

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ В АРКТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

В. П. Мельников

Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН, АНО «Губернская академия» (Тюмень, Российская Федерация)

А. А. Мельникова

Природно-реабилитационный комплекс «ГНЕЗДО» (Тюмень, Российская Федерация)

К. С. Иванов

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 4 августа 2021 г.

Арктическая зона России обладает ресурсным потенциалом опал-кристобалитовых и цеолитовых пород, которые являются местным сырьем для получения экологически чистого теплоизоляционного материала. Предложена технология малоэтажного строительства на мерзлых основаниях с применением гранулированной пеностеклокерамики из местного сырья. Исследование основных свойств материала позволило оценить эффективность предлагаемой технологии путем математического моделирования теплового взаимодействия сооружения с мерзлым основанием. На основе расчетных данных выполнен анализ конструктивных решений, способствующих сохранению оснований отапливаемых малоэтажных зданий в мерзлом состоянии и повышению их несущей способности. Результаты исследований способствуют безаварийному и рациональному освоению Арктической зоны России.

Ключевые слова: проблемы строительства в криолитозоне, минеральные ресурсы, техногенная безопасность, тепловое воздействие, архитектурно-строительные особенности.

Введение

Развитие Арктической зоны России требует использования современных экологически безопасных технологий малоэтажного строительства. Общеизвестно, что тепло, выделяемое при эксплуатации зданий, может стать причиной растепления мерзлого основания и привести к аварии. Одним из решений данной проблемы является повышение несущей способности основания сооружения за счет его сохранения в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации. С этой целью в современной инженерной практике широко используются сезонные охлаждающие устройства (СОУ) [1; 2].

Исследования последних лет свидетельствуют о высокой эффективности горизонтальных СОУ в совокупности с применением теплоизоляционных материалов [2]. Например, теплоизоляционные плиты из экструзионного пенополистирола снижают тепловой поток от здания к мерзлому основанию в летний период, когда СОУ не действует. Сочетание низкой теплопроводности, достаточной прочности и гидрофобности делает этот материал максимально пригодным для применения в основаниях сооружений. Тем не менее данная технология имеет следующие недостатки:

- применение СОУ горизонтального типа, укладываемых на глубину до 1,5 м, существенно удорожает строительство;

- в связи с хрупкостью плит из пенополистирола необходим дополнительный объем земляных работ по подготовке подстилающего слоя грунта для их укладки;
- для монтажа плит используется ручной труд, а необходимость перекрытия множественных межплитных стыков требует укладки нескольких слоев плит;
- транспортировка плит в удаленные от промышленно развитых территорий арктические зоны нерентабельна и приводит к кратному увеличению их стоимости на месте строительства.

Отмечая практику применения проветриваемых подполий зданий на свайных фундаментах, необходимо подчеркнуть необходимость транспортировки как самих свай, так и специального оборудования для их установки в грунт. Поскольку сваи являются проводниками тепла, тепловое воздействие здания на мерзлое основание не исключается полностью.

Кроме рассмотренных мер в строительстве применяются искусственные насыпи, способствующие поднятию верхнего горизонта мерзлых грунтов (ВГММГ) и увеличению несущей способности основания. Для снижения теплового воздействия зданий нормы проектирования допускают применение в устройстве искусственных насыпей шлаков и других устойчивых к нагрузкам и не подверженных морозному пучению материалов [3]. Например, в строительстве автомобильных и железных дорог на мерзлых грунтах искусственные насыпи с прослойкой из экструзионного пенополистирола широко используются на протяжении многих лет [4].

В настоящее время в Арктической зоне России существуют технико-экономические предпосылки для создания производств теплоизоляционных материалов из местных сырьевых ресурсов. Анализ литературных источников свидетельствует об инновационных технологиях производства пеностеклокерамики из опал-кристаллитовых и цеолитовых пород [5—7]. Крупнейшими в стране запасами диатомитов, трепелов и опок обладает Ямало-Ненецкая опорная зона освоения Арктики. В приарктических районах Красноярского края, Якутии и Чукотки открыты одни из крупнейших в стране месторождений цеолитовых пород.

Пеностеклокерамика представляет собой неорганический теплоизоляционный материал с высокой прочностью и низкой теплопроводностью. В связи с высокой гидрофобностью этот материал допущен к применению в теплоизоляции оснований транспортных сооружений на мерзлоте [4]. В отличие от плит из экструзионного пенополистирола пеностеклокерамика может быть получена в виде окатанных гранул с закрыто-пористой структурой. Возможность получения материала в гранулированном (сыпучем) состоянии дает неоспоримые технологические преимущества укладки теплоизоляционного слоя в основания с применением средств механизации. Гранулированная пеностеклокерамика при-

меняется как заполнитель в теплоизоляционных бетонах стеновых ограждающих конструкций малоэтажных зданий.

Таким образом, применение гранулированной пеностеклокерамики в арктическом малоэтажном строительстве вызывает широкий практический интерес с точки зрения удешевления за счет исключения СОУ и проветриваемых подполий. Локализация производства востребованного теплоизоляционного материала способствует сокращению транспортных затрат и рационализации использования местных сырьевых ресурсов. Цель исследований состояла в оценке эффективности применения гранулированной пеностеклокерамики в конструктивных решениях отапливаемого малоэтажного здания на искусственной насыпи с помощью численного моделирования теплового взаимодействия с мерзлым основанием.

Материалы и методы

Исследования проводились на примере отапливаемого здания в условиях расположения участка строительства в городе Новый Уренгой (микрорайон Коротчаево), Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская область. Территориальный выбор участка моделирования обусловлен распространением там мерзлых грунтов, наличием требуемых расчетных данных инженерно-геологических изысканий, а также запасами сырья в виде близлежащих крупных месторождений опал-кристаллитовых пород для производства гранулированной пеностеклокерамики [8]. Прогнозный расчет температурных полей основания проводился путем численного решения уравнения нестационарной теплопроводности с использованием известного энтальпийного конечно-разностного метода [1; 2]. Метод учитывает свойства и физическое состояние грунта, количество незамерзшей воды и изменение граничных условий во времени.

Оценка требуемых для расчета климатических показателей выполнена на основе данных ближайшей метеостанции № 23453 (город Уренгой). Климатические характеристики местности, усредненные с 2006 по 2020 гг., приведены в табл. 1. Среднегодовая температура воздуха за указанный период составляет -5°C , а среднегодовая температура мерзлого грунта — $-1,2^{\circ}\text{C}$ согласно замерам на нижней границе слоя сезонных колебаний температуры, равной 15 м. Глубина сезонно-талого слоя составляет 1,4 м.

Согласно инженерно-геологическим изысканиям, разрез основания участка строительства представлен двумя типами грунта. До глубины 0,2 м обнаружен песок мелкий, слабопучинистый, слабольдистый с массивной криотектурой — тип 1. Ниже, до глубины 5,5 м, наблюдается торф мерзлый, слабо-разложившийся, слабольдистый со слоисто-сетчатой криотектурой — тип 2. На остальной части разреза вплоть до глубины 15 м вновь отмечается

Таблица 1. Климатические характеристики участка строительства

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C	-23,8	-20,8	-14,7	-5,7	-0,2	12,2	16,3	12,0	6,2	-3,5	-16,6	-20,9
Скорость ветра, м/с	2,9	2,7	3,2	3,6	3,6	3,3	3,1	2,8	3,0	3,2	2,6	2,8
Высота снежного покрова, м	0,64	0,73	0,8	0,75	0,42	0,07	—	—	—	0,10	0,23	0,48

Таблица 2. Расчетные характеристики грунтов

Грунт	Влажность, %	Температура начала заморозания, °C	Теплопроводность, Вт/(м·°C)		Удельная теплоемкость, кДж/(м³·°C)		Теплота фазового перехода, МДж/м³
			талого	мерзлого	талого	мерзлого	
Тип 1	22	-0,28	1,85	2,18	2784	2120	108
Тип 2	124	-0,40	0,94	1,41	3444	2762	174

грунт типа 1. Расчетные характеристики грунтов основания представлены в табл. 2. Режим подземных вод, обнаруженных на глубине до 3,8 м, зависит от местных гидрометеорологических условий и подвержен колебаниям по сезонам и годам. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, колебание уровня подземных вод может достигать 1,0 м.

Нормы проектирования зданий на мерзлых грунтах допускают использование торфяных грунтов в качестве оснований при условии их сохранения в мерзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации сооружения [3]. В исследованиях сравнивалась эффективность двух вариантов конструкции искусственной насыпи. Вариант 1 — типовой: насыпь из местного грунта типа 1 (см. табл. 2). Вариант 2 — экспериментальный: в насыпи из местного грунта типа 1 использован теплоизоляционный слой из гранулированной пеностеклокерамики, уложенный в оболочку из гидрофобного синтетического материала.

Для упрощения моделирования форма здания в плане была приближена к линейной, что позволяет привести расчетную схему к решению плоской осесимметричной задачи. В этой связи принято допущение о пренебрежимо малом влиянии торцевых частей здания на температурный режим основания по аналогии с линейными сооружениями, такими, как дорога, трубопровод и т. п. С учетом этих упрощений в расчетах рассмотрено здание с отношением длины к ширине не менее 5 и высотой до двух этажей. Согласно типовым нормам проектирования, пролет здания принят равным 6 м. Поперечный разрез здания схематично изображен на рис. 1, где так-

же представлено сравнение профилей двух вариантов насыпи.

В расчете использовались значения свойств гранулированной пеностеклокерамики фракции 10—20 мм. Выбор фракции обоснован тем, что слой гранул размером менее 10 мм имеет более высокую насыпную плотность и теплопроводность. Материал был получен из опал-кristобалитового сырья Ново-Уренгойского месторождения [8] с применением экструзионного метода синтеза [7]. В соответствии с методикой [9] насыпная плотность гранул, прочность при сжатии в цилиндре и водопоглощение по объему составили 250 кг/м³, 1,8 МПа и 6,2%.

Теплопроводность слоя гранул исследовалась в сухом состоянии в предположении, что для исключения контакта с грунтовой водой материал уложен в оболочку из гидрофобного синтетического материала. Согласно требованиям стандарта [10], слой гранул помещался в лабораторную установку горизонтально. С учетом уплотнения слоя гранул до коэффициента 1,2 среднее значение эффективной теплопроводности составило 0,08 Вт/(м·°C). Расчетная удельная теплоемкость теплоизолятора принималась равной 260 кДж/(м³·°C).

Расчетная область располагалась справа от оси симметрии здания (см. рис. 1) с учетом примыкания ее левой границы к оси. Ширина расчетной области вдвое превышала ширину подошвы насыпи и составляла 13 м. Глубина массива грунта в соответствии с положением нижней границы слоя сезонных колебаний температуры была принята равной 15 м. В расчете учитывалось, что отмостка, стяжка пола и ленточный фундамент здания (см. рис. 1) изготовлены из бетона с теплопроводностью 1,1 Вт/(м·°C)

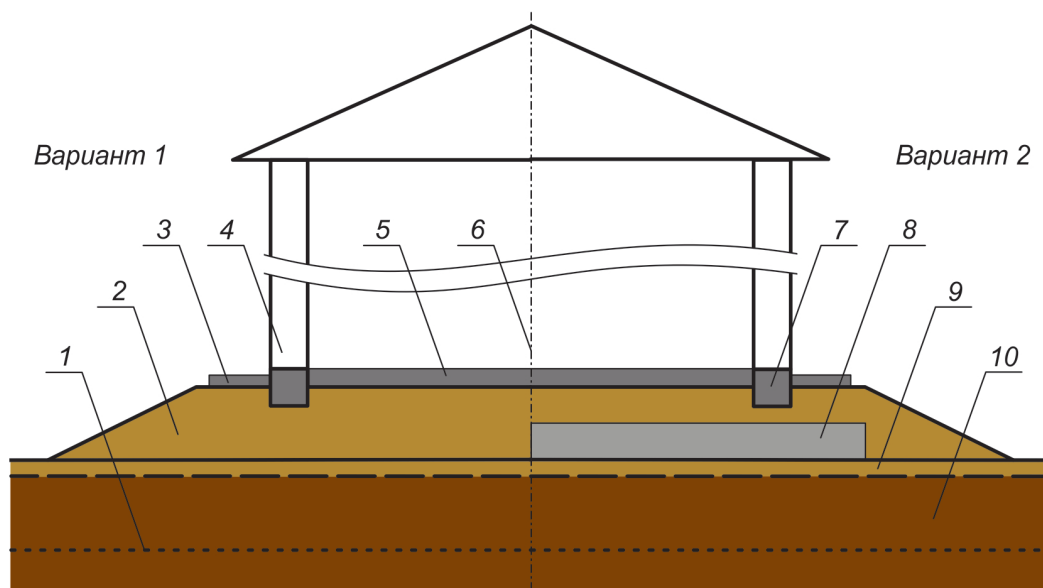


Рис. 1. Поперечный разрез здания и варианты конструкции искусственной насыпи: 1 – естественное положение ВГММГ; 2 – искусственная насыпь с уклоном откосной части 1:2; 3 – отмостка здания, 0,15×0,8 м; 4 – ограждающая конструкция толщиной 0,5 м; 5 – стяжка пола толщиной 0,2 м; 6 – ось симметрии, соответствующая продольной оси здания; 7 – ленточный фундамент 0,5×0,5 м; 8 – теплоизоляционный слой; 9, 10 – грунты типов 1 и 2

Fig. 1. Cross section of the building and options for the construction of an artificial embankment: 1 – natural position of the upper horizon of permafrost soils; 2 – artificial embankment with a slope of 1:2; 3 – blind area of the building, 0.15×0.8 m; 4 – enclosing structure 0.5 m thick; 5 – floor screed 0.2 m thick; 6 – axis of symmetry corresponding to the longitudinal axis of the building; 7 – strip foundation 0.5×0.5 m; 8 – heat-insulating layer; 9, 10 – soils of types 1 and 2

и теплоемкостью 2300 кДж/(м³·°C). В качестве материала стеновых ограждающих конструкций был принят легкий бетон на основе гранулированной пеностеклокерамики, имеющий теплопроводность 0,12 Вт/(м·°C) и теплоемкость 720 кДж/(м³·°C). Термическое сопротивление покрытия пола соответствовало территориальному нормативному значению 5,5 (м·°C)/Вт для перекрытий над неотапливаемыми подпольями жилых зданий.

На нижней границе расчетной области принимались граничные условия первого рода с постоянной температурой –1,2°C, равной среднегодовой температуре мерзлого грунта. На боковых границах расчетной области было принято условие равенства теплового потока нулю, что соответствует граничным условиям второго рода. Верхней границе расчетной области, включающей отмостку, откосную часть насыпи и естественную поверхность грунта, соответствовали граничные условия третьего рода. На этих поверхностях учитывались: среднемесячная температура воздуха (см. табл. 1), коэффициент теплообмена, который рассчитывался согласно методике [11] с учетом скорости ветра (см. табл. 1), а также термическое сопротивление покрытия, равное отношению толщины слоя материала к его теплопроводности. Температура воздуха внутри помещения принималась равной 24°C круглогодично.

Предполагалось, что откос и естественная поверхность грунта покрыты слоем дерна толщиной 0,1 м

с теплопроводностью 0,52 Вт/(м·°C). В зимнее время на естественной поверхности учитывалось термическое сопротивление снежного покрова (см. табл. 1), которое рассчитывалось по методике [11]. Толщина снежного покрова на поверхностях отмостки и откоса была увеличена в 2,5 раза с учетом снегозаносов.

Обсуждение результатов

Начальное распределение температуры соответствовало условию возведения насыпи зимой с целью уменьшить тепловое воздействие на основание в летний период, когда происходит строительство самого здания. Согласно скважинной термометрии грунтов, выполненной на начальную расчетную дату 16 января 2020 г., температура основания изменялась от –4°C на глубине 0,3 м до –0,8°C на глубине 3 м, после чего снижалась до –1,2°C на глубине 15 м.

С учетом нормативных требований [3] высота насыпи назначается на основании прогнозного теплотехнического расчета, в связи с чем начальная высота насыпи ориентировочно принималась равной 1 м. Толщина слоя гранулированной пеностеклокерамики 8 (вариант 2 на рис. 1) принята равной 0,7 м, что эквивалентно слою экструзионного пенополистирола толщиной 0,3 м, который традиционно используется в строительстве на мерзлых основаниях [1; 2].

Результаты расчета теплового взаимодействия здания с мерзлым основанием представляют собой температурное поле значений температуры грунто-

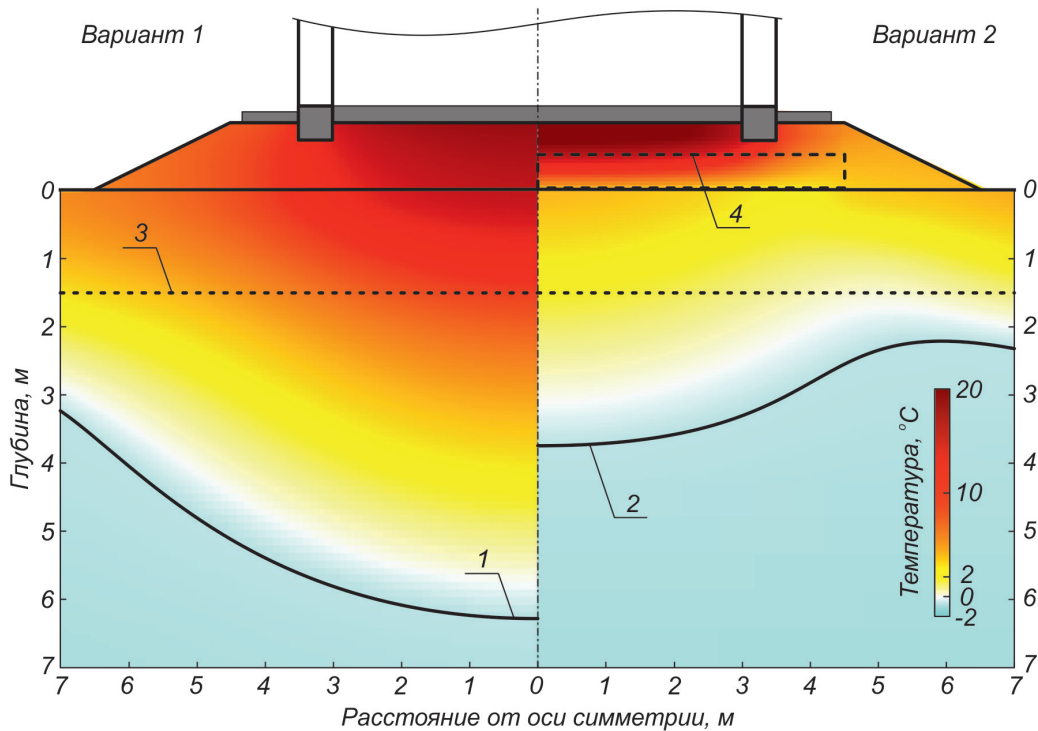


Рис. 2. Фрагмент температурного поля основания через 10 лет: 1, 2 – ВГММГ для вариантов 1 и 2; 3 – естественное положение ВГММГ, глубина 1,5 м; 4 – теплоизоляционный слой из гранулированной пеностеклокерамики
Fig. 2. Fragment of the base temperature field of after 10 years: 1, 2 – the upper horizon of permafrost soils for options 1 and 2; 3 – natural position of the upper horizon of permafrost soils, depth 1.5 m; 4 – heat-insulating layer of granulated foam-glass ceramic

вых блоков размером 0,05×0,05 м, на которые разбита рассматриваемая расчетная область. Изменение положения ВГММГ на конечную расчетную дату характеризуется изотермой температуры начала замерзания грунтов основания (см. табл. 2), визуализирующей границу раздела мерзлого и талого грунта.

На рис. 2 представлен уменьшенный (до 7 м по ширине и глубине) фрагмент расчетной области каждого варианта, характеризующий изменение ВГММГ под зданием через 10 лет эксплуатации. Конечная расчетная дата 15 сентября 2030 г. отвечала максимальной глубине сезонного оттаивания основания. Изотермы 1 и 2 на рис. 2 расположены ниже естественного положения ВГММГ (линия 3), что свидетельствует о температурной деградации мерзлого основания под воздействием выделяемого зданием тепла. Тем не менее существенная разница в положении изотерм 1 и 2 характеризует более глубокое оттаивание основания в варианте 1 и подтверждает положительное, но недостаточное влияние теплоизоляционного слоя 4 в варианте 2.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 2, требуют дополнительных инженерных решений, способствующих криоаккумуляции основания и повышению ВГММГ до уровня подошвы насыпи. Проветриваемые подполья и СОУ являются эффективными решениями, однако существенно удорожа-

ют арктическое строительство. В этой связи дальнейшее моделирование выполнялось с учетом следующих криоаккумуляционных мероприятий:

1. Очистка отстойки и откосных частей насыпи от снега в зимний период. Эта мера широко применяется в инженерной практике как подготовительная, способствующая понижению температуры мерзлых грунтов до начала строительства [3].

2. Установка солнцезащитных экранов над отстойкой и откосной частью в летний период, являющаяся эффективной мерой понижения температуры железнодорожных насыпей на мерзлых грунтах. Накоплен положительный опыт применения экранов на Забайкальской (Россия) и Транссибирской (КНР) железных дорогах [12; 13]. Экраны представляют собой легкие разборные конструкции со светоотражающим покрытием, которые демонтируются в зимний период. Для упрощения работ возможно крепление экранов к стенам здания и их приведение в рабочее состояние путем откидывания на откосную часть.

Дальнейшие расчеты велись без учета снежного покрова в зимний период на отстойке здания и откосной части насыпи. В теплое время (с мая по сентябрь), учитывалось теплозащитное воздействие откидных экранов конструкций. Предполагалось, что их применение эквивалентно увеличению термического сопротивления поверхности под ними на

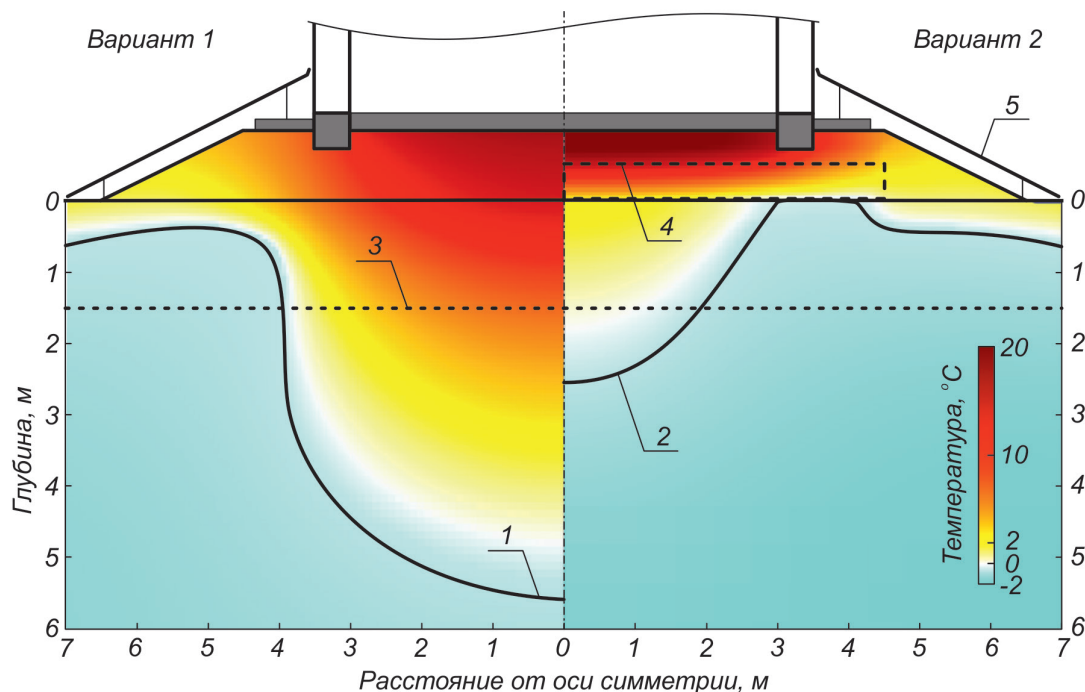


Рис. 3. Влияние криоаккумуляционных мероприятий на температурное поле основания через 10 лет: 1, 2 – ВГММГ для вариантов 1 и 2; 3 – естественное положение ВГММГ, глубина 1,5 м; 4 – теплоизоляционный слой из гранулированной пеностеклокерамики; 5 – солнцезащитный экран

Fig. 3. Influence of the cryoaccumulation measures on the base temperature field of after 10 years: 1, 2 – the upper horizon of permafrost soils for options 1 and 2; 3 – natural position of the upper horizon of permafrost soils, depth 1.5 m; 4 – heat-insulating layer of granular glass-ceramic foam; 5 – sun shield

3 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт. Как и в предыдущем расчете, высота насыпи в двух вариантах составляла 1 м, результаты расчетов приведены на рис. 3.

Согласно положению изотермы 1 криоаккумуляционные мероприятия для варианта 1 способствовали поднятию ВГММГ к подошве насыпи лишь под откосной частью, хотя под зданием отмечается оттаивание мерзлого основания до 5,5 м (см. рис. 3). Криоаккумуляционные мероприятия для варианта 2 способствуют поднятию ВГММГ к подошве насыпи под фундаментом здания и откосом. Поскольку по оси здания основание оттаивает на недопустимую глубину 2,5 м, были проведены дополнительные расчеты, учитывающие предложенные криоаккумуляционные меры.

В результате моделирования установлено, что условие поднятия ВГММГ к подошве насыпи по всей ширине здания обеспечивается двумя путями:

- уменьшением ширины пролета здания с 6 до 4 м при сохранении толщины теплоизоляционного слоя 0,7 м;
- увеличением толщины теплоизоляционного слоя с 0,7 до 1,6 м при сохранении ширины пролета здания 6 м.

Таким образом, безопасная эксплуатация отапливаемого малоэтажного здания на искусственной насыпи (без СОУ и проветриваемого подполья)

обеспечивается совокупностью конструктивных и криоаккумуляционных мер, которые должны учитываться на стадии проектирования. Например, снегозадержание или ориентация подветренных сторон здания с учетом розы ветров позволят минимизировать снеготранспорт и сократить работы по очистке откосов и откосов зимой. В летний период эти поверхности требуют установки солнцезащитных экранов на высоте 0,6–0,8 м [12; 13].

Необходимо подчеркнуть экономические преимущества предлагаемой технологии по сравнению с традиционными. Так, затраты на строительство 1 м^2 насыпи высотой 1,6 м из гранулированной пеностеклокерамики в условиях Северо-Якутской арктической зоны в 3,7 раза ниже, чем на устройство свайного фундамента с проветриваемым подпольем. С учетом того, что стоимость строительства зданий с применением горизонтальных СОУ почти на 30% ниже, чем с проветриваемым подпольем [1; 2], экономия по сравнению с горизонтальными СОУ составит 2,8 раза.

Дополнительный экономический эффект возможен за счет снижения транспортных затрат при использовании мобильных производственных комплексов вблизи объектов арктического строительства. Например, такой комплекс на базе железнодорожной платформы может производить до

100 м³ гранулированной пено-стеклокерамики в сутки, работая на всех видах углеводородного топлива. Выпускаемый материал применим как заполнитель в легких бетонах, используемых в виде блоков, панелей и плит для стеновых ограждающих конструкций малоэтажных зданий.

К недостаткам предложенного подхода следует отнести ограничение пролета здания шириной 6 м, тогда как ширина зданий с применением горизонтальных СОУ достигает 100 м. В этой связи несколько увеличится территория застройки за счет дополнительной площади между зданиями для хозяйственных целей, проездов и т. п. Тем не менее пролет шириной 6 м является широко распространенным строительным модулем в гражданском проектировании малоэтажных зданий любого назначения, в том числе на мерзлых грунтах.

При соблюдении соответствующей толщины теплоизоляционного слоя и криоаккумуляционных мер условие сохранения основания в мерзлом состоянии будет выполняться также для зданий, имеющих в плане форму круга диаметром 4—6 м. Такое конструктивное решение характерно для энергоэффективных зданий купольного типа, что приобретает в арктических условиях особую актуальность. В настоящее время купольное здание с применением гранулированной пеностеклокерамики в качестве основного строительного материала построено вблизи Тюмени в Природно-реабилитационном комплексе «ГНЕЗДО» (рис. 4). Материал был применен в качестве подушки фундамента толщиной 0,4 м, что позволило исключить морозное пучение в ус-



а



б



в

Рис. 4. Купольное здание из гранулированной пеностеклокерамики: а — вид конструкции купола, б — ландшафтное покрытие купола, в — общий вид здания зимой

Fig. 4. Dome building made of granulated foam-glass ceramics: а — view of dome construction, б — landscaping of the dome, в — general view of the building in winter

ловиях глубокого (до 2 м) сезонного промерзания основания, а также сократить потери тепла через пол. В ограждающей конструкции здания (рис. 4а) использованы теплоизоляционные стеновые блоки из гранулированной пеностеклокерамики, уложенные на несущую оболочку купола.

Хотя купольное здание построено в районе распространения сезоннопромерзающих грунтов, учитывая данные моделирования, можно судить о перспективности подобного строительства и в Арктике. Характерное сочетание высокой прочности, гидрофобности, низкой теплопроводности, сыпучести и пожаробезопасности гранулированной пеностеклокерамики позволяет возводить купольные здания, которые являются не только объектом инфраструктуры, но и элементом ландшафтного дизайна (рис. 4в). В этой связи купольные здания из гранулированной пеностеклокерамики могут способствовать сохранению криолитозоны как экосистемы, что способствует рациональному и экологически безопасному освоению Арктики.

Заключение

Исследование теплопроводности слоя гранулированной пеностеклокерамики из местного сырья арктических регионов позволило выполнить математическое моделирование теплового взаимодействия отапливаемого здания с мерзлым основанием. Было установлено, что существенному понижению температуры мерзлого основания способствует искусственная насыпь со слоем теплоизоляционного материала в совокупности с криоаккумуляционными мероприятиями: уборкой снега на откосах зимой и установкой солнцезащитных экранов летом. Условие сохранения основания прямоугольных зданий шириной 4—6 м в мерзлом состоянии без использования сезонных охлаждающих устройств и проветриваемых подполий обеспечивается толщиной слоя гранулированной пеностеклокерамики 0,7—1,6 м. Концепции сохранения арктических ландшафтов и экосистем, а также рационального природопользования и безопасного малоэтажного строительства в Арктике могут быть обеспечены использованием гранулированной пеностеклокерамики при возведении зданий купольного типа. Перспективность предложенной технологии состоит в удешевлении арктического малоэтажного строительства и рациональном недропользовании за счет локализации производства гранулированной пеностеклокерамики на удаленных от промышленно развитых регионов страны территориях.

Работа выполнена в рамках темы госзадания рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9.

Литература

1. Мельников В. П., Мельникова А. А., Аникин Г. В. и др. Инженерные решения в строительстве на

вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. — 2014. — № 3. — С. 82—90.

2. Мельников В. П., Аникин Г. В., Спасенникова К. А. Стохастическое прогнозирование работы сезонных охлаждающих устройств под основанием резервуара с нефтью на Варандейском месторождении // Криосфера Земли. — 2019. — № 1. — С. 63—71. — DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(63-71).

3. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. — М.: ФЦС, 2012. — 120 с.

4. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. — М.: Стандартинформ, 2018. — 74 с.

5. Goltsman B. M., Yatsenko L. A., Goltsman N. S. Production of Foam Glass Materials from Silicate Raw Materials by Hydrate Mechanism // Solid State Phenomena. — 2020. — Vol. 299. — P. 293—298. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.293.

6. Konovalova N., Pankov P., Rush E. et al. Environmentally Friendly Road-building Thermal Insulating Materials Based on Zeolite-containing Rocks // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 141. — P. 103—109. — DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_12.

7. Ivanov K. S. Preparation and Properties of Foam Glass-ceramic from Diatomite // J. of Wuhan Univ. of Technology-Mater. Sci. Ed. — 2018. — Vol. 33. — P. 273—277. — DOI: 10.1007/s11595-018-1817-8.

8. Смирнов П. В., Иванов К. С. Ресурсный потенциал р. Томчару-Яха на диатомитовое сырье // Геология и минер.-сырьевые ресурсы Сибири. — 2015. — № 2. — С. 97—103.

9. ГОСТ 9758—2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2014. — 84 с.

10. ГОСТ 7076—99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. — М.: Стандартинформ, 2000. — 24 с.

11. Марков Е. В. Методика обеспечения инженерной защиты от морозного пучения подземных магистральных трубопроводов с помощью грунтовой подушки // Изв. высш. учеб. заведений. Нефть и газ. — 2018. — № 3. — С. 91—101.

12. Chen L., Fortier D., McKenzie J. M., Sliger M. Impact of Heat Advection on the Thermal Regime of Roads Built on Permafrost // Hydrological Processes. — 2020. — Vol. 34 (7). — P. 1647—1664. — DOI: 10.1002/hyp.13688.

13. Кондратьев В. Г., Валиев Н. А., Кондратьев С. В. Земляное полотно дорог на льдистых многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения // Второй Международный симпозиум по проблемам земляного полотна в холодных регионах: Материалы симпозиума. — Новосибирск, 2015. — С. 26—33.

Информация об авторах

Мельников Владимир Павлович, доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, профессор, главный научный сотрудник, руководитель отдела методологии междисциплинарных исследований криосферы, Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН (625026, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), директор, АНО «Губернская академия» (625026, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: melnikov@ikz.ru.

Мельникова Алёна Александровна, директор, Природно-реабилитационный комплекс «ГНЕЗДО» (625026, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86).

Иванов Константин Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: sillicium@bk.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Мельников В. П., Мельникова А. А., Иванов К. С. Применение гранулированной пеностеклокерамики в арктическом строительстве малоэтажных зданий // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 271—280. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280.

THE USE OF GRANULAR FOAM-GLASS CERAMIC IN THE ARCTIC CONSTRUCTION OF LOW-RISE BUILDINGS

Melnikov, V. P.

Tyumen Scientific Center of Siberian Branch RAS, ANO "Gubernskaya akademiya" (Tyumen, Russian Federation)

Melnikova, A. A.

Natural Rehabilitation Complex "GNEZDO" (Tyumen, Russian Federation)

Ivanov, K. S.

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center Siberian Branch RAS (Tyumen, Russian Federation)

The article was received on August 4, 2021

Abstract

Construction on permafrost in the harsh climatic conditions of the Arctic requires the use of both innovative materials and special engineering solutions. It is well known that the heat released during the operation of buildings can cause thawing of a frozen base, which leads to a loss of stability, irreversible deformations and the occurrence of accidents. One of the problem solutions is to maintain the base of the structure in a frozen state throughout the entire period of operation by using heat-insulating materials. The Arctic zone of Russia has inexhaustible local raw materials: opal-cristobalite and zeolite rocks for obtaining environmentally friendly heat-insulating material and providing the regional construction industry. Thus the authors propose a new technology of low-rise construction on permafrost foundations with the use of granulated foam-glass ceramic. They aim the study at the establishing the effect of a heat-insulating layer of granules on the temperature regime of permafrost foundation of low-rise building.

The use of the mathematical modeling method enables the authors to analyze the thermal interaction of a heated building with permafrost foundation and assess the effectiveness of the proposed technology. The main properties of granulated foam-glass ceramic are: granule size 10–20 mm, bulk density 250 kg/m³, compressive strength in a cylinder 1,8 MPa, effective thermal conductivity of the granule layer in the compacted state 0,08 W/(m·°C).

Based on the calculated data, the authors select design solutions that allow the operation of low-rise buildings while maintaining the bases in a frozen state, as a result of which, the stability and bearing capacity increase.

The research results contribute to the trouble-free operation of buildings in the permafrost zone and the rational development of the Arctic zone of Russia. Taking into account the remoteness of the Arctic from the industrially developed regions, a significant economic effect in low-rise construction can be achieved through the creation of a production of granular foam-glass ceramic near construction sites.

Keywords: *Problems of construction in permafrost zone, mineral resources, industrial safety, thermal impact, architectural and construction features.*

The work was carried out according to the state assignment No. AAAA-A17-117051850061-9.

References

1. Melnikov V. P., Melnikova A. A., Anikin G. V., Ivanov K. S., Spasennikova K. A. Engineering Solutions for Building on Permafrost in Perspective Energy-efficient Enhancement. *Kriosfera zemli*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 82—90. (In Russian).
2. Melnikov V. P., Anikin G. V., Spasennikova K. A. Operation of Thermosyphons Beneath an Oil Tank at the Varandey Field: Prediction by Stochastic Analysis. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 54—61. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2019-1(54-61).
3. SP 25.13330.2012. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow, FTSS, 2012, 120 p. (In Russian).
4. SP 313.1325800.2017. Automobile roads in permafrost regions. Design and construction rules. Moscow, Standartinform, 2018, 74 p. (In Russian).
5. Goltsman B. M., Yatsenko L. A., Goltsman N. S. Production of Foam Glass Materials From Silicate Raw Materials by Hydrate Mechanism. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp. 293—298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.293.
6. Konovalova N., Pankov P., Rush E., Avseenko N., Bespolitov D. Environmentally Friendly Road-building Thermal Insulating Materials Based on Zeolite-containing Rocks. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 141, pp. 103—109. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_12.
7. Ivanov K. S. Preparation and Properties of Foam Glass-ceramic from Diatomite. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2018, vol. 33, pp. 273—277. DOI 10.1007/s11595-018-1817-8.
8. Smirnov P. V., Ivanov K. S. Resource potential of the r. Tomcharu-Yaha for diatomite raw materials. *Geologiya i miner.-syrevye resursy Sibiri*, 2015, no. 2, pp. 97—103. (In Russian).
9. GOST 9758—2012. Porous inorganic aggregates for construction work. Test methods. Moscow, Standartinform, 2014, 84 p. (In Russian).
10. GOST 7076—99. Building materials and products. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions. Moscow, Standartinform, 2000, 24 p. (In Russian).
11. Markov Y. V. Technique for providing engineering protection against frost heaving of underground pipelines using a soil cushion. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Neft i gaz*, 2018, no. 3, pp. 91—101. (In Russian).
12. Chen L., Fortier D., McKenzie J. M., Sliger M. Impact of Heat Advection on the Thermal Regime of Roads Built on Permafrost. *Hydrological Processes*, 2020, vol. 34 (7), pp. 1647—1664. DOI: 10.1002/hyp.13688.
13. Kondratyev V. G., Valiyev N. A., Kondratyev S. V. Subgrade of roads on icy permafrost: problems and solutions. *Vtoroy Mezhdunarodnyi simpozium po problemam zemlyanogo polotna v kholodnykh regionakh. Materialy simpoziuma*. Novosibirsk, 2015, pp. 26—33 (In Russian).

Information about the authors

Melnikov, Vladimir Pavlovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Methodology for Interdisciplinary Cryosphere Research, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch RAS (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), Director General, ANO "Gubernskaya akademiya" (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), e-mail: melnikov@ikz.ru.

Melnikova, Alyona Aleksandrovna, Director, Natural Rehabilitation Complex GNEZDO (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026).

Ivanov, Konstantin Sergeevich, PhD of Engineering Science, Senior Researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch RAS (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026); e-mail: sillicium@bk.ru.

Bibliographic description of the article

Melnikov, V. P., Melnikova, A. A., Ivanov, K. S. The use of granular foam-glass ceramic in the Arctic construction of low-rise buildings. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 2, pp. 271—280. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280. (In Russian).

© Melnikov V. P., Melnikova A. A., Ivanov K. S., 2022