он по теплоемкости и теплопроводности немного уступает экструдированному пенополистиролу, однако его прочность при одноосном сжатии значительно выше. В статье приведены качественные и количественные характеристики обоих материалов, представлены результаты расчетов, проведенных в программном комплексе Frost 3D Universal по определению расчетной толщины теплоизоляционного слоя, изготовленного на основе золошлаковых отходов. С целью установления зависимости толщины нового материала от суммы градусо-суток отрицательных температур за год, расчеты проведены при разных климатических условиях. По их результатам выявлено, что этот образец может использоваться в качестве защитного теплоизоляционного слоя на основной площадке земляного полотна для предотвращения образования пучин. Найдена линия тренда, выраженная функциональной зависимостью, для определения толщины теплоизоляции при разных климатических условиях.

Ключевые слова

пенополистирол, морозное пучение, теплоизоляция, золошлаковые отходы, тепловые расчеты, толщина теплоизоляции

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Определение расчетной толщины теплоизоляции из золошлаковых отходов / Д.А. Ковенькин, Д.О. Туманов, Ю.А. Ходырев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 53–63. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).53-63.

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 11.09.2025 г.; принята к публикации: 12.09.2025 г.

Determination of the calculated thickness of thermal insulation made of ash and slag waste

D.A. Koven'kin✉, D.O. Tumanov, Yu.A. Khodyrev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

The roadbed of a railway track is often subject to deformations, this is due to changes in its thermophysical, physical and mechanical and physicochemical characteristics. The development of deformations due to the settlement of thawing soils and the swelling of freezing soils is a complex multifactorial process. To combat the swelling of freezing soils and the settlement of thawing soils, a heat-insulating layer of extruded polystyrene foam boards is currently used. However, as operating experience shows, this material has a number of disadvantages that directly affect the stability of the roadbed. One of the possible substitute materials for roadbed thermal insulation can be considered a new material based on ash and slag waste. According to the results of laboratory studies, this material has heat capacity and thermal conductivity indicators that are slightly worse than those of extruded polystyrene foam, but the strength under uniaxial compression is significantly higher. The article provides their qualitative and quantitative characteristics. This article presents the results of calculations carried out in the Frost 3D Universal software package to determine the optimal thickness of a heat-insulating layer based on ash and slag waste. In order to establish the dependence of the thickness of the new material on the sum of degree-days of negative temperatures per year, the calculations were carried out under different climatic conditions. Based on the calculation results, it was found that the new material can be used as a protective heat-insulating layer in the body of the embankment of the roadbed to prevent swelling of the soils located below the heat-insulating layer. A trend line was found, expressed by a functional dependence, to determine the thickness of the heat insulation under different climatic conditions.

Keywords

expanded polystyrene, frost heaving, thermal insulation, ash and slag waste, thermal calculations, thermal insulation thickness

For citation

Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Kodyrev Yu.A. Opredelenie rashchetnoi tolshchiny teploizolyatsii iz zoloshlakovykh otkhodov [Determination of the calculated thickness of thermal insulation made of ash and slag waste]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. № 3(87). Pp. 53–63. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).53-63.

Article Info

Received: September 4, 2025; Revised: September 11, 2025; Accepted: September 12, 2025.

Введение

В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. одним из важнейших направлений является доведение технического и технологического уровня инфраструктуры, подвижного состава, сферы их содержания и ремонта до лучших мировых стандартов [1].

Современные проблемы требуют актуальных решений и новых экологических материалов. В железнодорожном транспорте все чаще находят применение композиционные материалы [2]. Сочетание их с классическими материалами увеличивает срок службы изделий, повышает их стойкость к перепаду температур и ремонтпригодность, снижает количество вредных выбросов в атмосферу.

По данным ОАО «РЖД», при общей протяженности земляного полотна в 86 240 км дефекты и деформации земляного полотна занимают почти 6 000 км. Это примерно 7 % от его общей эксплуатационной длины. На проблемных участках осадки и пучины (просадки, морозное пучение) составляют более 35 % от всех дефектов. Земляное полотно подвергается постоянным сезонным деформациям, что влияет на состояние геометрии рельсовой колеи. Это, в свою очередь, создает риск нарушения бесперебойного и безопасного движения подвижного состава по сети железных дорог.

Деформации земляного полотна – сложный процесс, возникающий из-за промерзания грунтов и последующего их оттаивания. Эти изменения связаны с преобразованием тепловых, механических и химических свойств грунта [3–7].

В настоящее время для борьбы с этими деформациями широко используется легкий синтетический теплоизолятор – пенополистирол, отличающийся низкой теплопроводностью [8]. Однако данный материал имеет ряд недостатков: низкая прочность на сжатие и изгиб;

постепенное накапливание влаги (это может приводить к потере теплоизоляционных свойств, что достаточно критично на обводненных грунтах); подверженность термоокислительным процессам; разрушение под действием углеводородных растворителей; проблемы с утилизацией (не разлагается) [9].

На рис. 1 показан излом пенополистирольных плит, происходящий, как правило, при проходе путевой техники во время их укладки.

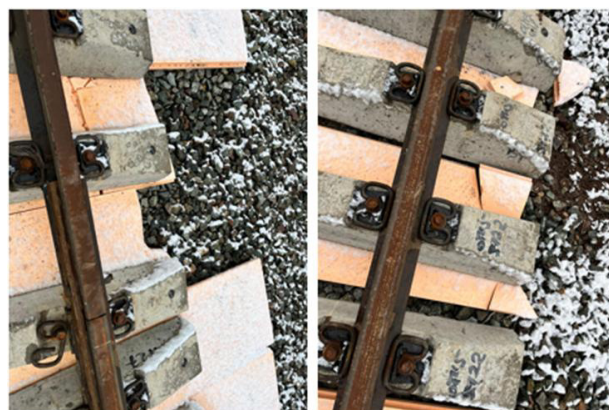


Рис. 1. Трещины на плитах из пенополистирола, появляющиеся во время их укладки

Fig. 1. Fractures of polystyrene foam slabs during their laying

Для того чтобы ликвидировать или хотя бы уменьшить такие недостатки теплоизоляционного слоя из пенополистирольных плит, предлагается применить новый материал, разработанный на основе золошлаковых отходов (ЗШО). Предполагается, что его использование позволит повысить эффективность защиты земляного полотна от воздействия отрицательных температур. Кроме того, это экологически оправдано в качестве способа ликвидации накопленного ущерба и сохранения природных ресурсов. Образцы предлагаемого материала представлены на рис. 2.

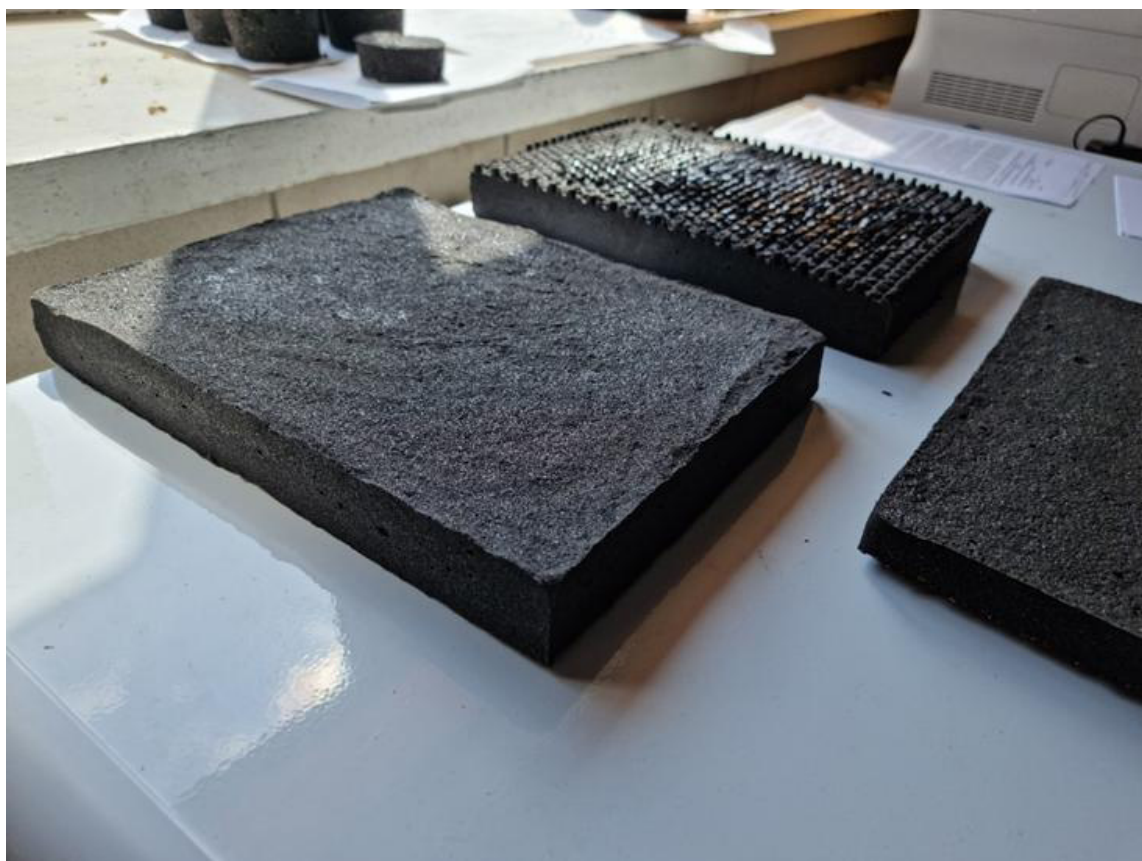


Рис. 2. Теплоизоляционный материал на основе золошлаковых отходов

Fig. 2. Samples of the obtained ash and waste composite materials

Теплоизоляция с применением материалов на основе ЗШО – это создание теплоизоляционного слоя в теле насыпи земляного полотна для предотвращения промерзания пучинистых грунтов с целью предотвращения сверхнормативного морозного пучения грунтов вследствие воздействия на них отрицательных температур [10–13]. Кроме того, золошлаковая смесь уже рассматривалась в качестве разновидности техногенного грунта, из которого можно сооружать земляное полотно [14].

Новый теплоизоляционный материал получен в результате смешивания в специальных условиях определенной запатентованной полимерной добавки с отходами угольного горения (ЗШО). Материал разработан учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта под руководством доктора технических наук Н.А. Коноваловой.

Данный материал при лабораторных исследованиях показал хорошие показатели по теплоемкости – $0,0796 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, теплопроводности – $0,17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и прочности при одноосном сжатии – $3,5 \text{ МПа}$.

В табл. 1 приведены теплофизические свойства нового композиционного материала в сравнении с пенополистиролом.

На данном этапе исследования определяется наиболее эффективная сфера применения нового материала. Целью статьи является установление зависимости его толщины от суммы градусо-суток отрицательных температур за год.

Научная новизна работы заключается в определении области применения теплоизоляционных плит из ЗШО на основной площадке земляного полотна в зависимости от климатических условий.

Материалы и методы исследования

Для определения расчетной толщины теплоизоляции был применен сертифицированный программный комплекс Frost 3D Universal, разработанный ООО «Симмэйкерс». Лежащие в основе программы Frost 3D Universal алгоритмы и методы (способы обработки и интерпретации информации) запатентованы [15].

Frost 3D Universal – это программный комплекс для трехмерного моделирования теп-

Таблица 1. Физические характеристики материалов
Table 1. Physical Properties of Materials

Наименование параметра материала Material parameter name	Материал Material	
	Пенополистерол Polystyrene foam	Композиционный материал Composite material
Объемная теплоемкость, МДж/(м³·°C) Volumetric heat capacity, MJ/(m³ · °C)	0,0621	0,0796
Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m · °C)	0,031	0,17
Суммарная весовая влажность, д.е. Weight, d.u.	0	0
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	45	78,2
Температура фазового перехода, °C Phase transition temperature, °C	0	0
Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day	$8,64 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-8}$

ловых процессов, происходящих в грунтах (особенно в многолетнемерзлых породах), позволяющий решать широкий спектр задач, связанных с теплообменом в них:

– моделирование температурных полей, расчет распределения температур в грунтах основания с учетом фазовых переходов «вода – лед»;

– учет фильтрации, моделирование конвективного переноса тепла грунтовыми водами, что критически важно для таких объектов, как дамбы и плотины;

– проектирование на мерзлых грунтах, теплотехнический анализ для обоснования проектных решений зданий, трубопроводов, дорог и других сооружений в криолитозоне;

– работа с тепловой изоляцией (в базе данных материалов присутствуют свойства экструзионного пенополистирола для расчета теплозащиты конструкций);

– создание цифровых двойников, разработка компьютерных моделей, синхронизированных с системами геотехнического мониторинга для прогнозирования аварийных ситуаций.

С целью проведения расчетов в программном комплексе Frost 3D Universal был смоделирован участок земляного полотна. Модель состоит из следующих слоев: основание (суглинки, галечниковый грунт, глина твердая, глина полутвердая); тело насыпи (песок); теплоизоляционный слой; защитный подбалластный слой; балластная призма (щебень). Поперечный профиль земляного полотна представлен на рис. 3.

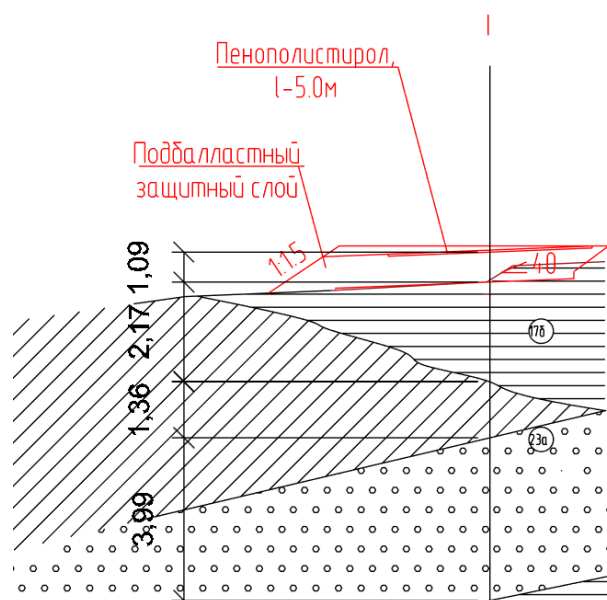


Рис. 3. Детализация распределения грунтов по вертикальной оси

Fig. 3. Detailing of soil distribution along the vertical axis

Физические и теплофизические свойства грунтов основания и тела земляного полотна, а также свойства материала балластной призмы представлены в табл. 2. Экспликация инженерно-геологических элементов приведена в табл. 3.

Проводился расчет распределения температур в грунтах земляного полотна с предлагаемой теплоизоляцией под балластной призмой. Толщина теплоизоляции принималась равной от 0,05 до 0,2 м с шагом 0,05, ее ширина (размер поперек оси земляного полотна) – 5 м.

Таблица 2. Физические и теплофизические свойства грунтов

Table 2. Physical and Thermophysical Properties of Soils

Наименование грунта Soil Name	Теплопроводность, Вт/(м· °K) Thermal Conductivity, W/(m· °K)		Объемная теплоем- кость, МДж/(м³· °K) Volumetric Heat Capac- ity, MJ/(m³· °K)		Суммарная влажность, д.е. Total Moisture Content, frac.	Плотность в сухом состоянии, кг/м³ Dry Density, kg/m³	Температура начала замерзания, °C Initial Freezing Temperature, °C
	талого thawed	мерзлого frozen	талого thawed	мерзлого frozen			
Грунты основания земляного полотна Roadbed foundation soils							
16а Суглинок Loam	1,57	1,80	3,17	2,41	0,13	1 830,00	−0,31
23а Галечниковый грунт Pebble soil	2,00	2,20	2,39	2,08	0,10	1 800,00	−0,32
17а Глина твердая Hard clay	2,00	2,20	2,39	2,08	0,15	1 800,00	−0,32
17б Глина полутвердая Semihard clay	1,57	1,80	3,17	2,41	0,19	1 710,00	−0,31
Грунты тела земляного полотна Roadbed embankment soils							
Песок Sand	1,45	1,51	2,35	2,18	0,05	1 900,00	0,00
Балласт Ballast							
Щебень Crushed stone	2,00	2,35	1,84	1,675	0,10	1 800,00	0,00

Таблица 3. Экспликация грунтов

Table 3. Soil Legend

Наименование грунта Soil Name	Степень морозной пучинистости (ε_{fi}) Degree of Frost Heave Susceptibility	Мощность слоя по вертикальной оси пути, м Layer Thickness Along the Track Vertical Axis
Защитный дренирующий слой – песок Protective drainage layer – sand	Принят $\varepsilon_{fi} = 0,1 \%$ Accepted $\varepsilon_{fi} = 0,1\%$	1,09
17б Глина с галькой полутвердая Semi-hard clay with pebbles	Слабопучинистые ($\varepsilon_{fi} = 1,5 - 3,0 \%$), принят $\varepsilon_{fi} = 2 \%$ Slightly heaving ($\varepsilon_{fi} = 1,5 - 3,0\%$), adopted $\varepsilon_{fi} = 2\%$	2,17
16а Суглинок галечниковый, твердый, с примесью органического вещества Pebble loam, solid, with an admixture organic matter	Непучинистые ($\varepsilon_{fi} = 0,3 - 0,95 \%$) Non-heaving ($\varepsilon_{fi} = 0,3 - 0,95\%$)	1,36
23а Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем, малой степени водонасыщения Pebble soil with loamy filler, low degree of water saturation	Непучинистые ($\varepsilon_{fi} = 0,3 - 0,95 \%$) Non-heaving ($\varepsilon_{fi} = 0,3 - 0,95\%$)	3,99

Толщина защитного слоя на покрытии составила 0,1 м. Толщина защитного дренирующего слоя под покрытием принята 1,09 м.

Исходные данные по средней месячной и годовой температурам воздуха представлены в табл. 4. Здесь показана сумма градусо-суток отрицательных температур, равная – 1 800 °C.

Температурный тренд глобального потепления для этой местности – 0,06 °C в год. Среднезимняя теплопроводность снегового покрова принята равной 0,28 Вт/м °C.

Согласно СП 447.1325800.2019 [16], при отсутствии достаточных данных допускается учет суммарной поправки к среднемесячным

температурам воздуха за счет солнечной радиации и испарения путем прибавления к среднемесячным значениям температуры воздуха с апреля по сентябрь температурной добавки $\Delta t = 3^\circ\text{C}$. При проведении расчетов было принято именно такое решение.

На балластной призме высота снега бралась равной 0 м, так как происходит периодическая очистка железнодорожного пути от снега по условиям эксплуатации. Кроме того, снег выдувает ветром, в том числе от проходящих поездов.

Учет дополнительного теплопритока на естественную поверхность грунта за счет воздействия солнечной радиации производился согласно [17] для 55° с.ш. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Расчеты производились согласно методике, описанной в СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории».

Результаты исследования

Расчет распределения температур в грунтах земляного полотна с предлагаемой теплоизоляцией под балластной призмой проводился с прогнозом эффективности действия сроком на пять лет. Трехмерная модель земляного полотна показана на рис. 4. Результаты теплотехнических расчетов, выполненных в программном комплексе Frost 3D Universal, визуализированы в виде изоповерхностей, показывающих распределение температуры по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 5 представлено такое распределение.

Теплотехнические сравнительные расчеты с применением программного комплекса Frost 3D Universal позволили определить температуру грунта под теплоизоляцией. Прямое влияние на возможность промерзания земляного полотна под слоем теплоизоляции оказывает сумма градусо-суток отрицательных температур воздуха в течение года.

Для экспериментального материала на основе ЗШО в программном комплексе Frost

Таблица 4. Климатические условия

Table 4. Climatic conditions

Показатель Parameter	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, $^\circ\text{C}$ Air temp, $^\circ\text{C}$	–16,90	–14,20	–6,20	1,20	8,90	16,00	18,40	15,30	8,30	0,80	–7,70	–15,40
Коэффициент конвективного теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{K})$ Convective heat transfer coefficient, $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{K}$	15,80	14,96	14,96	16,22	16,22	14,96	13,70	13,70	14,12	15,80	15,80	16,22
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/sec	2,30	2,10	2,10	2,40	2,40	2,10	1,80	1,80	1,90	2,30	2,30	2,40
Высота снежного покрова на откосах, м Snow depth on slopes, m	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,25	0,38

Таблица 5. Значение суммарной солнечной радиации

Table 5. Total Solar Radiation Value

Параметр Parameter	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ф – суммарная солнечная радиация, $\text{Вт}/\text{м}^2$ Ф – total solar radiation, W/m^2	30	60	135	190	240	240	240	185	125	75	35	20

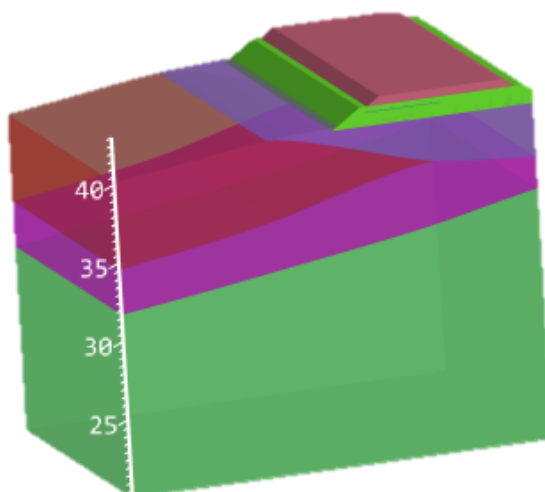


Рис. 4. Трехмерная геометрия земляного полотна
Fig. 4. Three-Dimensional Subgrade Geometry

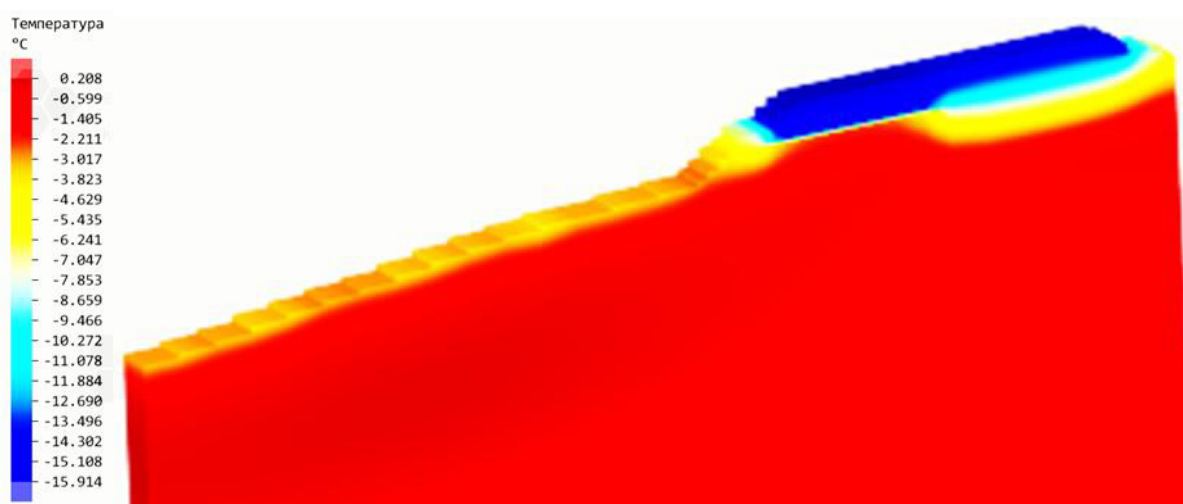


Рис. 5. Трехмерная визуализация температуры
Fig. 5. Three-Dimensional Temperature Visualization

3D Universal были рассчитаны эксплуатационные возможности из условия не превышения максимальной величины морозного пучения более допустимой. Согласно [18], расчетная допустимая величина равномерного морозного пучения принимается равной для:

- особогрузонапряженной линии – 15 мм;
- линий I и II категории – 20 мм;
- линий III категории – 25 мм;
- линий IV категории – 35 мм.

Расчеты высоты морозного пучения проведены для последнего месяца с отрицательной температурой воздуха в сезоне. Пока действует отрицательная температура, грунт будет промерзать. Такому месяцу соответствует март.

На железных дорогах основным нормируемым параметром, характеризующим мороз-

ное пучение, является высота морозного пучения, которая определяется по следующей зависимости:

$$h_{\text{пуч}} = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot \varepsilon_{fni}),$$

где $h_{\text{пуч}}$ – высота пучения; ε_{fni} – коэффициент морозного пучения в i -ом слое; H_i – глубина промерзания грунта i -го слоя.

На основании данных инженерно-геологических изысканий получены величины коэффициента морозного пучения для грунтов, из которых сложено земляное полотно на рассматриваемом участке:

- 0,1 % – для защитного дренирующего слоя – песок;
- 2 % – для глины с галькой полутвердой.

В табл. 6 представлены итоги моделирования.

По полученным данным был построен график определения расчетной толщины теп-

лоизоляционного слоя в зависимости от суммы градусо-суток отрицательных температур в год (рис. 6).

Таблица 6. Результаты теплотехнических расчетов

Table 6. Results of thermal engineering calculations

Сумма градусо-суток отрицательных температур воздуха Sum of negative degree – days air temperatures	Толщина теплоизоляции, м Thickness thermal insulation, m	Температура грунта под теплоизолятором, °C Soil temperature under the thermal insulator, °C	Глубина промерзания, м Depth freezing, m	Величина морозного пучения, мм Size frosty heaving, mm
900 °C	0,05	–3,62	2,06	1,69
	0,1	–2,67	1,99	–
	0,15	–2,20	1,88	–
	0,2	–2,09	1,68	–
1 200 °C	0,05	–4,76	2,29	6,29
	0,1	–3,60	2,23	5,09
	0,15	–3,01	2,14	3,29
	0,2	–2,92	1,96	–
1 500 °C	0,05	–6,32	2,50	10,5
	0,1	–4,83	2,46	9,7
	0,15	–4,09	2,37	7,9
	0,2	–3,98	2,25	5,5
1 800 °C	0,05	–7,57	2,84	17,3
	0,1	–5,87	2,8	16,5
	0,15	–5,00	2,73	14,1
	0,2	–4,85	2,58	12,1
2 100 °C	0,05	–8,84	2,88	18,1
	0,1	–6,94	2,81	16,7
	0,15	–5,93	2,78	16,1
	0,2	–5,17	2,72	14,9

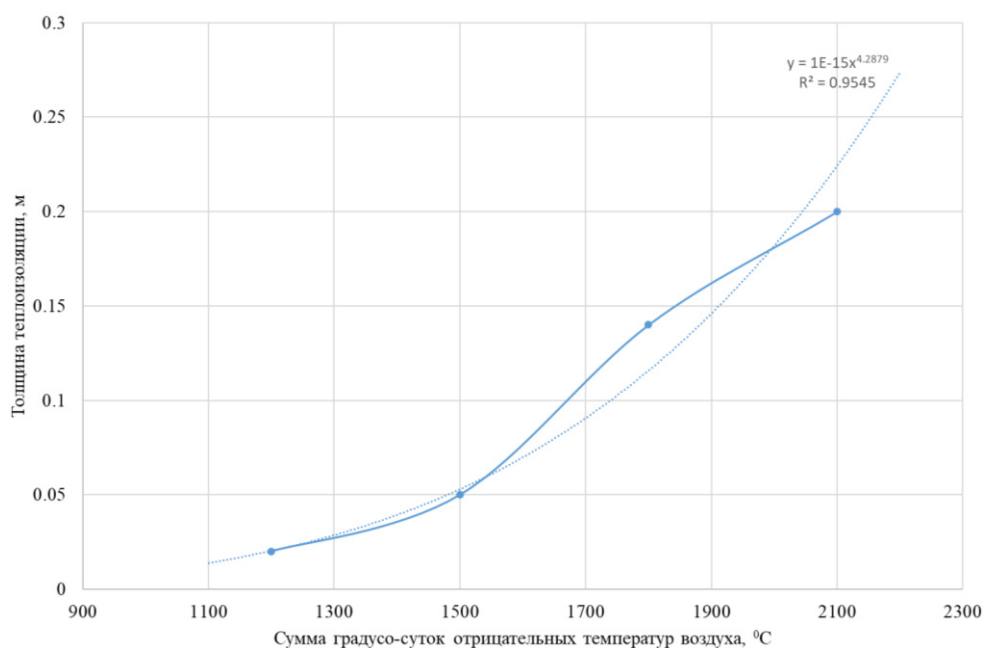


Рис. 6. Расчетная толщина теплоизоляционного слоя

Fig. 6. Calculated thickness of the thermal insulation layer

Таблица 7. Сферы применения теплоизоляционных плит из золошлаковых отходов
Table 7. Application Areas of Heat Insulation Slabs Made from Ash and Slag Waste

Характеристика плит Slab Characteristics	Толщина защитного слоя над плитой, м Thickness of the Protective Layer Above the Slab	Толщина тепло-изоляционных плит, м Thickness of the Heat Insulation Slabs	Сумма градусо-суток отрицательных температур за год, °C Annual Sum of Degree-Days of Subzero Temperatures			
			1 200	1 500	1 800	2 100
			Категория железнодорожной линии Railway Line Category			
Ширина плиты 5 м, теплоемкость 0,0796 МДж/(м³·°C), теплопроводность 0,17 Вт/(м·°C) Slab width 5 m, heat capacity 0,0796 MJ/(m³·°C), thermal conductivity	0,1	0,05	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	I–IV	I–IV
		0,1			Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV
		0,15				
		0,2				

Вычисления расчетной толщины теплоизоляционного слоя проведены из условия предотвращения сверхнормативного морозного пучения грунтов вследствие воздействия на них отрицательных температур. Толщина допускаемого теплоизоляционного слоя из композиционных материалов определяется для каждого участка индивидуально в зависимости от категории железнодорожной линии и свойств грунтов, слагаемых земляное полотно [14].

отрицательных температур воздуха за год при защитном слое на покрытии равном 0,1 м. Расчеты проведены при разных климатических условиях. Определены сферы применения теплоизоляционных плит из ЗШО на основной площадке земляного полотна. Итоги работы сведены в табл. 7.

При сумме отрицательных температур более 2 100 °C потребуется увеличение толщины теплоизоляции. Данное утверждение следует проверять подробными расчетами.

Заключение

Установлена зависимость толщины предлагаемого материала от суммы градусо-суток

Список литературы

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. (ред. 06.11.2024). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».
2. Мнения и оценки. Композиты приходят на железную дорогу // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/content/infrastructure/1571044/> (Дата обращения 18.08.2025).
3. Экспериментальная технология в геотехнике / С.Я. Луцкий, В.А. Шмелев, А.Ю. Бурукин и др. // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 17–20.
4. Кирпичников К.А., Дашинимаяев 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.
5. 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.
6. 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. МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2016. Т. 1. С. 168–175.
7. Валиев Н.А. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы десятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 538–541.
8. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи / Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталев, Л.В. Емельянова и др. // Криосфера земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 84–89.

9. Сабельников К.И., Туманов Д.О. Недостатки содержания плит пенополистирола в условиях эксплуатации на железной дороге // Научный аспект. 2024. Т. 51. № 6. С. 6493–6499.
10. Утилизация паровозных шлаков в составах композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути / Н.Д. Шаванов, П.П. Панков, Д.В. Бесполитов и др. // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2024. № 1 (91). С. 63–73.
11. Туманов Д.О., Ковенькин Д.А. Анализ возможности применения материала на основе золошлаковых отходов для усиления основания земляного полотна // Железнодорожный транспорт и технологии (RTT-2023) : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2023. Вып. 1 (256). С. 160–163.
12. Шаванов Н.Д. Техничко-экономическое обоснование вовлечения золошлаковых отходов в дорожное строительство // Развитие малого предпринимательства в Байкальском регионе : материалы V междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. С. 247–252.
13. Коновалова Н.А., Мелешин Э.Е., Шаванов Н.Д. Изучение свойств золошлаковых смесей для утилизации в составах дорожно-строительных материалов // Биологические и географические аспекты экологии человека : материалы Всерос. науч. конф. Сыктывкар, 2022. С. 60–64.
14. Иванов Е.В., Исаков А.Л., Сиротюк В.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси // Вестн. Сибир. гос. автомобил.-дорож. акад. 2013. № 3 (31). С. 71–76.
15. Frost 3D Universal Инженерные расчеты при проектировании на многолетнемерзлых грунтах // Научно-технический центр «Симмэйкерс» : сайт. URL : <https://simmakers.ru/wp-content/uploads/2014/03/teplotekhnicheskie-rashotiv-stroitelstve1.pdf> (Дата обращения: 26.08.2025).
16. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования : утв. приказом Минстроя РФ № 82/пр от 04.02.2019 (ред. 09.02.2023). Введ. 2019–08–05. М. : Минстрой России, 2019. 58 с.
17. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории : утв. приказом Минстроя РФ № 910/пр от 30.12.2020. Введ. 2021–07–01. М. : Минстрой России, 2021. 42 с.
18. СП 119.13330.2024 Железные дороги колеи 1520 мм : утв. приказом Минстроя РФ № 432/пр от 01.07.2024. Введ. 2024–08–02. М. : Минстрой России, 2024. 228 с.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» (red. 06.11.2024) [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035» (ed. November 6, 2024)].
2. Mneniya i otsenki. Kompozity prikhodyat na zheleznuyu dorogu (Elektronnyi resurs) [Opinions and ratings. Composites are coming to the railway (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1571044/> (Accessed August 18, 2025).
3. Lutskii S.Ya., Shmelev V.A., Burukin A.Yu., Khripkov K.N. Eksperimental'naya tekhnologiya v geotekhnike [Experimental technology in geotechnics]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2012, no 11, pp. 17–20.
4. 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.
5. 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.
6. 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 Baikal-Amur magistral]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, Vol. 1, pp. 168–175.
7. Valiev N.A. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Materialy Desyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Tenth International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2019, Vol. 1, pp. 538–541.
8. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V., Vedernikova M.A. Ispol'zovanie sinteticheskikh teploizolyatorov dlya sokhraneniya merzlotnykh uslovii v osnovanii zheleznodorozhnoi nasypi [Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2008, Vol. 12, no 2, pp. 84–89.
9. Sabel'nikov K.I. Tumanov D.O. Nedostatki soderzhaniya plit penopolistirola v usloviyakh ekspluatatsii na zheleznoi doroge [Disadvantages of the content of expanded polystyrene slabs in railway operation]. *Nauchnyi aspekt* [Scientific aspect], 2024, Vol. 51, no 6, pp. 6493–6499.
10. Shavanov N.D., Pankov P.P., Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Evsyukov S.A., Avseenko N.D., Fatkulov A.A., Lushpei V.P. Utilizatsiya parovoznykh shlakov v sostavakh kompozitsionnykh materialov dlya usileniya zemlyanogo polotna

zheleznodorozhnogo puti [Recycling of steam slag in composite materials to strengthen railway subgrades]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of modern science and practice. V.I. Vernadskii University], 2024, no 1 (91), pp. 63–73.

11. Tumanov D.O., Koven'kin D.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya materiala na osnove zoloshlakovykh otkhodov dlya usileniya osnovaniya zemlyanogo polotna [Analysis of the possibility of using a material based on ash and slag waste to strengthen the foundation of the roadbed]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Zheleznodorozhnyi transport i tekhnologii (RTT-2023)»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Railway Transport and Technology (RTT-2023)»]. Ekaterinburg, 2023, iss. 1 (256), pp. 160–163.

12. Shavanov N.D. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vovlecheniya zoloshlakovykh otkhodov v dorozhnoe stroitel'stvo [Feasibility study of the involvement of ash and slag waste in road construction]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie malogo predprinimatel'stva v Baikal'skom regione»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Development of small business in the Baikal region»]. Irkutsk, 2022, pp. 247–252.

13. Konovalova N.A., Meleshin E.E., Shavanov N.D. Izuchenie svoystv zoloshlakovykh smesei dlya utilizatsii v sostavakh dorozhno-stroitel'nykh materialov [Researching of the properties of ash and slag mixtures for disposal in road construction materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Biologicheskie i geograficheskie aspekty ekologii cheloveka»* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference «Biological and geographical aspects of human ecology»]. Syktyvkar, 2022, pp. 60–64.

14. Ivanov E.V., Isakov A.L., Sirotuk V.V. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie promerzaniya zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoi smesi [Experimental investigation and mathematical modeling of freezing of an ground bed from an ash and slag mixture]. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy], 2013, no 3 (31), pp. 71–76.

15. Frost 3D Universal Inzhenernye raschety pri proektirovanii na mnogoletnemerzlykh gruntakh (Elektronnyi resurs) [Frost 3D Universal Engineering calculations in the design of permafrost soils (Electronic resource)]. Available at: <https://simmakers.ru/wp-content/uploads/2014/03/teplotechnicheskie-rashoti-v-stroitelstve1.pdf> (Accessed August 26, 2025).

16. SP 447.1325800.2019 Zheleznye dorogi v rayonakh vechnoi merzloty. Osnovnye polozeniya proektirovaniya (red. 09.02.2023) [Set of rules 447.1325800.2019 Railways in the permafrost areas. General positions of projecting (ed. February 9, 2023)]. Moscow: Minstroj Rossii Publ., 2019. 58 p.

17. SP 498.1325800.2020 Osnovaniya i fundamenty zdaniy i sooruzhenii na mnogoletnemerzlykh gruntakh. Trebovaniya k inzhenernoi podgotovke territorii [Set of rules 498.1325800.2020 Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Requirements for land development of the area]. Moscow: Minstroj Rossii Publ., 2020. 42 p.

18. SP 119.13330.2024 Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [Set of Rules 119.13330.2024 Railways of 1520 mm gauge]. Moscow: Minstroj Rossii Publ., 2024. 228 p.

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.

Туманов Дмитрий Олегович, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

Ходырев Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: hod1959@mail.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 O. Tumanov, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

Yurii A. Khodyrev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: hod1959@mail.ru.