

УДК

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-??-??>

И.В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru),
Е.А. КОРОТКОВ¹, канд. техн. наук (ev.korotkov@bk.ru);
И.С. ГОВРЯКОВ^{1,2}, ведущий инженер, аспирант (govr190@mail.ru);
Э.А. ГОРБУНОВА^{1,2}, инженер, магистрант (eg15082000@mail.ru);
Д.Р. ТАЙЧИНОВ², студент (din2004ar@gmail.com)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Исследование и оценка теплозащитных свойств щебня из пеностекла при использовании его в проблемных грунтах

В работе исследованы теплозащитные свойства пеностекляного щебня на основе диатомита и стеклобоя и дана оценка их применимости в составе дорожного полотна в условиях районов вечной мерзлоты. Проведены экспериментальные определения теплотехнических параметров пеностекляного щебня, изготовленного из стеклобоя и из диатомита, в том числе: насыпная плотность, эксплуатационная плотность, прочность при сдавливании в цилиндре при заданной эксплуатационной плотности, теплопроводность. Изучены теплофизические характеристики засыпки из пеностекляного щебня на основе стеклобоя при 30%-й степени уплотнения. Определены значения теплопроводности пеностекляного щебня в сухом, мерзлом и талом состоянии. Полученные экспериментальные данные явились основой для компьютерного моделирования и расчета температурных полей грунтов с конструкцией дорожного покрытия на территории распространения многолетнемерзлых грунтов (Республика Саха (Якутия)). Проведен расчет изменения температурного режима с прогнозированием на 12 мес. Для сравнения представлен расчет аналогичной дорожной конструкции без теплоизолирующего слоя, с применением крупного песка. Результаты расчетов показывают эффективность использования засыпки из пеностекляного щебня в конструкции дорожной одежды; установлено, что теплоизоляционный слой из пеностекляного щебня препятствует размораживанию слоя многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: негорючие пористые материалы, пеностекляный щебень на основе стеклобоя, пеностекляный щебень на основе диатомита, многолетнемерзлые грунты, температурные поля.

Для цитирования: Бессонов И.В., Коротков Е.А., Говряков И.С., Горбунова Э.А., Тайчинов Д.Р. Исследование и оценка теплозащитных свойств щебня из пеностекла при использовании его в проблемных грунтах // *Строительные материалы*. 2024. № 6. С. 00–00. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-00-00>

I.V. BESSONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru), E.A. KOROTKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (the_djon@bk.ru); I.S. GOVRYAKOV^{1,2}, lead engineer, PhD student (govr190@mail.ru), E.A. GORBUNOVA^{1,2}, Engineer, Master's degree student (eg15082000@mail.ru); D.R. TAICHINOV², student (din2004ar@gmail.com)

¹ Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Researching and Evaluation of Thermal Properties of Foamed Glass Crushed Stone in Conditions of Problem Soils

The purpose of the work was to study the heat-protective qualities of foam glass crushed stone based on diatomite and cullet and to assess its applicability as part of the roadway in permafrost areas. Experimental definitions of thermal engineering parameters of foam glass crushed stone made of cullet and diatomite, including bulk density, operational density, compressive strength in a cylinder at a given operational density, thermal conductivity, have been carried out. The thermophysical characteristics of backfilling from foam glass crushed stone based on cullet at a 30% degree of compaction have been studied. The values of thermal conductivity of foam glass crushed stone in dry, frozen, and thawed conditions are determined. The experimental data obtained were the basis for computer modeling and calculation of soil temperature fields with a pavement structure in the territory of permafrost distribution (Republic of Sakha, Yakutia). The calculation of the temperature regime change with a forecast for 12 months was carried out. For comparison, the calculation of a similar road structure without a thermal insulation layer, using coarse sand, is presented. The calculation results show the effectiveness of using foam glass rubble filling in the construction of the pavement; it was found that the thermal insulation layer of foam glass rubble prevents the defrosting of a layer of permafrost soils.

Keywords: non-combustible porous materials, foam glass crushed stone based on cullet, foam glass crushed stone based on diatomite, permafrost soils, temperature fields.

For citation: Bessonov I.V., Korotkov E.A., Govryakov I.S., Gorbunova E.A., Taichinov D.R. Researching and evaluation of thermal properties of foamed glass crushed stone in conditions of problem soils. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2024. No. 6, pp. 00–00. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-00-00>

Ежегодно повышается актуальность использования теплоизоляционных материалов на основе вспененных силикатных составов [1]. Развивается направление проектирования экологических негорючих пористых теплоизоляционных материалов, среди них: изделия из пеностекла; материалы на основе вспененного жидкого стекла, полученные методом холодного отверждения и методом СВЧ обработ-

ки [2–4]. Теплоизоляция из пеностекла отличается негорючестью, способностью выдерживать высокую температуру с минимальным изменением эксплуатационных характеристик. Отмечается высокая, для теплоизоляционных материалов, прочность, при низких значениях теплопроводности [1]. Преимуществом пеностекла по сравнению с некоторыми искусственными изоляционными материалами является

ся его неорганический состав. Как и всякое стекло, пеностекло устойчиво к действию гнили, микроорганизмов, насекомых и грызунов, совершенно не горит, характеризуется постоянством объема и устойчиво к действию воды и всех химических реагентов за некоторыми исключениями (плавиковая кислота) [5]. Группу материалов из пеностекла также можно отнести к экологичным, так как основной сырьевой компонент составляют обработанные отходы стеклобоя, что решает проблему переработки вторичного сырья. Также активно развивается направление использования природного сырья – диатомита для варки стекла и его дальнейшего вспенивания.

По типу производимой продукции пеностекло подразделяют на сыпучие материалы (щебень, гранулированное и микрогранулированное пеностекло), блоки, плиты, фасонные изделия сложной геометрической формы, уклонообразующие изделия. Расширение сферы использования пеностеклового щебня обуславливает увеличение объемов его производства, строительство новых заводов с привязкой к местной сырьевой базе. Основной объем производства щебня на данный момент составляет щебень на основе стеклобоя. Но так как необходимые объемы производства щебня превышают объемы отходов стекла, появилось направление развития производства пеностеклового щебня на основе природного диатомита.

Диатомит – осадочная горная порода, состоящая из кремнистых раковин микроскопических водорослей – диатомей. Диатомиты содержат 70–85% кремнезема, добываются открытым способом и их запас практически не ограничен [6, 7]. Такой источник сырья можно отнести к медленно исчерпаемым природным ресурсам.

В настоящее время для пеностеклового щебня актуальны следующие сферы применения: теплоизоляционный слой в автомобильных дорогах, в условиях многолетнемерзлых грунтов [10–12], в качестве утеплителя-засыпки, дренажа фундаментов, при устройстве теплых полов, создании уклонообразую-

щего слоя, в качестве наполнителя для легких бетонов, а также при устройстве звукоизоляции.

Расширение сферы применения обуславливает необходимость более детального исследования свойств пеностеклового щебня как на основе стеклобоя, так и на основе природного сырья – диатомита при различных условиях эксплуатации, в том числе в конструкции дорожного покрытия. Особое внимание уделяют исследованию применения пеностеклового щебня в районах проблемных многолетнемерзлых и пучинистых грунтов [8, 9].

Материалы и методы

В работе проведена оценка эффективности использования пеностеклового щебня на основе стеклобоя и специально сваренного стекла из диатомита в качестве тепловой защиты в системе дорожного покрытия в условиях применения в проблемных грунтах. Основные физико-механические показатели определялись при степени уплотнения, составляющей эксплуатационную плотность.

Прочность и теплопроводность пеностеклового щебня определяли после предварительного уплотнения до состояния эксплуатационной плотности. Эксплуатационную плотность $\rho_{\text{э}}$ (кг/м³) щебня из пеностекла определяли по формуле:

$$\rho_{\text{э}} = k_{\text{у}} \cdot \rho_{\text{т}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – насыпная транспортная плотность; $k_{\text{у}}$ – выбранный коэффициент уплотнения (1,1; 1,2 или 1,3).

Насыпную транспортную плотность $\rho_{\text{т}}$, кг/м³, определяли по формуле:

$$\rho_{\text{т}} = m/V, \quad (2)$$

где m – масса щебня, засыпанного в мерную емкость по уровню верхних кромок без встряхивания и уплотнения, кг.

Плотность эксплуатационная определяется как отношение коэффициента уплотнения к насыпной транспортной плотности ($k_{\text{у}}:1$). Определены эксплуатационные характеристики щебня пористого из

Таблица 1
Table 1

Теплофизические характеристики щебня
Thermophysical characteristics of crushed stone

Показатель	Метод испытания	Пеностеклольный щебень из диатомита	Пеностеклольный щебень из стеклобоя
Насыпная плотность, кг/м ³	ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний»	210±5%	140±5%
Плотность эксплуатационная при уплотнении на 20% (1,2:1), кг/м ³	ГОСТ Р 59574–2021 «Щебень на основе пеностекла. Технические условия»	250±5%	168±5%
Прочность при сжатии при уплотнении на 20% (1,2:1), кПа, при 10% относительной деформации		800	1000
Теплопроводность в засыпке в сухом состоянии при степени уплотнения 1,2:1, Вт/(м·°С)		0,095	0,086

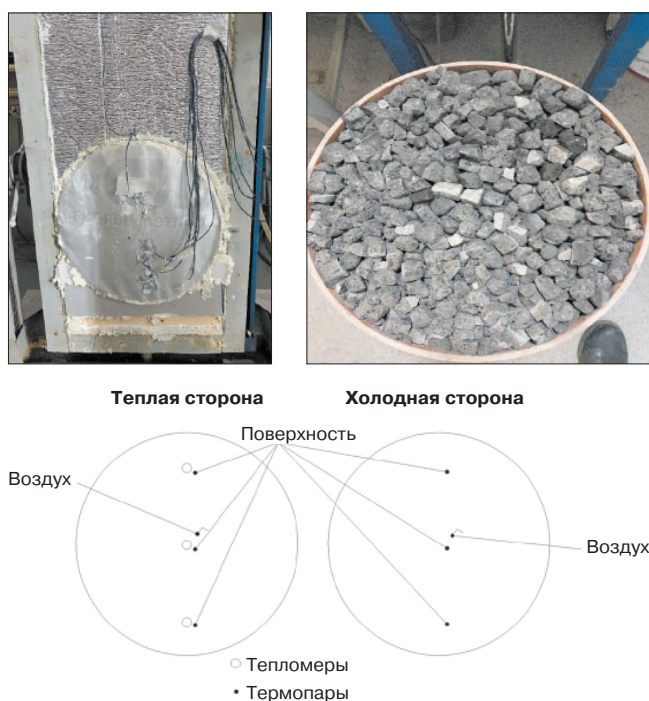


Рис. 1. Экспериментальные определения теплопроводности пеностеклянного щебня на основе стеклобоя в сухом, мерзлом, талом состоянии при уплотнении 1,3

Fig. 1. Experimental determination of thermal conductivity of foam glass crushed stone based on cullet in a dry, frozen, thawed state during compaction of 1,3

аморфных кремнеземных пород (диатомита) и щебня на основе стеклобоя. Сравнительные результаты испытаний представлены в табл. 1.

Теплопроводность щебня из пеностекла в состоянии эксплуатационной плотности определяли по методике ГОСТ Р 59574–2021 (рис. 1). Изучены теплофизические свойства в условиях мерзлого и талого состояния щебня из пеностекла на основе стеклобоя, уплотненного на 30%. Мерзлое состояние пеностеклянного щебня достигается за счет увлажнения при полном погружении в воду в течение 24 ч и последующего выдерживания в холодной зоне при температуре $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ до полного промораживания. Талое состояние достигается за счет выдерживания на воздухе при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 24 ч после этапа промораживания.

Испытание проводили в климатической камере, обеспечивающей температурный режим в холодной зоне -20°C , в теплой зоне $+20^\circ\text{C}$.

На наружную (грань образца засыпки, обращенную в холодную зону) и внутреннюю (грань образца

засыпки, обращенную в теплую зону) грани каждого образца устанавливали датчики температуры. На внутреннюю грань устанавливали преобразователи (датчики) теплового потока по ГОСТ 25380–2014. После установления стационарного теплового режима проводили не менее десяти измерений температуры и плотности теплового потока с периодичностью 0,5 ч. По результатам испытаний определяли термическое сопротивление засыпки R_k , $\text{m}^2 \cdot \text{C} / \text{Вт}$, по формуле:

$$R_k = \Delta t / q_{cp}, \quad (3)$$

где $\Delta t = t_B - t_H$ – разность температуры поверхностей фрагмента засыпки, $^\circ\text{C}$; q_{cp} – среднее значение плотности теплового потока через испытуемый образец засыпки, $\text{Вт} / \text{м}^2$.

По значению R_k вычисляли эквивалентный коэффициент теплопроводности засыпки λ по формуле:

$$\lambda = \delta / R_k, \quad (4)$$

где δ – толщина засыпки, м.

Приведены результаты экспериментальных определений теплофизических характеристик пеностеклянного щебня на основе стеклобоя в сухом, мерзлом и талом состоянии (табл. 2).

Полученные экспериментальные данные были использованы при проведении расчетов температурной стабилизации грунтов.

Далее представлен пример проектного решения состава дорожного полотна с применением пеностеклянного щебня с целью исследования температурных полей грунтов и дорожного полотна. Приведено сравнение с наиболее распространенным выравнивающим слоем дорожного полотна – песком. Также была проведена проверка температуростойкости дорожного полотна в местах многолетнемерзлых грунтов Республики Саха (Якутия).

При недостаточной температуростойкости запроектированной конструкции дорожного пирога следует рассмотреть возможные варианты использования существующих слоев дорожной одежды путем наращивания новых слоев, в том числе включение мероприятий по улучшению трещиностойкости нового покрытия (синтетические материалы, геосетки и т. д.) [13, 14]. Также необходимо произвести расчет новой конструкции дорожного полотна с устройством морозозащитных слоев из непучинистых грунтов, зернистых материалов или с использованием теплоизолирующих материалов [15–18].

Таблица 2
Table 2

Результаты по определению теплопроводности пеностеклянного щебня из стеклобоя
Results on determining the thermal conductivity of foam glass crushed stone from cullet

Пеностеклянный щебень, марки по плотности D180								
Состояние	$K_y, \%$	$t_{\text{внутр.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нар.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$q, \text{Вт} / \text{м}^2$	$R_{\text{ш}}, \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$	$\delta_{\text{ш}}, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$
Сухой	30	17,19	-16,17	33,35	6,568	4,9179	0,3	0,061
Мерзлый	30	14,35	-13,68	28,02	41,4	0,5168	0,3	0,5804
Талый	30	17,74	-19,59	37,33	31,01	1,0438	0,3	0,2874

Таблица 3
Table 3

Инженерно-геологические элементы (ИГЭ)
по скважинам 1, 2 и 3
Engineering and geological elements (IGE) for wells 1, 2, 3

№ скважины	Глубина кровли, м	Мощность слоя, м	Описание ИГЭ
1	3,2	3,2	Грунт насыпной щебенистый
	5,2	2	Суглинок твердомерзлый слабольдистый
	20,06	14,86	Известняк твердомерзлый
2	3,6	3,6	Грунт насыпной щебенистый
	6,2	2,6	Суглинок твердомерзлый слабольдистый
	20,4	14,2	Известняк твердомерзлый
3	2,8	2,8	Грунт насыпной щебенистый
	5,2	2,4	Древсяный грунт
	19,8	14,6	Известняк твердомерзлый

В качестве теплоизолирующего слоя исследована засыпка в виде щебня из пеностекла в состоянии эксплуатационной плотности. Расчет был проведен с учетом коэффициента уплотнения 1,3. Прогнозное моделирование температурного поля грунтов оснований осуществлялось численными методами. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса Борей 3D (сертифицирован, соответствует требованиям СП 25.13330.2012 (СНиП 2.02.04–88), РСН 67–87)).

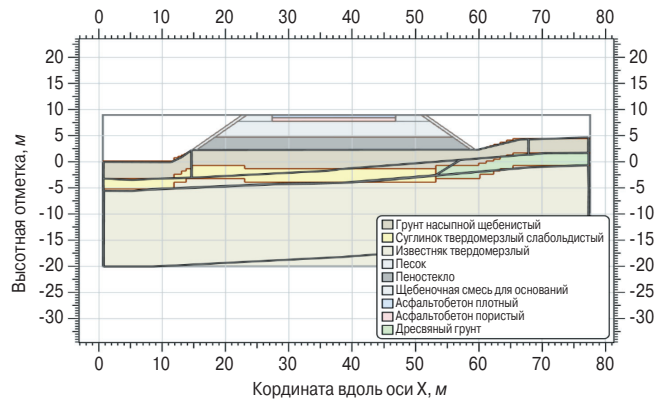


Рис. 2. Распределение грунтов и материалов в расчетной области
Fig. 2. Distribution of soils and materials in the computational domain

Оценка основных элементов климата выполнена на основании материалов наблюдений Объединенной гидрометеорологической станции (ОГМС ЯКУТСК) и на основании СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» по населенному пункту г. Якутск, Республика Саха (Якутия).

Анализ материалов по климатическим данным для метеостанции показывает устойчивый тренд на потепление температуры воздуха. В связи с этим в расчетах принят показатель увеличения температуры воздуха 0,04°C/г. [19], что соответствует 1°C за 25 лет.

Многолетнемерзлые грунты представлены суглинками, глинами и реже песками. Инженерно-

Таблица 4
Table 4

Свойства грунтов и материалов
Properties of soils and materials

Слой	Плотность грунта в сухом состоянии	Суммарная влажность	Степень засоленности	Число пластичности	Влажность на границе раскатывания	Температура начала замерзания	Теплопроводность талого грунта	Теплопроводность мерзлого грунта	Объемная теплоемкость талого грунта	Объемная теплоемкость мерзлого грунта	Коэффициенты кривой незамерзшей воды			Теплота фазового перехода
	ρ_{df}	W_{tot}	D_{sal}	I_p	W_p	T_{bf}	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	A	B	C	Q_f
	кг/м ³	д. е.	%	д. е.	д. е.	°C	Вт/(м·К)	Вт/(м·К)	МДж/м ³	МДж/м ³	–	–	–	МДж/м ³
Грунт насыпной щебенистый	1180	0,13	0,645	0,087	0,085	-0,2	1,99	1,39	2,28	2,78	-0,00881	1,33849	9,44264	–
Суглинок твердомерзлый слабольдистый	1450	0,29	–	0,088	0,256	-0,2	2,04	1,43	2,17	3,01	0,0829	0,10728	0,89837	–
Известняк твердомерзлый	2110	0,09	–	–	–	0	1,75	1,15	1,7	2,09	–	–	–	16
Древсяный грунт	1920	0,07	–	0,059	0,054	-0,2	2,34	1,74	2,25	2,67	0,01347	0,01942	0,67294	–
Пеностекло D180	180	0	–	–	–	–	–	0,06	–	0,16	–	–	–	–
Песок	1700	0,2	–	–	–	-0,1	2,41	2,78	2,7	1,94	–	–	–	85,4
Щебеночная смесь для оснований	1800	0,1	–	–	–	-0,1	1,85	2,2	2,26	1,8	–	–	–	16
Асфальтобетон пористый	2000	0,05	–	–	–	-0,1	1,15	1,25	1,92	1,78	–	–	–	16,1
Асфальтобетон плотный	2200	0,03	–	–	–	-0,1	1,3	1,4	3,68	3,39	–	–	–	16,1

Примечание. А, В, С – коэффициенты уравнения $W_w(t)=A+B/(C-t)$, где t – температура, °C.

Таблица 5
Table 5Значения граничных условий «Республика Саха»
Values of the boundary conditions of the Sakha Republic

Показатель	Месяцы											
	январь	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сентяб.	окт.	нояб.	дек.
Температура воздуха, °С	-39,2	-34,7	-20,5	-4,8	7,5	16,2	19,3	15,2	5,9	-7,9	-27,8	-37,8
Скорость ветра, м/с	0,4	0,7	0,9	1,6	2,3	1,9	1,9	1,9	2,3	2,2	1,2	0,9
Теплоотдача, Вт/(м ² ·К)	3,29	4,01	4,49	6,17	7,85	6,89	6,89	6,89	7,85	7,61	5,21	4,49
Толщина снега, см	22	28	33	29	12	–	–	–	–	3	7	16
Плотность снега, кг/м ³	130	140	149	170	400	–	–	–	–	95	103	119
Теплопроводность снега, Вт/(м ⁰ ·К)	0,091	0,095	0,1	0,111	0,404	–	–	–	–	0,082	0,083	0,087
Результирующий коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°К)	0,367	0,314	0,283	0,36	2,356	6,89	6,89	6,89	7,85	2,006	0,967	0,487

геологические условия для прогнозного расчета приняты по скважинам: № 1, 2, 3. Инженерно-геологический разрез исследуемого участка грунтов и дорожного полотна приведен на рис. 2. Инженерно-геологические элементы, выделенные в разрезе по скважинам, приведены в табл. 3.

Теплофизические свойства грунтов рассчитаны согласно требованиям СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах». Свойства грунтов по скважинам приведены в табл. 4.

Прогнозное моделирование температурного поля грунтов осуществлялось численными методами с учетом требований к порядку составления прогноза изменения температурного режима грунтов СП 25.13330.2020 (п. 4.1, 4.4, 6.3.1, 7.1.1); РСН 31–83 «Нормы производства инженерно-геологических изысканий для строительства на вечномёрзлых грунтах» (п. 1.6, 2.35, 3.15–3.19, 4.16–4.19), РСН 67–87 «Инженерные изыскания для строительства, составление прогноза изменений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами».

Составление прогноза температурного режима грунтов осуществлялось в трехмерной постановке. Моделируемая область являлась трехмерным параллелепипедом, ограниченным сверху дневной поверхностью, снизу – плоскостью, расположенной на достаточно большой глубине, чтобы не оказывать влияния на температурное поле в интересующей части области. На нижней и боковых гранях расчетной области задавался нулевой тепловой поток. Боковые грани располагались по условию симметрии или были удалены на достаточно большое расстояние, при котором вблизи грани формировалось безградиентное в горизонтальной плоскости температурное поле, соответствующее естественному тепловому режиму на открытом участке дневной поверхности.

Размеры области определяли конструктивно-техническими особенностями рассматриваемого объекта (геотехнической системы), расчетным сроком моделирования, а также симметричностью тепловых расчетов в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси, проходящей через геометриче-

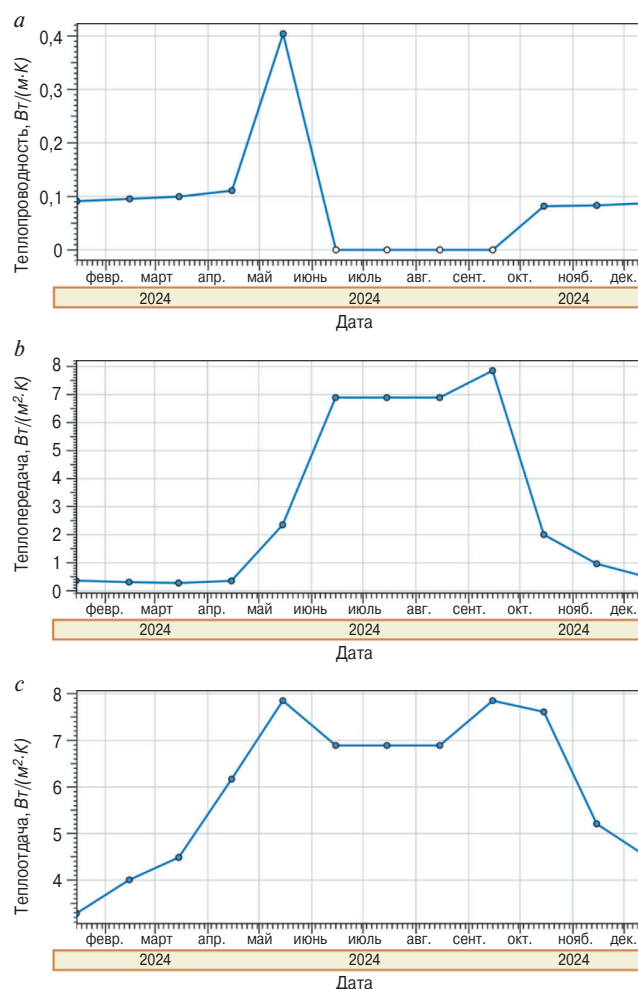


Рис. 3. Значения условий теплообмена (граничных условий) «Республики Саха»: а – значения теплопроводности снега; б – значения теплопередачи; с – значения теплоотдачи

Fig. 3. Graphs of the values of heat transfer conditions (boundary conditions) of the Sakha Republic: a – values of thermal conductivity of snow; b – values of heat transfer; c – values of heat transfer

ский центр исследуемого объекта. Положение нижней и боковых границ выбиралось не менее чем на 20 м больше размеров моделируемого сооружения. При этом положение боковых граней должно быть больше расстояния теплового влияния инженерных сооружений в плане за расчетный срок прогноза.

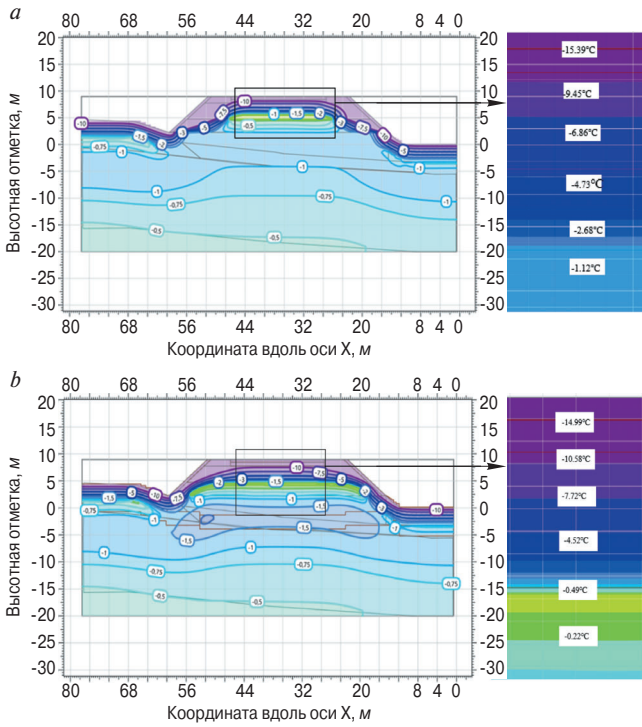


Рис. 4. Распределение температуры по грунту и дорожной конструкции (на 15.01.2024): *a* – дорожная конструкция с применением щебня из пеностекла; *b* – дорожная конструкция без теплоизолирующего слоя (с применением песка)

Fig. 4. Temperature distribution over the ground and road structure (01/15/2024): *a* – road construction using crushed foam glass; *b* – road construction without a thermal insulation layer (using sand)

Расчетная область разделялась на зоны, в пределах которых можно считать постоянными граничные условия, характеризующиеся температурой среды и интенсивностью (условиями) теплообмена.

Расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами 77×5×29 м (по осям X, Y, Z соответственно). Область исследования разбивалась на расчетную сетку (прямоугольные элементы произвольных размеров). Разбивка расчетной области на расчетную сетку осуществлялась ортогональными плоскостями с неравномерным шагом. Размеры ячеек расчетной сетки по оси X изменялись от 0,1 до 1 м; по оси Y изменялись от 0,1 до 1 м; по оси Z изменялись от 0,1 до 3 м.

Инженерно-геологические условия приняты по скважинам № 1, 2 и 3. Распределение грунтов по разрезу и их свойства показаны на рис. 2.

Начальные условия (температура грунта на дату запуска расчета) приняты по скважинам № 1, 2 и 3.

На верхней границе расчетной области задавались следующие граничные условия: теплообмен по умолчанию «Республика Саха». На нижней границе и на боковых границах расчетной области – граничные условия 2-го рода, тепловой поток равен нулю.

Для моделирования инженерных сооружений в виде трехмерных объектов задавались следующие граничные условия.

Условие теплообмена «Республика Саха» представляет собой граничное условие 3-го рода. Значения условий теплообмена (граничных условий) «Республика Саха» приведены в табл. 5.

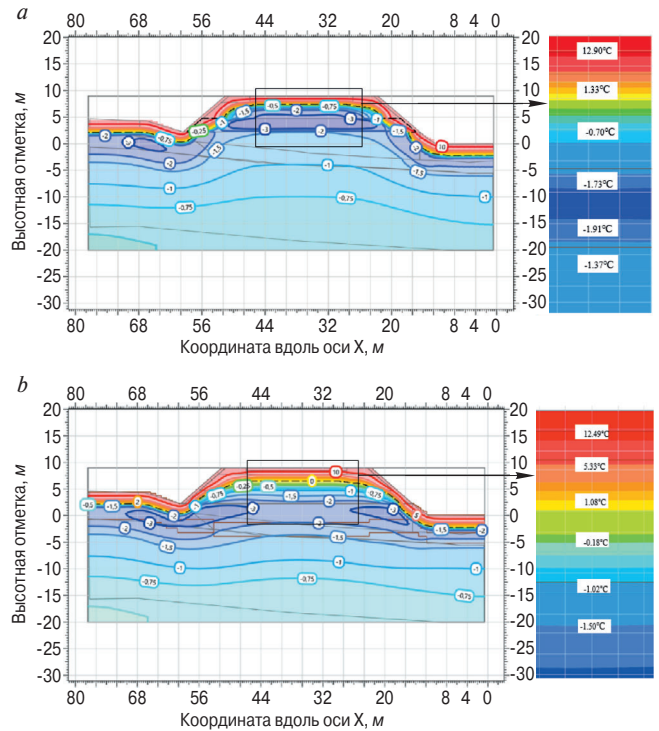


Рис. 5. Распределение температуры по грунту и дорожной конструкции (на 15.07.2024): *a* – дорожная конструкция с применением щебня из пеностекла; *b* – дорожная конструкция без теплоизолирующего слоя (с применением песка)

Fig. 5. Temperature distribution over the ground and road structure (07/15/2024): *a* – road construction using crushed foam glass; *b* – road construction without a thermal insulation layer (using sand)

Графики значений условий теплообмена (граничных условий) «Республика Саха» приведены на рис. 3.

Результаты и обсуждения

Результаты прогнозного расчета по сечению расчетной области представлены в графической форме на рис. 4 и 5.

Приведены результаты компьютерного моделирования температурных полей грунтов и дорожного полотна с применением теплоизолирующего слоя в виде щебня из пеностекла. Расчет выполнен с прогнозом на 12 мес. На рис. 4 и 5 представлено распределение температуры по грунту и дорожной насыпи в январе и июле. Выбор месяцев сделан по принципу самого холодного и самого теплого месяца года на основании СП 131.13330 по населенному пункту г. Якутск, Республика Саха (Якутия). Приведено сравнение двух вариантов проектных решений дорожного полотна: с применением щебня из пеностекла в качестве теплоизолирующего слоя и без него (с применением слоя песка).

Графическое представление распределения температурных полей показало, что в зимний период существенных изменений теплоизолирующий слой в виде пеностекляного щебня не вносит.

Результаты расчета температурных полей с прогнозированием на летний период представлены на рис. 5. На графике можно видеть, что в конструкции дорожного полотна в местах заложения теплоизолирующего слоя щебня из пеностекла в верхней части

насыпи и откосах сохраняется низкотемпературное поле от -3 до -2° . Таким образом, за счет теплоизолирующего слоя из пеностекляного щебня сохраняется низкотемпературное поле многолетнемерзлых грунтов, что препятствует их размораживанию.

В случае же применения песка происходит прогревание верхних слоев дорожной конструкции с переходом на нижние слои и затем на грунты, тем самым приводят к их оттаиванию.

Заключение

По итогам проведения экспериментальных исследований проведено сравнение теплофизических характеристик щебня на основе стеклобоя и на основе специально сваренного стекла из диатомита. Предложены примеры проектных решений изоляции дорожных систем на проблемных грунтах и получена оценка этих решений с помощью моделирования температурных полей в теле дорожной насыпи. Графики распределения температурных полей в летнее время показали рациональность использования щебня из пеностекла в виде теплоизолирующего слоя в верхних слоях дорожной насыпи. Применение

засыпки из пеностекляного щебня препятствует размораживанию слоя многолетнемерзлых грунтов, что соответственно сохраняет конструкцию от разрушения. На основании полученных экспериментальных исследований и проведенного моделирования с расчетом температурных полей можно сделать заключение об эффективности использования пеностекляного щебня на основе стеклобоя и пеностекляного щебня на основе диатомита в качестве тепловой изоляции в составе дорожного полотна в зонах вечной мерзлоты.

Россия усиливает освоение арктических и северных регионов в связи с наличием там огромного количества месторождений (нефть, газ, уголь, алмазы, золото, редкие металлы и многое другое). В том числе это связано с усилением торговых и экономических связей с Востоком. Производство и применение теплоизоляционных материалов на основе местной сырьевой базы необходимо для активного освоения холодных регионов России, в том числе для строительства транспортной инфраструктуры (авто- и ж/д дороги), для строительства вахтовых поселков и новых городов.

Список литературы

1. Шубин И.Л., Умнякова Н.П., Бессонов И.В., Спиридонов А.В. Перспективы применения материалов и изделий из пеностекла в системах тепловой изоляции // *Бюллетень строительной техники (БСТ)*. 2017. № 6. С. 12–14.
2. Бессонов И.В., Бруяко М.Г., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Исследование модифицирующих добавок вспененного жидкого стекла // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 16–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>
3. Бруяко М.Г., Бессонов И.В., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Теплоизоляционный материал на основе вспененного жидкого стекла холодного отверждения. *Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник материалов семинара молодых ученых XXVI Международной научной конференции*. Ташкент, 26–28 апреля 2023 г. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. С. 49–52.
4. Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Горбунова Э.А. Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15. № 5. С. 424–437. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437>
5. Жуков А.Д. Технология теплоизоляционных материалов. Ч. 1. Теплоизоляционные материалы. Производство теплоизоляционных материалов: Учебное пособие. М.: Издательство МГСУ, 2011. 430 с.
6. Мелконян Р.Г., Власова С.Г. Экологические и экономические проблемы использования стекло-

References

1. Shubin I.L., Umnyakova N.P., Bessonov I.V., Spiridonov A.V. Prospects for the use of materials and products made of foam glass in thermal insulation systems. *Byulleten' stroitel'noy tekhniki (BST)*. 2017. No. 6, pp. 12–14. (In Russian).
2. Bessonov I.V., Bruyako M.G., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Research of modifying additives of foamed liquid glass. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 6, pp. 16–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>
3. Bruyako M.G., Bessonov I.V., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Thermal insulation material based on cold-curing foamed liquid glass. *Construction – the formation of a living environment: a collection of materials from the seminar of young scientists of the XXVI International Scientific Conference*. Tashkent, April 26–28, 2023. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2023, pp. 49–52. (In Russian).
4. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Gorbunova E.A. Study of the performance qualities of foam materials based on cold-curing liquid glass. *Nanotechnologies in construction: scientific online journal*. 2023. Vol. 15. No. 5, pp. 424–437. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437>
5. Zhukov A.D. Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov. Chast' 1. Teploizolyatsionnyye materialy. Proizvodstvo teploizolyatsionnykh materialov. Uchebnoye posobiye [Technology of thermal insulation materials. Part 1. Thermal insulation materials. Production of thermal insulation materials. Tutorial]. Moscow: MSUCE Publishing House. 2011. 430 p.
6. Melkonyan R.G., Vlasova S.G. Ekologicheskiye i ekonomicheskiye problemy ispol'zovaniya steklo-

- боя в производстве стекла: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 100 с.
7. Иванов К.С., Радаев С.С., Селезнева О.И. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла // *Стекло и керамика*. 2014. № 5. С. 15–19.
 8. Типовые решения по восстановлению несущей способности земляного полотна и обеспечению прочности и морозостойкости дорожной одежды на пучинистых участках автомобильных дорог. Разработаны ОАО «Гипродорнии», ГП «Росдорнии». Утверждены распоряжением Росавтодора от 14.06.2000 № 113-р.
 9. Дегтярь А.А., Юшков Б.С. Конструкция земляного полотна на слабых пучинистых грунтах // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2014. № 4. С. 6–26.
 10. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 1. С. 14–17.
 11. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. и др. Исследования теплоизоляционных свойств щебня из пеностекла в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых и пучинистых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 2. С. 12–15.
 12. Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Агафонова Н.З., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Проектные решения и моделирование температурных полей в системах теплоизоляции в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2023. № 3. С. 32–34.
 13. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature effect on the compressive strength of frozen soils: a review. In: Wu W. (eds) *Recent Advances in Geotechnical Research*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19
 14. Галкин А.Ф. Определение допустимой глубины оттаивания дорожного полотна в криолитозоне // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021. № 5. С. 18–22. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-5-18-22
 15. Давыдов В.А., Бондарева Э.Д. Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах. Омск: ОГПИ, 1989. 183 с.
 16. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone // *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399. <https://doi.org/10.5937/jaes0-34379>
 17. Галкин А.Ф., Плотников Н.А. Выбор строительных материалов для теплоизоляционного слоя дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64>
 18. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне // *Строительные материалы*. 2021. № 7. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
 19. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2008. 230 с.
 - boya v proizvodstve stekla: uchebnoye posobiye [Environmental and economic problems of using cullet in glass production: a textbook]. Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2013. 100 p.
 7. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. Diatomites in granulated foam glass technology. *Steklo i keramika*. 2014. No. 5, pp. 15–19. (In Russian).
 8. Standard solutions for restoring the bearing capacity of the roadbed and ensuring the strength and frost resistance of road pavement on heaving sections of roads. Developed by JSC Giprodornii, State Enterprise Rosdornii. Approved by decree of Rosavtdor dated June 14, 2000. N 113-r. (In Russian).
 9. Degtyar A.A., Yushkov B.S. Construction of subgrade on weak heaving soils. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya*. 2014. No. 4, pp. 6–26. (In Russian).
 10. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Analysis of design solutions depending on the type of insulating materials in road pavements in permafrost soils. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2022. No. 1, pp. 14–17. (In Russian).
 11. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu. at al. Research of the thermal insulation properties of crushed stone made of foam glass in the bases of highways in permafrost and heaving soils. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2022. No. 2, pp. 12–15. (In Russian).
 12. Bessonov I.V., Bobrova E.Yu., Agafonova N.Z., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Design solutions and modeling of temperature fields in thermal insulation systems in the foundations of highways in permafrost soils. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2023. No. 3, pp. 32–34. (In Russian).
 13. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature effect on the compressive strength of frozen soils: a review. In: Wu W. (eds) *Recent Advances in Geotechnical Research*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19
 14. Galkin A.F. Determination of the permissible depth of thawing of the roadway in the permafrost zone. *Energobezopasnost' i energosberezheniye*. 2021. No. 5, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-5-18-22>
 15. Davydov V.A., Bondareva E.D. Izyskaniya i proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Surveys and design of highways on permafrost soils]. Omsk: OGPI. 1989. 183 p.
 16. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399. <https://doi.org/10.5937/jaes0-34379>
 17. Galkin A.F., Plotnikov N.A. Selection of building materials for the thermal insulation layer of road clothing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 57–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64>
 18. Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Increasing the thermal stability of the embankment in permafrost regions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 7, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
 19. Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Permafrost monitoring]. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO". 2008. 230 p.