

УДК 624.139

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

*Иванов К. С.*

*Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Российская Федерация  
E-mail: sillicium@bk.ru*

Промышленное освоение арктических территорий связано с существенным антропогенным воздействием на окружающую среду. Распространение многолетнемёрзлых грунтов требует специальных мер, обеспечивающих безопасную эксплуатацию отапливаемых зданий. К сожалению, современные методы арктического строительства зданий нельзя назвать безопасными для окружающей среды в силу необратимого нарушения криолитозоны: снятия растительного покрова, земляных работ, установки свай и т.п. Рассматривается альтернативная технология строительства малоэтажных зданий на теплоизоляционной подушке из гранулированной пеностеклокерамики. Её воздействие на температурный режим мёрзлого основания исследовался методом компьютерного моделирования. Установлены конструктивные параметры, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию сооружений в течение 30 лет. Дана экологическая и технико-экономическая оценка новой технологии с учётом производства теплоизолятора на базе арктических сырьевых ресурсов.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, криолитозона, Арктика, строительство, теплоизоляция.

### ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктики требует использования современных и экологически безопасных строительных технологий. Выделяемое при эксплуатации сооружений тепло является причиной растепления мёрзлого основания, что приводит к аварийным ситуациям. В результате антропогенного воздействия на криолитозону разрушается естественный ландшафт, образуются термокарстовые озёра, нарушаются арктические экосистемы. Восстановление нанесённого окружающей среде ущерба может длиться несколько десятилетий.

Эффективным решением этой проблемы на сегодня является термостабилизация грунтов, что позволяет сохранять основание в мёрзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации сооружения. До сих пор в практике строительства на мерзлоте широко применяются сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) и проветриваемые подполья [1, 2]. Отметим, что применение СОУ требует их погружения в грунт путём бурения скважин, либо выемки грунта на глубину до 1,5 м. Отсюда вытекает невозможность демонтажа СОУ, например, при переносе временных сооружений, например, вахтовых посёлков, сооружений для обустройства месторождений и т.п. Практика устройства проветриваемых подполий требует возведения свайного фундамента, земляных работ, специального оборудования для их установки в грунт. Кроме того, сваи являются проводниками тепла, что полностью не исключает тепловое воздействие на криолитозону. В этой связи, проветриваемые подполья сочетают с применением СОУ, которые устанавливаются рядом со сваями, и теплоизоляционных материалов [3].

Рассмотренные инженерные меры существенно удорожают строительство и наносят непоправимый ущерб окружающей среде Арктики при проведении земляных

работ, демонтажа и переноса сооружений. Следовательно, применение новых инженерных решений в арктическом строительстве должно отвечать не только техническим требованиям и безаварийной эксплуатации, но также требованиям экологической безопасности и экономики. Дальнейшее освоение Арктики с развитием её инфраструктуры требует альтернативных строительных технологий и локализации производства строительных материалов вблизи строящихся объектов на базе местных сырьевых и энергетических ресурсов.

На сегодняшний день в арктических зонах России складываются технико-экономические предпосылки по созданию производств теплоизоляционных материалов на базе местных сырьевых ресурсов. Как показал анализ литературных источников, разработаны инновационные технологии производства пеностеклокерамики из опал-кристобалитовых и цеолитовых пород [4-7]. Крупнейшими в стране запасами опал-кристобалитов: диатомитов, трепелов и опок, обладает Ямало-Ненецкий АО, входящий в опорную зону освоения Арктики. Ресурсный потенциал этого региона насчитывает 4,8 млрд. м<sup>3</sup> [8]. Одни из крупнейших в стране месторождений цеолитовых пород были открыты в приарктических районах Красноярского края, Якутии и Чукотки. Известно, что прогнозные запасы Кемпендйяйского цеолитоносного района западной Якутии насчитывает около 3,5 млрд. т. [9].

Неорганический теплоизоляционный материал пеностеклокерамика выгодно отличается от аналогов высокой прочностью и гидрофобностью. В отличие от традиционных плитных утеплителей, пеностеклокерамика выпускается в виде закрыто-пористых окатанных гранул. Это даёт неоспоримые технологические преимущества укладки теплоизоляционного слоя в основания сооружений с применением средств механизации. Фильтрационное свойство делает слой гранулированной пеностеклокерамики полифункциональным, позволяя применять материал в водоотводных системах транспортных сооружений. Так, теплоизоляция водоотводных лотков на железнодорожной дороге предотвращает образование наледей на участках пути в зимний период [10]. В результате, материал уже нашёл применение в транспортном строительстве в криолитозоне, что отражено в нормативной литературе [11].

Развитие применения гранулированной пеностеклокерамики в арктическом строительстве вызывает широкий практический интерес с точки зрения исключения СОУ и проветриваемых подполий. В этой связи нами предлагается технология строительства отапливаемых зданий на искусственной насыпи в виде подушки из гранулированной пеностеклокерамики.

Применение подобных искусственных насыпей, где применяется грунт в сочетании с теплоизоляционным слоем из экструзионного пенополистирола, широко известно в дорожном строительстве на мёрзлых грунтах [11]. Увеличение несущей способности основания происходит за счёт поднятия верхнего горизонта многолетнемёрзлых грунтов (ВГММГ) к подошве сооружения [12]. Однако, до сих пор широкое применение этих конструкций в арктических регионах ограничивалось номенклатурой теплоизоляционных материалов и низким качеством местных грунтов.

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Таким образом, можно отметить следующие перспективы применения гранулированной пеностеклокерамики в условиях распространения мёрзлых грунтов:

1. Упрощение и удешевление строительства за счёт исключения СОУ и проветриваемых подполий;
2. Снижение затрат на транспортировку материалов ввиду локализации производства теплоизоляционного материала в удалённых от промышленно развитых регионов районов арктического строительства;
3. Отсутствие необходимости проведения земляных работ в криолитозоне с полным сохранением арктических ландшафтов и почвенно-растительного слоя;
4. Возможность демонтажа теплоизоляционной подушки при переносе временных зданий, не нанося вред окружающей среде.

В этой связи, цель работы заключалась в исследовании теплового взаимодействия отапливаемого здания на теплоизоляционной подушке с мёрзлым основанием и технико-экономической оценке предлагаемой технологии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленные задачи решались путём компьютерного моделирования теплового взаимодействия здания на теплоизоляционной подушке с многолетнемёрзлым основанием. Применялся современный численный метод решения уравнения нестационарной теплопроводности с учётом фазовых переходов и количества незамёрзшей воды в грунте [1]. Это позволяет исследовать динамику температуры грунтов за несколько десятилетий, дав оценку эффективности предлагаемой технологии и спрогнозировав экологические последствия для криолитозоны.

Для моделирования был выбран участок строительства, расположенный на территории распространения многолетнемерзлых грунтов в г. Новый Уренгой, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская область. Выбор обусловлен приближенными к арктическим климатическим характеристикам, наличием требуемых расчётных данных инженерно-геологических изысканий и запасами сырья в виде близлежащих крупных месторождений опал-кристобалитовых пород для производства гранулированной пеностеклокерамики [8].

Климатические характеристики участка строительства были усреднены по данным наблюдений ближайшей метеостанции №23453 (г. Уренгой) с 2006 по 2020 г., табл. 1. Суммарная солнечная радиация приводится согласно справочным значениям [13]. Среднегодовая температура грунта на нижней границе слоя годовых колебаний температуры, равной 15 м, составляет  $-1,2^{\circ}\text{C}$ , глубина сезонно-талого слоя составляет 1,5 м. Основание участка строительства представлено: до глубины 0,2 м песком мелким, слабопучинистым, слабобльдистым (тип 1); до глубины 5,5 м торфом слаборазложившимся, слабобльдистым (тип 2). На остальной части разреза вплоть до глубины 15 м отмечен грунт типа 1. Расчётные характеристики грунтов основания представлены в табл. 2. Режим подземных вод зависит от инфильтрации атмосферных осадков и имеет колебания до 1 м.

Объектом моделирования является жилое отапливаемое здание купольной формы, обеспечивающей минимальную площадь поверхности контакта с

окружающей средой, что сокращает потери тепла через стены. Технические идеи строительства энергоэффективных жилых архитектурно-выразительных сооружений аэродинамических форм в виде сферы, купола, эллипсоида, линзы или конуса особенно актуальны в климатических условиях Арктики и могут быть реализованы в обозримом будущем [14].

Таблица 1.

## Климатические характеристики участка строительства

Наименование	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °С	-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
Суммарная солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	2	15	44	74	105	111	113	82	49	19	6	0
Высота снежного покрова, м	0,64	0,73	0,80	0,75	0,42	0,07	-	-	-	0,10	0,23	0,48

Таблица 2.

## Расчётные характеристики грунтов

Грунт	Влажность, %	Температура начала заморозания, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)		Удельная теплоёмкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)		Теплота фазового перехода, МДж/м <sup>3</sup>
			талого	мёрзлого	талого	мёрзлого	
1	22	-0,28	1,85	2,18	2784	2120	108
2	124	-0,40	0,94	1,41	3444	2762	174

Купольное здание монтируется на подушке из гранулированной пеностеклокерамики, которая укладывается в геосинтетический материал, создающий водонепроницаемую оболочку. Пол в помещении устраивается по поверхности подушки, в результате отпадает необходимость его теплоизоляции в отличие от проветриваемого подполья. Материал выпускается в промышленных объёмах и имеет следующие характеристики: фракция 5–20 мм, расчётный коэффициент эффективной теплопроводности 0,09 Вт/(м·°С), плотность в сыпучем состоянии 280 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 1,8 МПа, удельная теплоёмкость 260 кДж/(м·°С) [2].

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Поперечный разрез купольного здания схематично изображён на рис. 1. Внутренний радиус купола принят равным 4 м для обеспечения жилой площади помещения 50 м<sup>2</sup>. Толщина теплоизоляционной подушки принята равной 1 м, что по термическому сопротивлению эквивалентно слою экструзионного пенополистирола толщиной 0,3 м, традиционно применяемому в строительстве сооружений на мерзлоте [1].

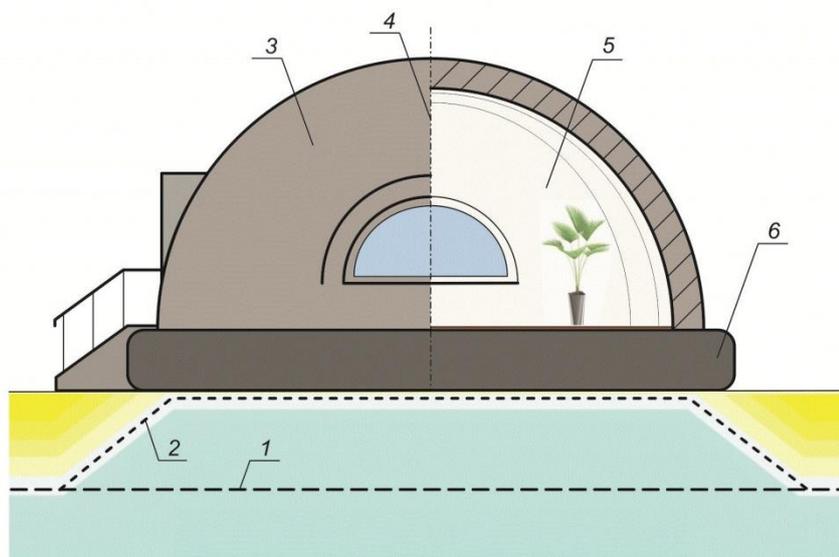


Рис. 1. Поперечный разрез купольного здания: 1 — естественное положение ВГММГ; 2 — нормативное положение ВГММГ; 3 — ограждающая конструкция здания; 4 — ось симметрии здания; 5 — внутреннее жилое пространство; 6 — подушка из гранулированной пеностеклокерамики в геосинтетической оболочке.

Ввиду осесимметричности купольного здания, целесообразно решать плоскую задачу нахождения температурного поля основания, при этом может быть рассмотрена любая полуплоскость, проходящая через ось (рис. 1). Ширина расчётной области втрое превышала внутренний радиус купола с целью учёта бокового температурного воздействия, оказываемого дневной поверхностью. Размер расчётной области по вертикали соответствовал глубине массива грунта, где отмечается положение нижней границы слоя годовых колебаний температуры. В этой связи, на нижней границе расчётной области принимались граничные условия первого рода с постоянной температурой  $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равной среднегодовой температуре грунта. На боковых границах расчётной области было принято условие равенства теплового потока нулю, что соответствует граничным условиям второго рода.

Верхней границе расчётной области, включавшей здание и дневную поверхность, соответствовали граничные условия третьего рода. Температура воздуха внутри жилого помещения, была принята равной  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  круглогодично. На дневной поверхности задавалась среднемесячная температура воздуха, суммарная солнечная

радиация, термическое сопротивление слоя снега зимой (табл. 1) и дёрна толщиной 0,1 м с теплопроводностью 0,52 Вт/(м·°С). Коэффициент теплообмена на поверхности рассчитывался в зависимости от скорости ветра и наличия снежного покрова (табл. 1) согласно методике [1].

Начало расчёта соответствовало зимнему монтажу подушки в январе 2023 г. с целью уменьшить тепловое воздействие в летний период, когда происходит монтаж купола. Начальное распределение температуры в основании соответствовало данным скважинной термометрии на дату начала расчёта: от -6 до -4 °С на глубине 0–0,3 м, от -4 до -0,8 °С на глубине 0,3–3 м, от -0,8 до -1,2 °С на глубине 3–15 м. Прогнозный расчёт выполнялся на весь срок эксплуатации здания (30 лет) с фиксацией температурных полей в момент достижения наибольшей глубины сезонного оттаивания грунта под зданием (конец сентября, начало октября).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчёта теплового взаимодействия здания с мёрзлым основанием представлены совокупностью значений температуры грунтовых блоков размером 0,05×0,05 м на которые разбивается расчётная область. Под тепловым воздействием здания происходит ежегодное изменение положения ВГММГ в основании, характеризующее искомую границу раздела грунта на мёрзлый и талый. Зная температуры всех грунтовых блоков к 15 сентября, эту границу можно визуализировать с помощью изотермы, соответствующей температуре начала замерзания грунта (табл. 2).

На рис. 2 представлен уменьшенный фрагмент расчётной области, отражающий динамику положения ВГММГ под купольным зданием на насыпи из местного грунта (тип 1) высотой 1 м. В расчёте учитывалось территориальное значение нормативного термического сопротивления пола внутри жилых зданий 5.5 м·°С/Вт [12]. Через 2 года глубина протаивания под центральной частью здания ниже естественного положения ВГММГ и составляет 1,8 м, что существенно отличается от нормативного на рис. 1. Эксплуатация такого здания недопустима, т.к. к 10 году глубина протаивания под ним возрастает в 2,4 раза, достигая 4,4 м (рис. 2, слева от оси). Расчёт свидетельствует о необходимости применения СОУ, либо замены насыпи проветриваемым подпольем. В дальнейших расчётах грунтовая насыпь заменялась подушкой из гранулированной пеностеклокерамики той же толщины.

Результат моделирования теплового воздействия здания с внесёнными конструктивными изменениями представлен рис. 3. Благодаря зимнему монтажу теплоизоляционной подушки, через 2 года эксплуатации здания уровень ВГММГ сохраняется в приближенном к требуемому положению (показано справа от оси). Однако в последующие годы происходит его понижение, так, к 10 году глубина протаивания под центром здания достигает 2,8 м. Очевидно, что предлагаемое решение не может применяться в исходном виде из-за недостаточной эффективности, что потребует дополнительных инженерных мероприятий.

Анализ научной литературы последних лет свидетельствует, что одной из наиболее эффективных мер является устройство в насыпях вентилируемых каналов [15-17]. В результате проветривания канала зимой происходит дополнительное

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

охлаждение насыпи и основания, в летний период каналы перекрывают от воздействия тёплого воздуха. Таким образом, охлаждающий канал работает лишь зимой, аналогично СОУ. Вентиляция каналов осуществляется естественным образом, например, за счёт разницы положения входа и выхода воздуха по высоте. В настоящее время такие системы уже используются в строительстве транспортных сооружений на мерзлоте: автодорогах и нефтепроводах, и доказали свою эффективность: [15-17].

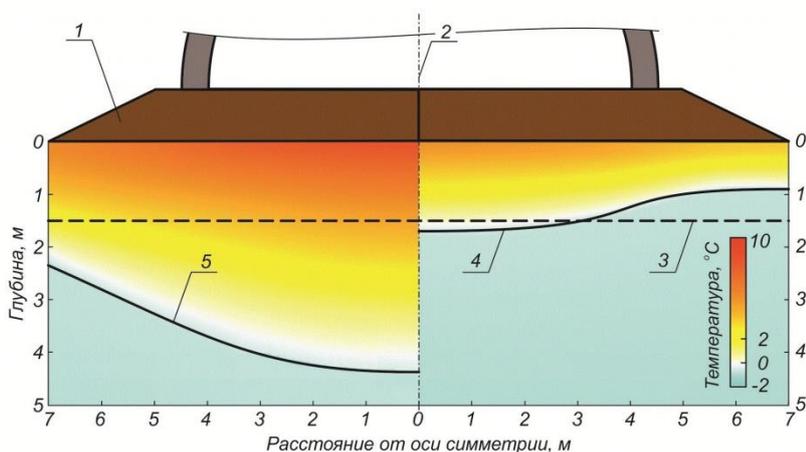


Рис. 2. Динамика температурного поля основания: 1 – грунтовая насыпь; 2 – ось симметрии купола; 3, 4 и 5 – положение ВГММГ до начала строительства, через 2 года и 10 лет.

Совместно с каналами могут применяться устройства, усиливающие скорость потока воздуха через канал, создавая дополнительную тягу за счёт воздействия ветра в выходном канале [18]. Можно предположить, что автоматизация данного устройства позволит регулировать скорость воздуха (например, изменяя сечение канала на входе), поддерживая требуемый тепловой режим основания отапливаемого здания. Очевидно, в этой связи потребуется долгосрочный мониторинг и термометрия грунта под зданием, хотя современные методы компьютерного моделирования [1, 2] позволяют сделать прогнозный расчёт и оценить риски уже сейчас.

С этой целью в моделировании применялись каналы круглого сечения, уложенные в тело теплоизоляционной подушки. Благодаря накопленному опыту использования каналов диаметром 0,22 и 0,38 м [16, 17], в расчётах принимался усреднённый диаметр 0,3 м. С 1 мая по 30 сентября каналы были перекрыты и не сообщались с наружным воздухом, а рассматривались как замкнутые воздушные полости, не оказывающие теплового воздействия. В апреле и октябре температура воздуха в открытых каналах приравнивалась значениям таблицы 1 при скорости 1 м/с. В наиболее холодные месяцы (с ноября по март) предполагалось, что воздух в каналах при усреднённой скорости 0,8 м/с имел температуру -10 °С. Как показывает предварительный расчёт, поддержание более низкой температуры за счёт увеличения скорости воздуха приводит к переохлаждению подушки и резкому возрастанию

потеря тепла через пол. Более высокая температура воздуха способствует оттаиванию мёрзлого основания, делая каналы неэффективными.

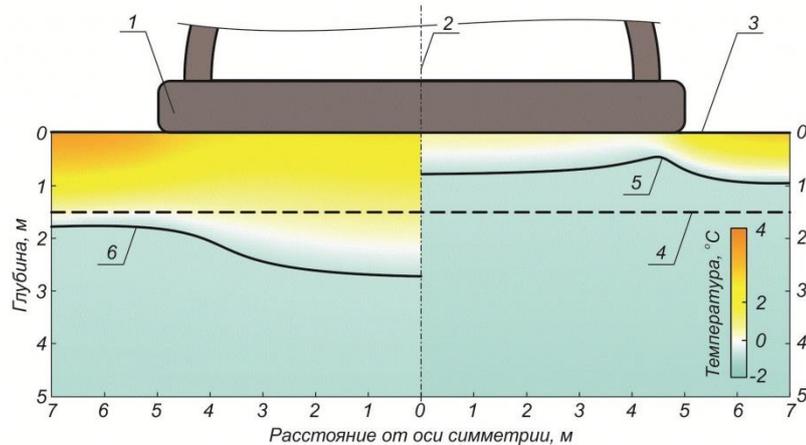


Рис. 3. Динамика температурного поля после замены грунтовой насыпи: 1 – теплоизоляционная подушка; 2 – ось симметрии купола; 3 – дневная поверхность; 4, 5 и 6 – положение ВГММГ до начала строительства, через 2 года и 10 лет.

Чтобы избежать более сложного трёхмерного моделирования и сохранить расчётную схему в плоском осесимметричном виде, купол был вытянут, образуя эллипсоид, длина которого превышала радиус в 10 раз. Благодаря линейной форме температурное поле в поперечном профиле основания сохраняет одинаковый характер по всей длине здания. Каналы располагались параллельно друг другу вдоль оси симметрии эллипсоида. С целью минимизации бокового воздействия дневной поверхности, с каждой стороны здания были увеличены края подушки на 1,5 м.

Как следует из рис. 4 (в сравнении с рис. 2 и 3 масштаб по глубине увеличен вдвое), для сохранения ВГММГ в проектном положении в течение 10 лет, потребуется не менее 7 вентилируемых каналов. Их оптимальное положение соответствует расстоянию 0,15 м от дневной поверхности. В сравнении с вариантом на рис. 3, каналы оказывают существенный охлаждающий эффект, однако через 20 лет под зданием формируется чаша протаивания глубиной более метра. Следовательно, здания постоянного типа требуют увеличения числа каналов в поперечнике. Результаты моделирования 8 вентилируемых каналов на рис. 5 свидетельствуют о достижении требуемой стабилизации основания на всём протяжении эксплуатации здания. Таким образом, каждому метру внутренней ширины здания должен соответствовать как минимум один вентилируемый канал диаметром 0,3 м.

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

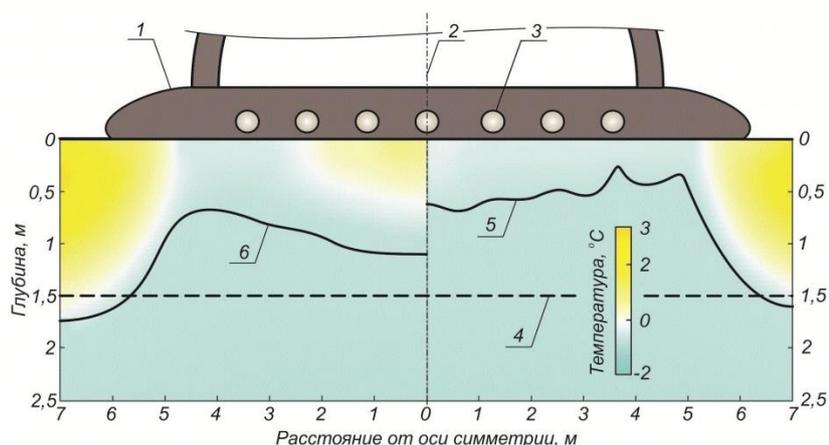


Рис. 4. Динамика температурного поля под воздействием 7 каналов: 1 — теплоизоляционная подушка; 2 — ось симметрии эллипсоида; 3 — вентиляционный канал; 4, 5 и 6 — положение ВГММГ до начала строительства, через 10 и 20 лет.

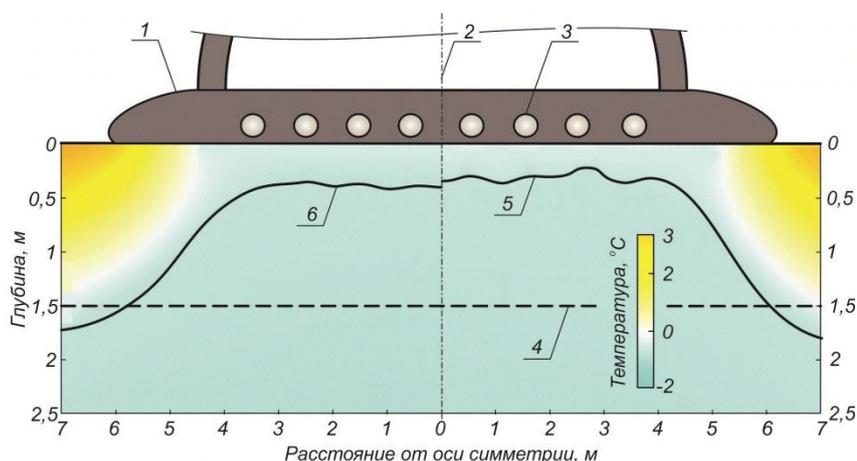


Рис. 5. Динамика температурного поля под воздействием 8 каналов: 1 — теплоизоляционная подушка; 2 — ось симметрии эллипсоида; 3 — вентиляционный канал; 4, 5 и 6 — положение ВГММГ до начала строительства, через 20 и 30 лет.

Экономическая эффективность применения теплоизоляционной подушки из гранулированной пеностеклокерамики в сравнении с устройством свайного фундамента с проветриваемым подпольем состоит почти в трёхкратном снижении затрат на единицу площади. А исходя из известной практики снижения затрат на 30 % при использовании горизонтальных СОУ вместо проветриваемого подполья [1, 2], экономия в сравнении с СОУ достигает двукратного значения.

## ВЫВОДЫ

1. С помощью компьютерного моделирования установлено, что предложенный принцип строительства отапливаемого здания на теплоизоляционной подушке из гранулированной пеностеклокерамики требует дополнительных мер охлаждения основания в виде вентилируемые каналов, расположенных вдоль здания параллельно друг другу. В результате слабонесущее основание сохраняется в мёрзлом состоянии на протяжении всего срока эксплуатации здания (30 лет).

2. В отличие от традиционных методов предлагаемая технология безопасна для окружающей среды, т.к. не требует земляных работ и не нарушает естественный растительный покров. Демонтаж свай и СОУ невозможен в то время как вентилируемая теплоизоляционная подушка подлежит демонтажу для переноса временных зданий без нанесения вреда окружающей среде.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по госзаданию № 121042000078-9.

## Список литературы

1. Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Ishkov A.A. Method of stochastic prediction of soil temperatures with get systems // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. Vol. 54. P. 65–70.
2. Melnikov V.P., Anikin G.V., Spasennikova K.A., Ivanov K.S. Engineering solutions for building on permafrost in perspective energy-efficient enhancement // *Earth's Cryosphere*. 2014. Vol. 18(3). P. 82–90.
3. Kornilov T.A., Nikiforov A.Y., Rabinovich M.V. Monitoring of permafrost foundation-bed soils of low-rise buildings having unvented underfloor space // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020. Vol. 57. P. 336–342.
4. Makarov D.V., Manakova N.K., Suvorova O.V. Production of rock-based foam-glass materials (review) // *Class and Ceramics*. 2023. Vol. 79. P. 411–416
5. Yatsenko E.A. Goltsman B.M. Klimova L.V. Yatsenko L.A Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. P.119–127.
6. 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.
7. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 84(8). P.48–56.
8. Астапов А.П., Боровский В.В., Воронин А.С. Северо-Гюменская субпровинция кристобалит-опаловых пород – уникальная минерально-сырьевая база Западно-Сибирского промышленного комплекса // *Вестник недропользователя*. 2004. № 14.
9. Колодезников К.Е. Цеолитоносные провинции востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2003. 204 с.
10. 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*. 2022. Vol. 12(2). P. 271–280.
11. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. Москва: Стандартинформ, 2018. 74 с.
12. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва: ФЦС, 2012. 120 с.
13. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Москва: ФЦС, 2015. 122 с.
14. Inzhutov I., Zhadanov V., Melnikov P., Amelchugov S. Buildings and constructions on the base of timber for the Arctic regions // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01089.

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

15. Cheng G., Sun Z., Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai–Tibet railway engineering // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. Vol. 53. P. 241–258.
16. Cao, Y.; Li, G.; Wu, G.; Chen, D.; Gao, K.; Tang, L.; Jia, H.; Che, F. Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline and a preliminary study of its ventilation capacity // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 2908.
17. Coulombe S., Fortier D., Stephani E. Using air convection ducts to control permafrost degradation under road infrastructure: Beaver Creek experimental site, Yukon, Canada // *15th International Conference on Cold Regions Engineering*. Canada. Quebec. 2012.
18. Пат. 2792466 РФ. Автономное охлаждающее устройство. Устьян Н.А. Заявл. 08.11.2022; опубл. 22.03.2023. Бюл. № 9.

### TEMPERATURE REGIME OF THE BASE OF A LOW-RISE BUILDING IN THE CRYOLITOZONE UNDER THE INFLUENCE OF HEAT-INSULATING PAD

*Ivanov K. S.*

*Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch RAS, Tyumen, Russian Federation  
E-mail: sillicium@bk.ru*

The development of the Arctic requires the use of modern and environmentally friendly building technologies. The heat released during the operation of structures is the cause of thawing of the frozen base, which leads to emergency situations. As a result of anthropogenic impact on the permafrost zone, the natural landscape is destroyed, thermokarst lakes are formed, and arctic ecosystems are disturbed. Recovery of environmental damage can take several decades.

Unfortunately, modern methods of Arctic building construction cannot be called safe for the environment due to the irreversible permafrost damage: removal of vegetation cover, earthworks, installation of piles, etc. Therefore, the application of new engineering solutions in Arctic construction must meet not only technical requirements and trouble-free operation, but also the requirements of environmental safety and economics. Further development of the Arctic with the development of its infrastructure requires alternative building technologies and localization of the production of building materials near the facilities under construction based on local raw materials and energy resources.

The paper proposes a technology for the construction of heated buildings on an artificial embankment in the form of a pad made of granular foam-glass ceramics, which has the following prospects in the conditions of the spread of frozen soils:

1. Simplification and reduction in the cost of construction by eliminating seasonal cooling devices and ventilated undergrounds;
2. Reducing the cost of transporting materials due to the localization of the production of heat-insulating material in areas of Arctic construction remote from industrialized regions;
3. No need for earthworks in the permafrost zone with full preservation of the Arctic landscapes and soil and vegetation layer;
4. Possibility of dismantling the thermal insulation pad when moving temporary buildings without harming the permafrost.

In this regard, the purpose of the work was to study the thermal interaction of a heated building on a heat-insulating pad with a frozen base and a technical and economic assessment of the proposed technology.

On the example of a dome-type residential building, the influence of the pad on the temperature regime of a frozen base was studied by computer simulation. It was found that the proposed principle of building a heated building on a heat-insulating pad of granulated glass-ceramic foam requires additional measures for cooling the base in the form of ventilated channels located parallel to each other along the building. As a result, the weakly bearing base remains in a frozen state throughout the entire life of the building (30 years).

Taking into account the production of granular foam-glass ceramics based on Arctic raw: opal-cristobalite and zeolites rocks, the economic efficiency of using a heat-insulating pad in comparison with the installation of a pile foundation with a ventilated underground consists in almost a threefold reduction in costs per unit area. Unlike traditional methods, the proposed technology is safe for the environment, because does not require excavation and does not disturb the natural vegetation cover. Dismantling of piles and seasonal cooling devices is not possible, while the ventilated thermal insulation pad must be dismantled to move temporary buildings without harming the environment.

**Keywords:** environmental safety, permafrost, Arctic, construction, heat insulation.

### References

1. Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Ishkov A.A. Method of stochastic prediction of soil temperatures with get systems. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, pp. 65–70.
2. Melnikov V.P., Anikin G.V., Spasennikova K.A., Ivanov K.S. Engineering solutions for building on permafrost in perspective energy-efficient enhancement. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. 18(3), pp. 82–90.
3. Kornilov T.A., Nikiforov A.Y., Rabinovich M.V. Monitoring of permafrost foundation-bed soils of foe-rise buildings having unvented underfloor space. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 57, pp. 336–342.
4. Makarov D.V., Manakova N.K., Suvorova O.V. Production of rock-based foam-glass materials (review). *Class and Ceramics*, 2023, vol. 79, pp. 411–416.
5. Yatsenko E.A. Goltsman B.M. Klimova L.V. Yatsenko L.A Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 142, pp.119–127.
6. 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.
7. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 84(8). pp.48–56.
8. Astapov A.P., Borovskiy V.V., Voronin A.S. Severo-Tyumenskaya subprovintsiya kristobalit-opalovykh porod – unikalnaya mineralno-syryevaya baza Zapadno-Sibirskogo promyshlennogo kompleksa (The North Tyumen subprovince of cristobalite-opal rocks is a unique mineral resource base of the West Siberian industrial complex). *Vestnik nedropolzovatelya*, 2004, no. 14 (in Russian).
9. Kolodeznikov K.E. Tseolitonosnyye provintsiy vostokey Sibirskoy platformy (Zeolite-bearing provinces of the east of the Siberian Platform). Novosibirsk: Nauka, 2003, 204 p. (in Russian).
10. 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*, 2022, vol. 12(2). pp. 271–280.
11. SP 313.1325800.2017. Dorogi avtomobilnyye v rayonakh vechnoy merzloty. Pravila proyektirovaniya i stroitel'stva (Automobile roads in permafrost regions. Design and construction rules). Moscow: Standartinform, 2018, 74 p. (in Russian).
12. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh (Bases and foundations on permafrost soils). Moscow: FTSS, 2012. 120 p, (in Russian).

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОСНОВАНИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

---

13. SP 131.13330.2012 Stroitel'naya klimatologiya (Building climatology). Moscow: FTSS, 2015, 122 p. (in Russian).
14. Inzhutov I., Zhadanov V., Melnikov P., Amelchugov S. Buildings and constructions on the base of timber for the Arctic regions. E3S Web of Conferences, 2019, vol. 110, p. 01089.
15. Cheng G., Sun Z., Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai–Tibet railway engineering. Cold Regions Science and Technology, 2008, vol. 53, pp. 241–258.
16. Cao, Y.; Li, G.; Wu, G.; Chen, D.; Gao, K.; Tang, L.; Jia, H.; Che, F. Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline and a preliminary study of its ventilation capacity. Water, 2021, vol. 13, p. 2908.
17. Coulombe S., Fortier D., Stephani E. Using air convection ducts to control permafrost degradation under road infrastructure: Beaver Creek experimental site, Yukon, Canada. 15th International Conference on Cold Regions Engineering, Canada, Quebec, 2012.
18. Pat. 2792466 RF. Avtonomnoye okhlazhdayushcheye ustroystvo (Autonomous cooling device). Ustyan N.A. Zayavl. 08.11.2022; opubl. 22.03.2023. Byul. № 9.

*Поступила в редакцию 26.06.2023 г.*