

РАЗДЕЛ 4.
ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 624.139

**АРКТИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ**

Иванов К. С.

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

Рассмотрена проблема строительства отапливаемых малоэтажных зданий в Арктике. Предложен экологически безопасный способ, который не требует ведения земляных работ в криолитозоне и не нарушает естественный растительный покров. Отапливаемое здание монтируется на платформе, представляющей собой металлический каркас с уложенной поверх теплоизоляционной подушкой, при этом платформа может проветриваться только в холодное время года. Тепловое взаимодействие многолетнемёрзлого основания и отапливаемого здания на платформе было исследовано с помощью компьютерного моделирования. Предложенный способ исключает образование сезонно талого слоя в основании здания и обеспечивается круглогодичное сохранение грунта в мёрзлом состоянии, что существенно повышает несущую способность и позволяет увеличивать этажность зданий. Материалом для теплоизоляции платформы служит гранулированная пеностеклокерамика, получаемая на базе широко распространённого в арктических регионах сырья: опал-кристобалитовых и цеолитовых пород. Снижение транспортных расходов, исключение применения земляных работ и сезонных охлаждающих устройств существенно удешевляет строительство, способствует сохранению криолитозоны, ландшафтов и арктических экосистем.

Ключевые слова: многолетнемёрзлый грунт, теплоизоляционный материал, строительство, малоэтажные здания.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемёрзлые грунты распространены почти на 60% территории нашей страны, в связи с чем был накоплен широкий инженерный опыт строительства отапливаемых зданий на мерзлоте. В отечественной и зарубежной практике в строительстве на мерзлоте наибольшее применение нашли сезонно-охлаждающие устройства (СОУ) и проветриваемые подполья [1, 2], необходимые для обеспечения требуемой несущей способности основания за счёт сохранения в мёрзлом состоянии.

Арктический вектор развития государственной экономики бросает новые вызовы технологиям строительства в криолитозоне. К основным недостаткам традиционных мер относят: нарушение почвенно-растительного слоя, погружение конструкций в мёрзлый грунт и невозможность их демонтажа, существенное удорожание строительства, применение спецтехники, нанесение непоправимого вреда окружающей среде.

Известной альтернативой проветриваемому подполью на свайном фундаменте является платформа в виде пространственного металлического или деревянного каркаса [3, 4]. Платформа равномерно передаёт нагрузку от сооружения к основанию

через множественные точки опоры, являясь одновременно проветриваемым подпольем. Однако, данное инженерное решение имеет следующие недостатки:

1) каркас проветривается круглогодично, включая тёплое время года;

2) зимой каркас заносится снегом, что препятствует охлаждению грунта основания.

В результате процесс охлаждения основания становится неуправляемым и труднопрогнозируемым. Для повышения эффективности проветривания может применяться изоляция подполья от внешней среды, например, с помощью теплоизоляционных стеновых панелей [1]. Наличие в панелях специальных окон позволяет управлять режимом проветривания и регулировать температуру грунта в основании сооружения.

Перечисленные методы и их недостатки свидетельствуют в пользу применения пространственного каркаса в малоэтажном строительстве на мерзлоте взамен свайного фундамента и СОУ. Однако, вопрос выбора теплоизоляционного материала для ограждения каркаса-платформы до сих пор остаётся открытым. На удалённых за тысячи километров арктических территориях эта проблема особенно актуальна и может быть решена только завозом традиционных утеплителей.

Тем не менее, за последние 10 лет были разработаны новые технологии синтеза теплоизоляционных материалов на базе опал-кристобалитовых и цеолитовых пород [2, 5, 6, 7, 8], география месторождений которых прослеживается почти во всех арктических регионах страны [9, 10]. Речь идёт о гранулированном неорганическом материале пористого строения, называемом пеностеклокерамикой. Благодаря высокой прочности при сжатии (до 1,5–2,5 МПа), гидрофобности и низкой теплопроводности (0,07–0,15 Вт/(м·°С)), гранулированная пеностеклокерамика уже нашла широкое применение в транспортном и гидротехническом строительстве в Северных регионах [11, 12]. В гражданском строительстве в условиях Арктики гранулированная пеностеклокерамика может применяться для изготовления стеновых ограждающих конструкций зданий: блоков, плит, панелей, а также теплоизоляционной подушки в основании сооружений [2, 13].

Расширение номенклатуры и сырьевой базы теплоизоляционных материалов позволит: снизить транспортные расходы, удешевить строительство за счёт исключения свайного фундамента и СОУ, сделать арктическое строительство рациональным и безопасным для окружающей среды. Помимо того, что производство материала может быть локализовано на месте его применения в арктических регионах, материал обладает огромными преимуществами: пожаробезопасностью и высокой прочностью при сжатии.

Как известно, широкое применение пенополистирола в гражданском строительстве ограничивается пожарной безопасностью зданий. В тоже время минераловатные плиты относятся к негорючим материалам, однако их применение недопустимо в конструкциях, воспринимающих внешние нагрузки. Из-за высокой сжимаемости применение минераловатных утеплителей ограничивается самонесущими конструкциями: например, сэндвич-панелями.

В этой связи, гранулированная пеностеклокерамика является наиболее перспективным теплоизолятором для платформы-каркаса. Уже сегодня с помощью

современных средств компьютерного моделирования представляется возможным исследовать тепловое взаимодействие мёрзлого основания с возводимым по предлагаемой технологии отапливаемым зданием. Цель исследований заключалась в оценке эффективности предлагаемого технического решения и рисков эксплуатации отапливаемых зданий на изолированной платформе в условиях Арктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить глубину оттаивания основания здания на изолированной платформе и риски его эксплуатации в течение всего срока службы позволяет прогнозный расчёт. Тепловое взаимодействие с многолетнемёрзлым основанием моделировалось с применением современного численного метода решения уравнения нестационарной теплопроводности [2].

Климатические характеристики, обоснование географического расположения участка строительства здания, основные свойства грунта основания, граничные и начальные условия моделирования представлены в исследовании автора [14]. Объектом моделирования является жилое отапливаемое здание в виде эллипсоида (вытянутого купола), что сокращает потери тепла через стены за счёт минимизации поверхности контакта с окружающей средой. Поперечный разрез здания-эллипсоида с внутренним радиусом 4 м схематично изображён на рис. 1.

В исследовании предлагается использовать плоскую расчётную схему т.к. осесимметричность здания позволяет решать задачу нахождения температурного поля основания в одной полуплоскости, ограниченной осью симметрии. В этой связи длина эллипсоида должна превышать радиус в 10 раз, что позволит пренебречь тепловым воздействием торцов здания. В расчёте допускалось, что температурное поле в поперечном профиле основания сохраняет одинаковый характер по всей длине здания, что справедливо при расчёте температурных полей таких линейных сооружений как трубопровод, автомобильная дорога и т.п. С учётом принятых размеров внутренняя площадь здания составляет 306 м².

Здание установлено на металлическом пространственном каркасе 6 (рис. 1) высотой 0,5 м, поверх которого уложена теплоизоляция из гранулированной пеностеклокерамики. Толщина слоя изоляции была принята равной 0,5 м, что соответствует территориальному нормативному значению термического сопротивления перекрытий над неотапливаемыми подпольями жилых зданий: 5,5 м²·°С/Вт [15]. С целью минимизации бокового воздействия дневной поверхности, края теплоизоляции с каждой стороны здания были увеличены на 1 м (рис. 1).

Гранулированная пеностеклокерамика укладывается на раскатанный рулонный геосинтетический материал. Завернутые друг на друга края рулонного материала образуют водонепроницаемый теплоизоляционный мат соответствующей толщины и длины, пол в помещении устраивается по поверхности мата. Гранулы имеют следующие характеристики: фракция 5–20 мм, расчётный коэффициент эффективной теплопроводности 0,09 Вт/(м·°С), плотность в сыпучем состоянии 280 кг/м³, прочность при сжатии 1,8 МПа, удельная теплоёмкость 260 кДж/(м³·°С).

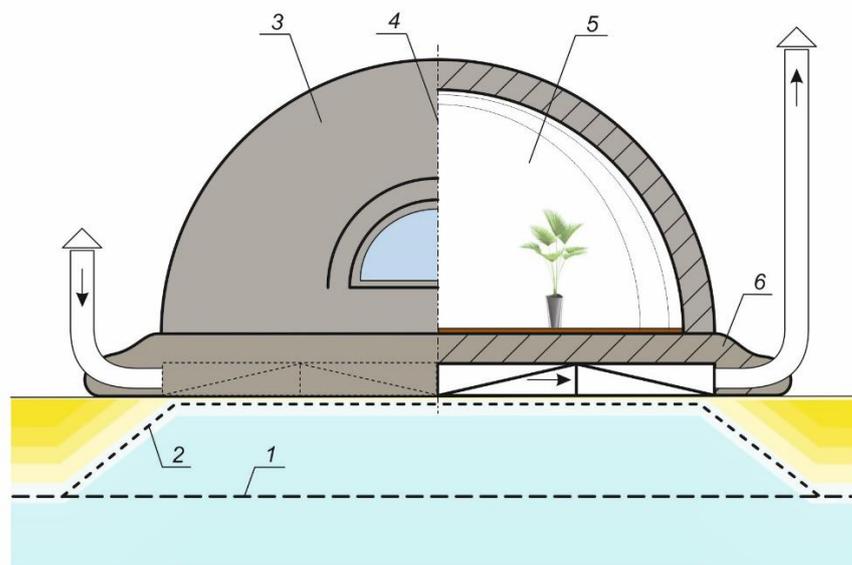


Рис. 1. Поперечный разрез здания-эллипсоида:

1 и 2 — Естественное и теоретическое положение ВГММГ; 3 — Ограждающая конструкция здания; 4 — ось симметрии; 5 — Жилое пространство здания; 6 — Теплоизолированная платформа-каркас. Стрелками указано направление потока воздуха.

Теплоизолированная платформа 6 на рис. 1 имеет вентиляционные окна, расположенные с каждой стороны эллипсоида вдоль оси здания с шагом 4 м. Вентиляция платформы осуществляется за счёт разницы высоты расположения соединённых с окнами воздухопроводов, что создаёт естественный поток воздуха для охлаждения основания зимой, в тёплое время года воздухопроводы перекрыты.

Вентилируемые каналы доказали свою эффективность в транспортных сооружениях на мерзлоте: автодорогах и нефтепроводах [16-18]. Охлаждающий эффект зависит от температуры и скорости потока воздуха в платформе-каркасе, последняя может быть увеличена такими мерами как: ориентируемый по направлению ветра фланец на выпускном воздуховоде [19], принудительная вентиляция с помощью канальных вентиляторов и т.п. Возможна автоматизация процесса поддержания заданной температуры в подполье за счёт регулирования скорости потока воздуха и проходного сечения каналов (дресселирования). Такой подход даёт возможность сделать процесс охлаждения основания управляемым и прогнозируемым, а эксплуатацию безаварийной.

В исследованиях рассматривалось два температурных режима эксплуатации платформы-каркаса: с учётом вентиляции и без, табл. 1. Без учёта вентиляции платформа-каркас рассматривалась как изолированная от атмосферы воздушная полость, а температура воздуха в платформе принималась по данным натурных наблюдений и климатических данных района строительства [1, 14].

Расчётная температура воздуха

Наименование	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VI	VII	IX	X	XI	XII
Среднемесячная температура наружного 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
Температура воздуха в платформе-каркасе без учёта вентиляции, °С	-7,1	-5,2	-0,8	-0,6	4,5	5,0	7,3	8,6	9,9	6,2	0,5	-6,3
Тоже с учётом вентиляции, °С	-10	-10	-7	-0,6	4,5	5,0	7,3	8,6	9,9	-0,5	-10	-10

*Серым выделены значения в режиме вентиляции платформы-каркаса.

Составлено автором.

В режиме вентиляции принимался диаметр воздуховодов вентиляционных окон равный 0,3 м, скорость потока воздуха — 0,8 м/с (на основании опыта эксплуатации [18, 19]). С 1 апреля по 30 сентября вентиляция платформы исключалась, температура воздуха приравнивалась значениям для режима без вентиляции, а в наиболее холодные месяцы (с ноября по март) — данным табл. 1. Как показали предварительные расчёты, более низкая температура воздуха в платформе-каркасе резко увеличивает потери тепла в здании через пол, что не оправдано экономически.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании динамики температурного поля основания определялась граница раздела грунта на мёрзлый и талый, характеризующаяся положением ВГММГ на конец сентября — начало октября. В этот период глубина сезонного оттаивания основания достигает максимального значения. Зная температуру каждого грунтового блока в расчётной области (температурное поле), эту границу можно визуализировать изотермой начала замерзания грунта [14].

Изменение положения ВГММГ под воздействием отапливаемого здания представлено на рис. 2. Здание смонтировано на теплоизоляционной подушке из гранулированной пеностеклокерамики высотой 1 м, которая не имеет проветриваемого каркаса. Эксплуатация такого здания приводит к постепенному понижению ВГММГ, положение которого через 2 года и 10 лет достигает глубины соответственно 1 и 2,9 м под осью симметрии. Результатом оттаивания слабонесущего грунта может стать потеря основанием несущей способности и

деформация здания. В этой связи дальнейшие численные эксперименты проводились с учётом влияния платформы-каркаса.

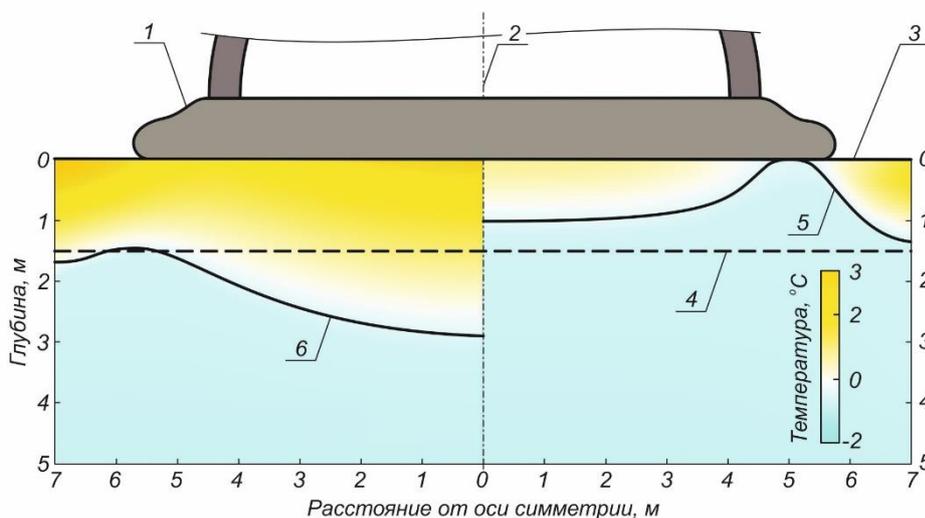


Рис. 2. Динамика температурного поля основания отапливаемого здания на теплоизоляционной подушке:

1 — теплоизоляционная подушка; 2 — ось симметрии; 3 — дневная поверхность; 4, 5 и 6 — положение ВГММГ до начала строительства, через 2 года и 10 лет.

Составлено автором.

На рис. 3 представлена динамика ВГММГ для здания на теплоизолированной платформе без учёта её вентиляции (проветривания). В сравнении с исходной конструкцией на рис. 2, температура грунта непосредственно под зданием увеличивается на 1 °С, что свидетельствует об отрицательном влиянии изолированной воздушной полости. Картина ВГММГ свидетельствует об изменении положения глубины, которая через 2 года и 10 лет достигает 1,4 и 2,5 м соответственно.

Таким образом, принятый в табл. 1 температурный режим (без учёта вентиляции) не отвечает требованию сохранения основания в мёрзлом состоянии для принятой конструкции платформы, что свидетельствует о необходимости снизить температуру воздуха внутри платформы. Как уже отмечалось выше, этому может способствовать вентиляция платформы в зимний период, в связи с чем в дальнейшем использовались температурные значения табл. 1 с учётом вентиляции.

Эффективность применения вентиляции платформы (естественной, либо принудительной) в зимний период отмечается на рис. 4. Результаты моделирования теплового взаимодействия здания с многолетнемёрзлым основанием свидетельствуют о наибольшем приближении ВГММГ к подошве здания. Так, положение ВГММГ через 2 года достигает глубины 0,5 м и сохраняется неизменным

в течение 30 лет эксплуатации. Сравнивая с динамикой температурного поля основания на рис. 2 и 3 за 10 лет, этот показатель ниже в 5,8 и 4,8 раза соответственно.

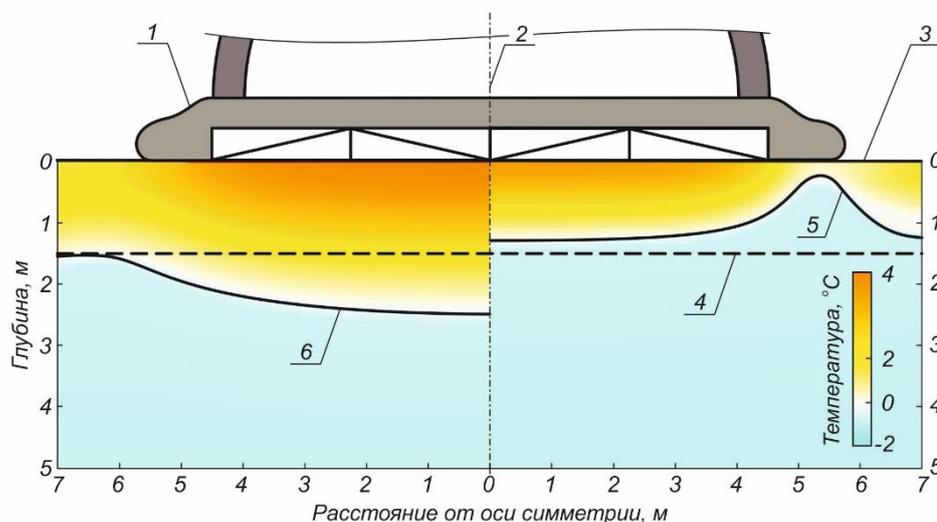


Рис. 3. Отапливаемое здание на теплоизолированной платформе:
1 — платформа-каркас; 2 — ось симметрии; 3 — дневная поверхность; 4, 5 и 6 —
положение ВГММГ до начала строительства, через 2 года и 10 лет.

Составлено автором.

Как показали дальнейшие расчёты, полностью исключить сезонное оттаивание основания позволяет принятый режим вентиляции с покрытием поверхности грунта внутри платформы слоем гранулированной пеностеклокерамики толщиной 0,15 м. Таким образом, наибольшей эффективностью обладает платформа-каркас с вентилируемой полостью, которая изолирована также и от грунта.

К недостатку предлагаемой технологии строительства на мерзлоте следует отнести ограничение внутренней ширины здания 8 метрами. Проветривание каркаса большей ширины, по-видимому, потребует усложнения системы вентиляции за счёт механического побуждения, увеличения числа каналов и т.д., что является предметом отдельного исследования. Однако, ограничение ширины компенсируется площадью здания, которая будет определяться длиной, т.к. по форме здание приближено к линейному сооружению. В результате полезная площадь будет зависеть от длины здания, которое может принимать также форму дуги, спирали и т.п., в зависимости от плана территории застройки.

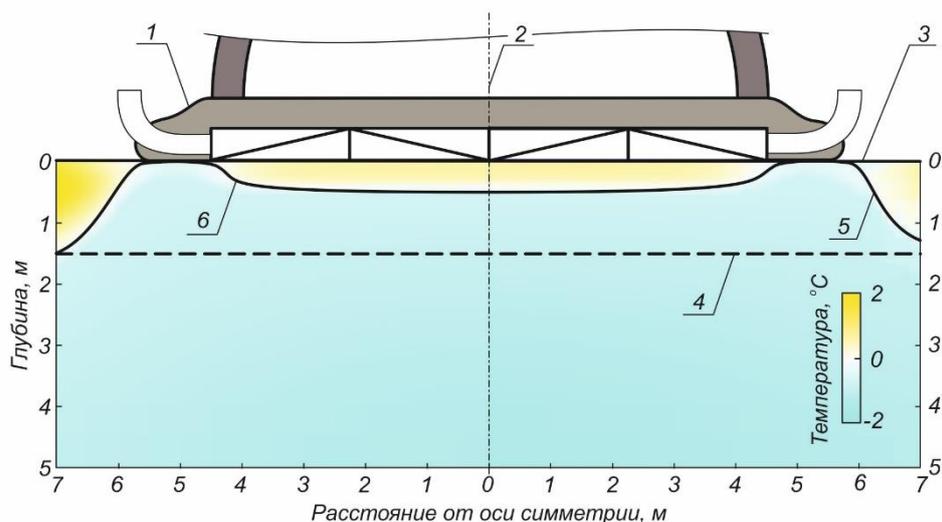


Рис. 4. Отапливаемое здание на теплоизолированной и вентилируемой платформе:
1 — платформа-каркас; 2 — ось симметрии; 3 — дневная поверхность; 4, 5 и 6 —
положение ВГММГ до начала строительства, через 2 года и 30 лет.

Составлено автором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальной эффективностью обладает техническое решение, включающее вентилируемый в зимний период каркас, изолированный от окружающей среды и грунта слоем из гранулированной пеностеклокерамики. Конструкция позволяет полностью исключить сезонное оттаивание основания, снизив риск эксплуатации отапливаемого здания в криолитозоне, существенно повысив его несущую способность. Технология имеет перспективу увеличения этажности строительства отапливаемых зданий. По истечении срока эксплуатации здания, вентилируемая конструкция может быть демонтирована без нанесения вреда окружающей среде, тогда как перенос и демонтаж традиционных конструкций (свайных фундаментов и СОУ) невозможен.

В отличие от традиционных методов предложенная технология не нарушает ландшафт криолитозоны и естественный растительный покров в связи с исключением земляных работ. Применение технологии способствует удешевлению и рационализации строительства малоэтажных зданий в Арктике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0007).

Список литературы

1. Корнилов Т.А., Никифоров А.Я., Сивцев М.А. Прогнозирование состояния мёрзлого основания здания на свайном фундаменте с регулируемым температурным режимом подполья // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2021, № 2, с. 27–31.
2. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 82–90.
3. 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. Article No. 01089.
4. Vangool W.J. Mechanical foundation system for new and retrofit construction. 6th International Structural Specialty Conference. Fredericton. Canada. 2018. pp. 27–35.
5. Makarov D.V., Manakova N.K., Suvorova O.V. Production of rock-based foam-glass materials (review). Class and Ceramics. 2023. 79. P. 411–416.
6. 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. 142. pp.119–127.
7. 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. 299. pp.293–298.
8. 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. 84(8). pp. 48–56.
9. Астапов А.П., Боровский В.В., Воронин А.С. Северо-Тюменская субпровинция кристобалитопаловых пород – уникальная минерально-сырьевая база Западно-Сибирского промышленного комплекса // Вестник недропользователя. 2004. № 14.
10. Колодезников К.Е. Цеолитоносные провинции востока Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 2003. 204 с.
11. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. Москва, Стандартинформ, 2018. 74 с.
12. Мельников В.П., Коротков Е.А., Иванов К.С., Шехтман Е.В., Дашинимаев З.Б., Сигачев Н.П., Клочкин Я.М. Утепление железобетонных конструкций для пропуска дренажных вод на Забайкальской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 7. с. 13–15.
13. Мельников В.П., Мельникова А.А., Иванов К.С. Применение гранулированной пеностеклокерамики в арктическом строительстве малоэтажных зданий. Арктика: экология и экономика. 2022. №2. С. 271–280.
14. Иванов К.С. Влияние теплоизоляционной подушки на температурный режим основания малоэтажного здания в криолитозоне // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, 2023. Том 9 (75). № 3. С. 117–129.
15. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва, ФЦС, 2012. 120 с.
16. Cheng G., Sun Z., Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai–Tibet railway engineering. Cold Regions Science and Technology. 2008. 53. pp. 241–258.
17. 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. 13. 2908.
18. 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.
19. Пат. 2792466 РФ. Автономное охлаждающее устройство. Устьян Н.А. Заявл. 08.11.2022; опубл. 22.03.2023. Бюл. № 9.

ARCTIC CONSTRUCTION USING LOCAL RAW MATERIALS

Ivanov K. S.

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

The problem of construction of heated low-rise buildings in the Arctic is considered. An environmentally friendly method is proposed that does not require excavation work in the permafrost and does not disturb the natural vegetation. The heated building is mounted on a platform, which is a metal frame with a heat-insulating cushion laid on top, while the platform can be ventilated only in the cold season. Granulated foam glass ceramics, obtained from raw materials widely distributed in the Arctic regions: opal-cristobalite and zeolite rocks, is used for thermal insulation of the platform. Thermal interaction of the permafrost base and the heated building on the platform using computer modeling was studied. The disadvantage of the proposed permafrost construction technology is the limitation of the internal width of the building to 8 meters. Ventilation of a wider frame will apparently require a more complex ventilation system due to mechanical inducement, an increase in the number of channels, etc., which is the subject of a separate study. However, the width limitation is compensated by the area of the building, which will be determined by the length, since the shape of the building is close to a linear structure. As a result, the usable area will depend on the length of the building, which can also take the form of an arc, a spiral, etc., depending on the plan of the development area. The proposed method eliminates the formation of a seasonally thawed layer in the base of the building and ensures year-round preservation of the soil in a frozen state, as a result the bearing capacity of the base and number of storeys of buildings are increased. The ventilated structure can be dismantled at the end of the building's service life, without harming the environment, while the transfer and dismantling of traditional structures as pile foundations and seasonal cooling devices is impossible. Due to this method transportation and construction costs are reduced, excavation work and seasonal cooling devices are eliminated, the permafrost, landscape and arctic ecosystems are preserved.

Keywords: permafrost soil, thermal insulation material, construction, low-rise buildings.

References

1. Kornilov T.A., Nikiforov A.YA., Sivtsev M.A. Prognozirovaniye sostoyaniya merzlogo osnovaniya zdaniya na svaynom fundamente s reguliruyemym temperaturnym rezhimom podpolya. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, 2021, no. 2, pp. 27–31.
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. 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. Article No. 01089.
4. Vangool W.J. Mechanical foundation system for new and retrofit construction. 6th International Structural Specialty Conference. Fredericton. Canada. 2018. pp. 27–35.
5. 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.

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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).
10. Kolodeznikov K.E. Tseolitonosnyye provintsiy vostoka Sibirskoy platformy (Zeolite-bearing provinces of the east of the Siberian Platform). Novosibirsk: Nauka. 2003, 204 p. (in Russian).
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. Melnikov V.P., Korotkov Y.A., Ivanov K.S., Shekhtman Y.V., Dashinimayev Z.B., Sigachev N.P., Klochkov Y.M. Utepleniye zhelezobetonnykh konstruksiy dlya propuska drenaznykh vod na Zabaykalskoy doroge . Put' i putevoye khozyaystvo. 2017. no. 7. pp. 13–15.
13. 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.
14. Ivanov K.S. Vliyaniye teploizolyatsionnoy podushki na temperaturnyy rezhim fundamenta maloetazhnogo zdaniya v kriolitozone. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2023, no. 3. pp. 117–129.
15. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh (Bases and foundations on permafrost soils). Moscow: FTSS, 2012. 120 p, (in Russian).
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Pat. 2792466 RF. Avtonomnoye okhlazhdayushcheye ustroystvo (Autonomous cooling device). Ustyan N.A. Zayavl. 08. 11.2022; № 9.

Поступила в редакцию 23.09.2025 г.