

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.15372/KZ20220603

СТРОИТЕЛЬСТВО ЗДАНИЙ В АРКТИКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ В ИХ ОСНОВАНИИ  
ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИК.С. Иванов<sup>1</sup>, А.А. Мельникова<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; [sillicium@bk.ru](mailto:sillicium@bk.ru)<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет, архитектурно-строительный ф-т,  
кафедра дизайна архитектурной среды, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия; [yharro@yandex.ru](mailto:yharro@yandex.ru)

Рассматривается строительство отапливаемых зданий в условиях Арктики. Для повышения несущей способности оснований за счет их сохранения в мерзлом состоянии предложен экологически чистый теплоизоляционный материал, получаемый из арктических сырьевых ресурсов: опал-кристобалитовых и цеолитовых пород. Оценена эффективность применения теплоизоляционной подушки из гранулированной пеностеклокерамики путем численного моделирования теплового взаимодействия отапливаемого здания с мерзлым основанием. Исследовано влияние защитных экранов, конструктивных параметров здания купольной формы и толщины теплоизоляционной подушки на динамику температурного режима мерзлого основания за 30 лет в сравнении с вариантом без применения специальных инженерных мер. В результате прогнозного расчета установлено, что безопасная эксплуатация отапливаемого здания без традиционных сезонных охлаждающих устройств и проветриваемого подполья возможна только с применением защитных экранов. Здание может иметь форму не только купола, но и вытянутого эллипсоида неограниченной длины, в связи с чем должны соблюдаться такие конструктивные параметры, как ширина здания 6–8 м и толщина теплоизоляционной подушки 1.0–1.4 м. Перспективность предлагаемой технологии состоит в удешевлении арктического малоэтажного строительства, рациональном недропользовании, сохранении криолитозоны и арктических ландшафтов.

**Ключевые слова:** Арктика, криолитозона, основание, строительство зданий, теплоизоляционный материал.

CONSTRUCTION OF BUILDINGS IN THE ARCTIC WITH THE APPLICATION  
OF GRANULATED FOAM-GLASS CERAMICS IN THEIR BASESK.S. Ivanov<sup>1</sup>, A.A. Melnikova<sup>2</sup><sup>1</sup> Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; [sillicium@bk.ru](mailto:sillicium@bk.ru)<sup>2</sup> Tyumen Industrial University, Faculty of Architecture and Construction,  
Department of Design of the Architectural Environment, Volodarskogo str. 38, Tyumen, 625000, Russia

The construction of heated buildings in the Arctic is considered. To increase the bearing capacity of the foundations via their preservation in the frozen state, an environmentally friendly heat-insulating material obtained from the Arctic raw materials (opal-cristobalite and zeolite rocks) has been proposed. The aim of this work is to evaluate the efficiency of insulation layer made of granular foam-glass ceramic on the basis of numerical modeling of the thermal interaction between the heated building and the frozen base. We have investigated the influence of protective screens, construction parameters of a dome-shaped building, and the thickness of insulation layer on the thermal regime of a frozen base over 30 years in comparison with the option without the use of special engineering measures. Calculations indicate that the safe exploitation of a heated building without traditional seasonal cooling devices and a ventilated underground is only possible with the use of protective screens. The building can have the shape of not only a dome but also an elongated ellipsoid of unlimited length. In this case, for building width of 6–8 m, the thickness of insulation layer should be 1.0–1.4 m. The proposed technology is promising to reduce the cost of low-rise Arctic construction, rational use of mineral resources, and preservation of the permafrost and Arctic landscapes.

**Key words:** Arctic, permafrost, foundations, building construction, heat-insulating material.

## ВВЕДЕНИЕ

Природные ресурсы и инфраструктура Северного морского пути являются государственными приоритетами дальнейшего развития Арктики [Фаузер, Смирнов, 2018]. Однако такие экономико-географические особенности, как отдаленность от промышленно развитых регионов и распространение мерзлоты, существенно затрудняют строительство, а следовательно, и освоение колоссальной арктической территории. В этой связи рационализация арктического строительства представляется актуальной задачей.

В условиях Арктики строительство ведется по принципу сохранения оснований сооружений в мерзлом состоянии, что повышает несущую способность. То есть важной особенностью арктического строительства является температурный режим основания, нарушение которого вызывает оттаивание горных пород и может стать причиной аварии [Мельников и др., 2019]. В связи с этим при строительстве отапливаемых зданий на мерзлоте широко применяются сезонные охлаждающие устройства (СОУ). Понижая температуру грунта в зимний период, СОУ поддерживают основания в мерзлом состоянии, несмотря на выделяемое зданиями тепло. В исследованиях последних лет отмечен наибольший эффект применения СОУ в совокупности со слоем теплоизоляции. Например, плиты из экструзионного пенополистирола уменьшают тепловой поток от здания к мерзлоту основания в летний период, когда СОУ не действует [Мельников и др., 2014].

Другой инженерной мерой сохранения оснований зданий в мерзлом состоянии являются проветриваемые подполья. Для их устройства широко используются свайные опоры, глубина установки которых должна превышать сезонноталый слой с целью передачи нагрузки на мерзлый грунт. Также известна технология применения пространственных каркасов (платформ) из стальных или деревянных конструкций, которые устанавливаются непосредственно на поверхность грунта. Имея множество точек опоры, устройство конструкций способствует равномерному распределению нагрузки на грунт, одновременно являясь проветриваемым подпольем [Vangoor, 2018; Inzhutov et al., 2019].

Необходимо отметить практику строительства автомобильных и железных дорог на мерзлоте, где применение искусственных насыпей позволяет повысить верхний горизонт многолетнемерзлых грунтов (ВГММГ) до уровня их подошвы. Благодаря такому подходу нормы проектирования сооружений в условиях криолитозоны допускают применение торфяных, просадочных, льдистых и других грунтов в качестве оснований, что обеспечивает высокую экономическую эффективность строительства. Дополнительной мерой по охлаж-

дению основания стало применение в теле насыпи теплоизоляционных материалов и экранных конструкций (навесов) на откосах насыпи. Зимой экранные конструкции препятствуют снегонакоплению, способствуют проветриванию и охлаждению откосов насыпи, а летом снижают воздействие солнечного излучения [Кондратьев и др., 2015; Wenjie et al., 2006; Chen et al., 2020].

Указанные инженерные меры обеспечения безопасной эксплуатации зданий в Арктике ведут к неизбежному удорожанию строительства. Удаленность от промышленно развитых регионов на тысячи километровкратно увеличивает стоимость строительных материалов и конструкций на месте строительства. Таким образом, применение передовых инженерных решений является необходимым условием арктического строительства с практической стороны, но недостаточным – с экономической. Решение задачи рационализации строительства в Арктике требует локализации производства строительных материалов вблизи строящихся объектов с применением в производстве местных сырьевых и энергетических ресурсов.

Технологии строительства в криолитозоне [Мельников и др., 2014, 2019, 2021; Chen et al., 2020; Niu et al., 2021] свидетельствуют о высокой эффективности и востребованности теплоизоляционных материалов. Между тем арктическая территория обладает крупнейшим в стране сырьевым потенциалом для их производства – это месторождения опал-кристаллитовых пород Ямало-Ненецкого АО [Смирнов, Иванов, 2015] и цеолитовых пород Якутии [Иванов, 2021]. Публикации последних лет свидетельствуют о перспективности технологической синтеза из этих пород неорганических теплоизоляционных материалов с ячеистой структурой, называемых пеностеклокерамикой [Erofeev et al., 2018; Goltsman et al., 2020; da Silva et al., 2021; Konovalova et al., 2021]. Благодаря закрытопористой структуре материал имеет низкое водопоглощение, сохраняет теплоизоляционные свойства в грунте, обладает необходимой прочностью для применения в основаниях зданий и сооружений в гранулированном виде [Иванов, 2021; Мельников и др., 2021].

Дальнейшее хозяйственное освоение Арктики потребует сотен тысяч кубических метров теплоизоляционных материалов, где гранулированная пеностеклокерамика может найти широкое практическое применение. В настоящей работе вместо традиционных СОУ и проветриваемых подполий предлагается альтернативное конструктивное решение в виде подушки из гранулированной пеностеклокерамики, изолирующей здание от мерзлого основания. В связи с тем, что нормы проектирования в криолитозоне требуют расчетного обоснования температурного режима грунта на весь срок эксплуатации, цель исследований со-

стояла в оценке эффективности применения подушки из гранулированной пеностеклокерамики путем численного моделирования теплового взаимодействия отапливаемого здания с мерзлым основанием.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок моделирования расположен на территории распространения многолетнемерзлых грунтов в г. Новый Уренгой, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская область. Его выбор обусловлен соответствующими климатическими характеристиками, наличием требуемых расчетных данных инженерно-геологических изысканий и запасами сырья в виде близлежащих крупных месторождений опал-кристобалитовых пород для производства гранулированной пеностеклокерамики [Смирнов, Иванов, 2015].

В табл. 1 представлены климатические характеристики местности, усредненные с 2006 по 2020 г. по данным ближайшей метеостанции № 23453 (г. Уренгой). Суммарная солнечная радиация приводится согласно справочным значениям [СП 131.13330.2012, 2015], уменьшенным с учетом средних условий облачности для г. Тарко-Сале по данным [Научно-прикладной справочник..., 1998]. Среднегодовая температура грунта на нижней границе слоя годовых колебаний температуры, соответствующей 15 м, составляет  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , глубина сезонноталого слоя 1.5 м. Основание участка строительства представлено: до глубины 0.2 м песком мелким, слабопучинистым, слабольдистым (тип 1); до глубины 5.5 м торфом слабо-разложившимся, слабольдистым (тип 2). На остальной части разреза вплоть до глубины 15 м отмечен грунт типа 1. Расчетные характеристики грунтов основания представлены в табл. 2. Режим

подземных вод, обнаруженных на глубине до 3.8 м, зависит от инфильтрации атмосферных осадков и подвержен колебаниям до 1.0 м.

В качестве объекта исследования выбрано жилое отапливаемое здание купольной формы с минимальной площадью 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 ближайшем будущем [Inzhutov et al., 2019].

Купольное здание монтируется на предварительно подготовленной подушке из гранулированной пеностеклокерамики, уложенной в геосинтетическую оболочку. Материал выпускается в промышленных объемах и имеет следующие характеристики: фракция 5–20 мм, расчетный коэффициент эффективной теплопроводности  $0.09\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , плотность в сыпучем состоянии  $280\text{ кг}/\text{м}^3$ , прочность при сжатии 1.8 МПа, удельная теплоемкость  $260\text{ кДж}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$  [Мельников и др., 2021].

Предлагаемое конструктивное решение обладает полифункциональностью и следующими практическими преимуществами:

1. Выполняя роль несущего элемента, подушка равномерно передает нагрузку от здания, при этом специальной подготовки естественной поверхности основания не требуется.
2. Подушка является искусственной насыпью, изолирующей отапливаемое здание от мерзлого основания слоем теплоизоляционного материала.
3. Покрытие пола в помещении устраивается по поверхности подушки, в результате отпадает необходимость его теплоизоляции, в отличие от проветриваемого подполья.

Таблица 1. Климатические характеристики участка строительства

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-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
Суммарная солнечная радиация, $\text{Вт}/\text{м}^2$	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. Расчетные характеристики грунтов

Грунт	Влажность, %	Температура начала замерзания, $^{\circ}\text{C}$	Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$		Удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$		Теплота фазового перехода, $\text{МДж}/\text{м}^3$
			Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый	
1	22	-0.28	1.85	2.18	2784	2120	108
2	124	-0.40	0.94	1.41	3444	2762	174

Поперечный разрез купольного здания схематично изображен на рис. 1. Внутренний радиус купола 4 м принят с учетом 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 [Мельников и др., 2014, 2019]. В качестве материала стеновых ограждающих конструкций был принят легкий бетон на основе заполнителя из гранулированной пеностеклокерамики с теплопроводностью 0.12 Вт/(м·°С) и теплоемкостью 720 кДж/(м<sup>3</sup>·°С).

Прогнозный расчет температурного поля мерзлого основания проводился с применением современного численного метода решения уравнения нестационарной теплопроводности, учитывающего фазовые переходы и количество незамерзшей воды в грунте [Мельников и др., 2014, 2019]. В решении плоской осесимметричной задачи нахождения температурного поля основания купольного здания рассматривалась его правая полуплоскость (см. рис. 1), так чтобы левая граница расчетной области примыкала к оси здания.

Ширина расчетной области втрое превышала внутренний радиус купола с целью учета бокового температурного воздействия, оказываемого дневной поверхностью. Размер расчетной области по вертикали соответствовал глубине массива грунта, где отмечалось положение нижней границы слоя годовых колебаний температуры. В этой связи на нижней границе расчетной области принимались граничные условия первого рода с постоянной температурой  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равной среднегодовой температуре грунта. На боковых границах расчетной области было принято условие равенства теплового потока нулю, что соответствует граничным условиям второго рода.

Верхней границе расчетной 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 задавались среднемесячная температура воздуха, суммарная солнечная радиация, термическое сопротивление слоя снега зимой (см. табл. 1) и дерна толщиной 0.1 м с теплопроводностью  $0.52\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Коэффициент теплообмена на поверхности рассчитывался в зависимости от скорости ветра и наличия снежного покрова (см. табл. 1) по методике [Vabishchevich et al., 2017].

Дата начала расчета 15 января 2020 г. отвечала условию устройства подушки зимой с целью уменьшения теплового воздействия в летний период, когда происходило строительство купола. Начальное распределение температуры в основании соответствовало данным скважинной термометрии на начало расчета: от  $-6$  до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глуби-

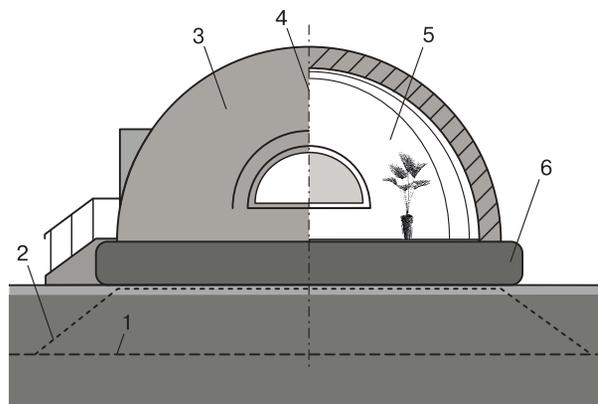


Рис. 1. Поперечный разрез купольного здания:

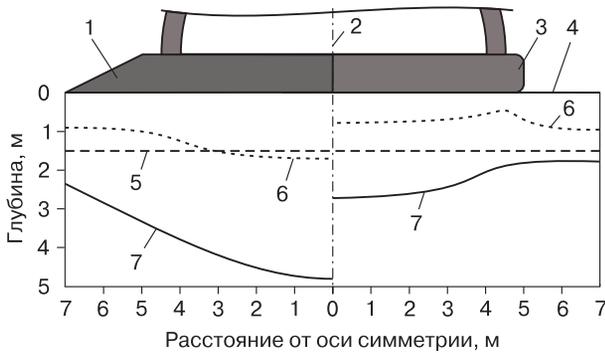
1 – естественное положение ВГММГ; 2 – нормативное положение ВГММГ; 3 – ограждающая конструкция из легкого бетона толщиной 0.5 м; 4 – ось симметрии здания; 5 – внутреннее жилое пространство; 6 – подушка из гранулированной пеностеклокерамики в геосинтетической оболочке.

не  $0-0.3$  м, от  $-4$  до  $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубине  $0.3-3.0$  м, от  $-0.8$  до  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубине  $3-15$  м. Прогнозный расчет температурного поля основания выполнялся на длительный срок эксплуатации здания (до 30 лет и 8 месяцев) с учетом высокого темпа потепления климата при ежегодном повышении средней температуры воздуха на  $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Павлов и др., 2010]. Конечная расчетная дата 15 сентября отвечала максимальной глубине сезонного оттаивания основания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

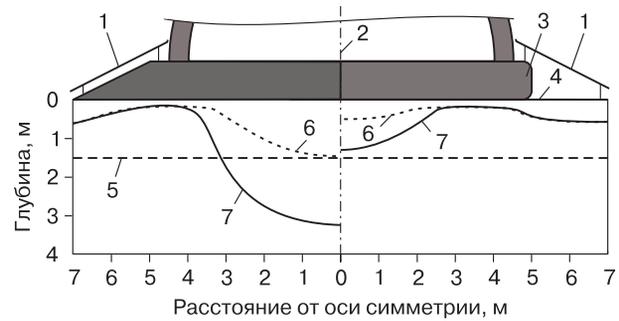
Результаты расчета теплового взаимодействия здания с мерзлым основанием в требуемый момент времени представляют собой температурное поле, состоящее из совокупности значений температуры грунтовых блоков размером  $0.05 \times 0.05$  м, на которые разбита расчетная область. Под воздействием здания происходит изменение положения ВГММГ в основании, которое показывает границу раздела грунта на мерзлый и талый. Таким образом, зная температурное поле основания, можно визуализировать ВГММГ с помощью изотермы, характеризующей температуру начала замерзания грунта (см. табл. 2).

На рис. 2 представлен уменьшенный фрагмент расчетной области, отражающий динамику положения ВГММГ непосредственно под купольным зданием на теплоизоляционной подушке в сравнении с традиционной насыпью высотой 1 м из местного грунта типа 1. Во втором случае в расчете учитывалось термическое сопротивление пола внутри здания, которое соответствовало территориальному нормативному значению  $5.5\text{ м}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  для перекрытий над неотапливаемыми подпольями жилых зданий.



**Рис. 2. Влияние грунтовой насыпи (слева) и теплоизоляционной подушки (справа) на изменение ВГММГ:**

1 – искусственная насыпь из грунта; 2 – ось симметрии зданий; 3 – теплоизоляционная подушка; 4 – дневная поверхность основания; 5 – естественное положение ВГММГ; 6 – сентябрь 2022 г.; 7 – сентябрь 2030 г.



**Рис. 3. Влияние экранных конструкций на изменение ВГММГ для здания на грунтовой насыпи (слева) и теплоизоляционной подушке (справа):**

1 – защитный экран (изображен схематично); 2 – ось симметрии зданий; 3 – теплоизоляционная подушка; 4 – дневная поверхность основания; 5 – естественное положение ВГММГ; 6 – сентябрь 2022 г.; 7 – сентябрь 2030 г.

Результаты прогнозного расчета свидетельствуют о значительной динамике растепления мерзлого основания, в результате чего глубина протаивания под центральной частью здания к сентябрю 2030 г. достигает 2.6 и 4.8 м для зданий на теплоизоляционной подушке и грунтовой насыпи соответственно (см. рис. 2, справа и слева). Существенно большая глубина оттаивания здания на грунтовой насыпи подтверждает эффективность применения теплоизоляционной подушки, однако в предложенном виде конструктивное решение не позволяет достичь нормативного (приближенного к подушке) положения ВГММГ (см. рис. 1), требуются дополнительные меры по охлаждению основания.

Поэтому в дальнейших расчетах учитывалось круглогодичное воздействие экранных конструкций, установленных по периметру зданий. В зимний период снегонакопление происходит на поверхности конструкции, и термическое сопротивление снега на поверхности грунта в расчет не принималось.

Следует подчеркнуть, что экранные конструкции и их опоры должны сохранять устойчивость при нормативном значении снеговой нагрузки, которое для арктических территорий достигает 4 кПа, согласно [СП 20.13330.2016, 2018]. С учетом этого их размеры ограничивались расстоянием от стены здания 2.5 м, как показано на рис. 3, где экранные конструкции изображены схематично. Более подробно конструктивные особенности экранных конструкций в строительстве транспортных сооружений на мерзлых грунтах освещены в отечественной и зарубежной литературе [Кондратьев и др., 2015; Wenjie et al., 2006; Chen et al., 2020].

Отражающее воздействие экранных конструкций учитывалось в расчете с мая по сентябрь из-за обнуления значений суммарной солнечной радиации (см. табл. 1) при задании граничных условий на поверхности грунта под экранами, что соответствует натурным и численным экспериментам [Wenjie et al., 2006]. Размеры купола, грунтовой насыпи и подушки сохранялись, результаты моделирования воздействия экранных конструкций представлены на рис. 3.

Принятая в расчете инженерная мера способствует существенному охлаждению основания под ограждающими конструкциями зданий, что характеризуется поднятием ВГММГ к подошве насыпи и теплоизоляционной подушке (см. рис. 3, слева и справа). Однако в случае грунтовой насыпи формирование под центром здания чаши протаивания глубиной 3.4 м (к сентябрю 2030 г.) требует применения альтернативных мер: укладки под зданием горизонтальных или наклонных СОУ либо замены насыпи проветриваемым подпольем. По причине низкой эффективности грунтовой насыпь в дальнейших расчетах не рассматривалась.

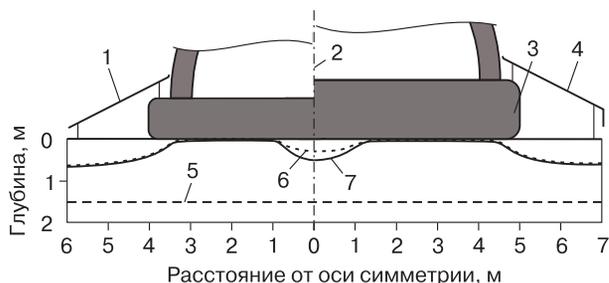
Эффективность экранных конструкций отмечается при сравнении положений ВГММГ на рис. 2 и 3 (справа) в случае возведения купола на теплоизоляционной подушке. Тем не менее динамика формирования чаши протаивания, глубина которой к сентябрю 2030 г. под центром здания достигает 1.4 м (см. рис. 3, справа), свидетельствует о недостаточном приближении ВГММГ к нормативному положению (см. рис. 1). С целью минимизации или полного исключения чаши протаивания в основании в дальнейших расчетах авторами были изменены конструктивные параметры зда-

ния – размеры купола и толщина теплоизоляционной подушки.

В первом случае внутренний радиус купола был уменьшен в 1.3 раза (до 3 м), в связи с чем при сохранении принятой площади помещения здание приняло вытянутую форму эллипсоида. При фиксированной ширине эллипсоида площадь помещения будет зависеть от его длины, которая не влияет на изменения ВГММГ в поперечном профиле основания, по аналогии с линейными инженерными сооружениями (дорогами, трубопроводами и др.). Следовательно, площадь помещения может существенно превышать принятую и ограничиваться лишь конструктивной длиной здания в форме эллипсоида. Во втором случае была увеличена толщина теплоизоляционной подушки до 1.4 м (примерно с кратностью уменьшения радиуса купола) при сохранении начального внутреннего радиуса купола.

Результат моделирования теплового воздействия зданий с внесенными конструктивными изменениями для первого и второго случаев представлен на рис. 4 (слева и справа от оси симметрии зданий). Видно, что положение чаши протаивания к сентябрю 2030 г. в обоих случаях достигает границы мерзлого грунта основания на глубине 0.2 м, т. е. слабонесущий грунт типа 2 остается в мерзлом состоянии. Положение чаши протаивания к сентябрю 2050 г. характеризует незначительную динамику растепления основания до глубины 0.4 м только под центром здания. Остальная часть основания отличается неизменным положением ВГММГ на протяжении 30 лет эксплуатации зданий и практически полным его приближением к подошве теплоизоляционной подушки, т. е. к нормативному положению на рис. 1.

Как следует из рис. 4, безопасная эксплуатация отапливаемого купольного здания на теплоизоляционной подушке возможна лишь с применением мер по охлаждению основания и учетом конструктивных параметров здания. Это достигается, например, уменьшением ширины здания или увеличением толщины подушки, в результате чего можно добиться полного недопущения оттаивания слабонесущего грунта в основании без его вырезки, а также без применения СОУ и проветриваемого подполья. Экономическая эффективность применения теплоизоляционной подушки из гранулированной пеностеклокерамики толщиной 1.4 м в сравнении с устройством свайного фундамента с проветриваемым подпольем состоит почти в трехкратном снижении затрат на единицу площади. А исходя из известной практики снижения затрат на 30 % при использовании горизонтальных СОУ вместо проветриваемого подполья [Мельников и др., 2014, 2019], экономия в сравнении с СОУ достигает двукратного значения.



**Рис. 4.** Влияние уменьшенного до 3 м внутреннего радиуса купола (слева) и увеличенной до 1.4 м толщины теплоизоляционной подушки (справа) на изменение ВГММГ.

Условные обозн. см. на рис. 3.

Дополнительный экономический эффект возможен за счет снижения транспортных затрат в случае производства гранулированной пеностеклокерамики вблизи объектов арктического строительства с использованием мобильных комплексов на базе железнодорожной платформы [Мельников и др., 2021]. Материал применим как заполнитель в легких бетонах, используемых в виде монолитных ограждающих конструкций (куполов, скрулуп и др.), блоков, стеновых панелей, стяжек пола и т. п. Таким образом, гранулированной пеностеклокерамикой могут быть заменены традиционные теплоизоляторы (например, пенополистирол), транспортировка которых в Арктику нерентабельна.

К недостатку предложенной технологии строительства следует отнести ограничение ширины здания в форме эллипсоида размером 6 или 8 м, в то время как ширина зданий с применением горизонтальных СОУ достигает 100 м. В этой связи за счет дополнительной площади между зданиями, необходимой для коммуникаций, проездов, технических и хозяйственных нужд, противопожарных целей и пр., возрастет территория застройки. Но несмотря на фиксированную ширину, здание-эллипсоид может иметь неограниченную длину и площадь, а его конфигурация в плане отличаться от линейной, принимая вид дуги, круга, тора, спирали и др. Следовательно, расположение зданий-эллипсоидов на застраиваемой территории должно увязываться с их конфигурацией в плане с учетом возможного теплового взаимодействия смежных зданий.

В настоящее время существует практический опыт применения гранулированной пеностеклокерамики в строительстве купольного здания в Природно-реабилитационном комплексе «ГНЕЗДО», г. Тюмень (рис. 5). Здание построено на теплоизоляционной подушке толщиной 0.4 м, что позволило исключить морозное пучение в услови-



**Рис. 5.** Купольное здание из гранулированной пеностеклокерамики.

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

Результаты моделирования свидетельствуют о широких перспективах подобного строительства в условиях Арктики. Высокая прочность, гидрофобность, низкая теплопроводность, сыпучесть и пожаробезопасность гранулированной пеностеклокерамики позволяют возводить купольные и эллипсоидные здания, которые являются не только объектом арктической инфраструктуры, но и элементом ландшафтного дизайна (см. рис. 5). Таким образом, предложенное техническое решение может обеспечить сохранность и криолитозоны, и природного ландшафта как части арктической экосистемы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена технология арктического строительства отапливаемых малоэтажных зданий купольной формы на теплоизоляционной подушке из гранулированной пеностеклокерамики. Выполнено математическое моделирование теплового взаимодействия здания с мерзлым основанием, в результате чего установлено влияние мероприятий по охлаждению основания и конструктивных параметров зданий на температурный режим мерзлого основания. Условию сохранения основания в мерзлом состоянии отвечают здания в форме эллипсоида шириной 6–8 м на теплоизоляционной подушке толщиной 1.0–1.4 м. Благодаря исключению сезонных охлаждающих устройств и проветриваемых подполий, а также локализации производства гранулированной пеностеклокера-

мики на удаленных арктических территориях достигается удешевление малоэтажного строительства на мерзлоте. Использование гранулированной пеностеклокерамики в предложенных конструктивных решениях способствует рациональному недропользованию, сохранению криолитозоны, арктических ландшафтов и экосистем.

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

### Литература

- Иванов К.С.** Применение цеолитов Якутии для получения гранулированного теплоизоляционного материала // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2021, № 8 (332), с. 160–167.
- Кондратьев В.Г., Валиев Н.А., Кондратьев С.В.** Земляное полотно дорог на льдистых многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения // Второй Междунар. симпозиум по проблемам земляного полотна в холодных регионах: Материалы. Новосибирск, СГУПС, 2015, с. 26–33.
- 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, т. XXIII, № 1, с. 63–71.
- Мельников В.П., Иванов К.С., Мельникова А.А., Дашинаев З.Б.** Гранулированный теплоизоляционный материал для транспортного строительства в арктических зонах // Экология и промышленность России, 2021, № 5 (25), с. 32–38.
- 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, т. XVIII, № 3, с. 82–90.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР.** Вып. 17. СПб., Гидрометеиздат, 1998, 704 с.
- Павлов А.В., Перлыштейн Г.З., Типенко Г.С.** Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 3–12.
- Смирнов П.В., Иванов К.С.** Ресурсный потенциал р. Томчару-Яха на диатомитовое сырье // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2015, № 2, с. 97–103.
- СП 131.13330.2012.** Строительная климатология. М., ФЦС, 2015, 122 с.
- СП 20.13330.2016.** Нагрузки и воздействия. М., Стандартинформ, 2018, 76 с.
- Фаузер В.В., Смирнов А.В.** Мировая Арктика: природные ресурсы, расселение населения, экономика // Арктика: экология и экономика, 2018, № 3 (31), с. 6–20.
- 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, No. 7, p. 1647–1664.
- da Silva R.C., Puglieri F.N., Chiroti D.M., Bartmeyer G.A.** Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents // Science of the Total Environ., 2021, vol. 771, p. 145276.
- Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V.** Biostable silicic rock-based glass ceramic foams // Magazine of Civil Engng, 2018, vol. 84, No. 8, p. 48–56.

- 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.
- 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.
- Konovalova N., Pankov P., Rush E., Avseenko N.** Environmentally friendly road-building thermal insulating materials based on zeolite-containing rocks // *Lecture Notes in Civil Engng*, 2021, vol. 141, p. 103–109.
- Niu F., Jiang H., Su W., Jiang W.** Performance degradation of polymer material under freeze-thaw cycles: A case study of extruded polystyrene board // *Polymer Testing*, 2021, vol. 96, p. 107067.
- Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Vasilieva M.V.** Numerical simulation of the temperature dynamics of railway foundation material in permafrost // *Math. Models and Computer Simulations*, 2017, vol. 9, No. 3, p. 292–304.
- Vangool W.J.** Mechanical foundation system for new and retrofit construction // *Proc. of the 6th Intern. Structural Specialty Conf. Fredericton, Canada*, 2018, p. 27–35.
- Wenjie F., Wei M., Dongqing L., Luxin Z.** Application investigation of awning to roadway engineering on the Qinghai-Tibet Plateau // *Cold Reg. Sci. and Technol.*, 2006, vol. 45, p. 51–58.
- Pavlov A.V., Perlstein G.Z., Tipenko G.S. Actual aspects of modeling and prediction of the permafrost thermal state under climate change conditions. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2010, vol. XIV, No. 1, p. 3–12 (in Russian).
- Smirnov P.V., Ivanov K.S. Resource potential of the r. Tomcharu-Yakha on diatomite raw materials. *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri [Geology and mineral resources of Siberia]*, 2015, No. 2, p. 97–103 (in Russian).
- SP 131.13330.2012. *Building climatology*. Moscow, FTsS, 2015, 122 p. (in Russian).
- SP 20.13330.2016. *Loads and impacts*. Moscow, Standartinform, 2018, 76 p. (in Russian).
- Fausser V.V., Smirnov A.V. World Arctic: natural resources, population settlement, economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economics]*, 2018, vol. 31, No. 3, p. 6–20.
- 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, No. 7, p. 1647–1664.
- da Silva R.C., Puglieri F.N., Chirolu D.M., Bartmeyer G.A. Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 771, p. 145276.
- Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 84, No. 8, p. 48–56.
- 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.
- 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.
- Konovalova N., Pankov P., Rush E., Avseenko N. Environmentally friendly road-building thermal insulating materials based on zeolite-containing rocks. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 141, p. 103–109.
- Niu F., Jiang H., Su W., Jiang W. Performance degradation of polymer material under freeze-thaw cycles: A case study of extruded polystyrene board. *Polymer Testing*, 2021, vol. 96, p. 107067.
- Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Vasilieva M.V. Numerical simulation of the temperature dynamics of railway foundation material in permafrost. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, vol. 9, No. 3, p. 292–304.
- Vangool W.J. Mechanical foundation system for new and retrofit construction. In: *Proc. of the 6th Intern. Structural Specialty Conf. Fredericton, Canada*, 2018, p. 27–35.
- Wenjie F., Wei M., Dongqing L., Luxin Z. Application investigation of awning to roadway engineering on the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, vol. 45, p. 51–58.

## References

Ivanov K.S. Application of zeolites of Yakytia for obtaining granular thermal insulation material. *Izv. Tom. politekhn. un-ta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2021, vol. 332, No. 8, p. 160–167 (in Russian).

Kondratiev V.G., Valiev N.A., Kondratiev S.V. Subgrade roads on icy permafrost soils: problems and ways to solve them. In: *Second International Symposium on subgrade problems in cold regions: Proc. of the symposium, Novosibirsk, STU*, 2015, p. 26–33 (in Russian).

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. XXIII, No. 1, p. 54–61.

Melnikov V.P., Ivanov K.S., Melnikova A.A., Dashinimaev Z.B. Granular thermal insulation material for transport construction in the Arctic zones. *Ekologia i promyshlennost Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 2021, vol. 25, No. 5, p. 32–38 (in Russian).

Melnikov V.P., Melnikova A.A., Anikin G.V., Ivanov K.S., Spasennikova K.A. Building on permafrost: engineering solutions for energy efficiency. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 3, p. 76–82.

Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Issue 17. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1998, 704 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 15 декабря 2021 г.,  
после доработки – 6 марта 2022 г.,  
принята к публикации 17 октября 2022 г.*