

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Горбунова А.А., Гунар А.Ю., Озерицкий К.В., Балихин Е.И. Эффективность использования теплового насоса при строительстве зданий на участках с загубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72296 EDN: KJQOXB URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72296

Эффективность использования теплового насоса при строительстве зданий на участках с загубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород

Горбунова Алина Александровна

ORCID: 0000-0002-2939-7609

аспирант кафедры геокриологии; геологический факультет; Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1

✉ Gorbunova.alina2000@yandex.ru

Гунар Алексей Юрьевич

ORCID: 0000-0003-2878-0849

кандидат технических наук

доцент кафедры геокриологии; Геологический факультет; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1

✉ gunar_91@mail.ru

Озерицкий Константин Владимирович

ORCID: 0000-0003-1970-6735

аспирант; факультет гражданского строительства; Школа инженерии им. Шулиха, Университет Калгари (Канада)

AB T2N 1N4, Канада, провинция Альберта, г. Калгари, ул. Колледж-Плейс, 622

✉ ozeritskiy.k@gmail.com

Балихин Ермолай Игоревич

аспирант кафедры геокриологии; Геологический факультет; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1

✉ ermolaybalihin@mail.ru

[Статья из рубрики "Инженерная геология холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.4.72296

EDN:

КJQOXB

Дата направления статьи в редакцию:

11-11-2024

Дата публикации:

20-11-2024

Аннотация: В настоящее время существует проблема надежности зданий и сооружений, построенных на многолетнемерзлых грунтах по I принципу, которая обусловлена зависимостью стандартных проектных решений от климатической составляющей. Решение данной проблемы предусматривает внедрение методов активной термостабилизации грунтов, что позволяет эффективно управлять тепловыми потоками и обеспечивать сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии. Одним из ключевых решений, предлагаемых авторами, является использование теплового насоса с размещением охлаждающего контура в грунтовом массиве. Применение тепловых насосов в строительстве на участках с многолетнемерзлыми грунтами представляет собой инновационный подход, обеспечивающий безопасность и эффективность эксплуатации зданий. В статье на конкретном примере здания в г. Салехард рассмотрена возможность использования теплового насоса на участке с заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород. Методы исследований включают в себя анализ и обобщение литературных источников и многовариантные вычислительные эксперименты по исследованию температурного поля грунтов основания здания с применением теплового насоса. Основным выводом проведенного исследования является целесообразность применения тепловых насосов при строительстве зданий на участках с заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород. Предложенный в данной статье инновационный метод сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии, при его практическом применении, окажется эффективным решением на фоне нового природного вызова — глобального потепления климата. Помимо сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии и обеспечения стабильной работы зданий и сооружений в криолитозоне, тепловые насосы обеспечивают значительную экономическую выгоду за счет снижения эксплуатационных затрат. Также тепловые насосы способствуют снижению выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ, что важно в контексте глобальных изменений климата и стремления к устойчивому развитию.

Ключевые слова:

строительство, многолетнемерзлые грунты, заглубленная кровля, льдистые породы, повышение температуры воздуха, тепловые насосы, охлаждение основания, Салехард, термостабилизация, инновационный подход

Статья выполнена при поддержке гранта Департамента внешних связей ЯНАО, предусматривающего проведение научных исследований в области мерзлотоведения на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Договор № 601-19-01/11 от 01.07.2024 «Апробация использования тепловых насосов для целей термостабилизации

грунтов оснований зданий и сооружений».

Введение

Потепление климата оказывает существенное воздействие на существующие здания и сооружения в криолитозоне. Так, для зданий севера Европейской части 60 – 80-х годов постройки по I принципу строительства на ММГ снижение несущей способности свайного основания достигает 25% [\[1\]](#). Районы Салехарда, Надыма и Нового Уренгоя характеризуются снижением на 15 – 25 % несущей способности по грунту [\[2\]](#). Для территории Воркуты при стабильном повышении температуры воздуха с трендом 0,04 °С/год, тренд изменения средней температуры ММГ до глубины 10 м составляет от 0,02 до 0,04 °С/год с минус 1,5 °С до минус 0,5 и плюс 0,5 °С соответственно, что приведет к снижению несущей способности более чем на 50% [\[3\]](#). В работе [\[4\]](#) отмечается, что снижение несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений в муниципальных образованиях Арктической зоны Российской Федерации прогнозируется в диапазоне от 2 до 100% к 2050 году и если текущие климатические тенденции продолжат сохраняться, опасные последствия деградации многолетнемерзлых грунтов станут неизбежными.

Снижение несущей способности и увеличение количества осадок зданий, за счет оттаивания ММГ, требует разработки и внедрения системы мониторинга состояния оснований практически на всех объектах инфраструктуры на ММГ. Однако мониторинг и своевременное решение возникающих проблем не является оптимальным способом эксплуатации сооружений. В настоящее время перед нами стоит задача разработки и реализации решений, которые обеспечат стабильную работу объектов в криолитозоне в условиях глобального потепления климата. Одним из таких решений является применение при строительстве на многолетнемерзлых грунтах тепловых насосов [\[5, 6\]](#).

Тепловой насос (ТН) – это устройство, позволяющее аккумулировать тепло низкопотенциальных источников и с помощью затраченной работы передавать его нагревательной системе с более высокой температурой [\[7, 8, 9\]](#). В контексте изменения климата активное охлаждение грунтов становится перспективным решением для оснований зданий и сооружений. Технологии наземного теплового насоса, применяемые в регионах с умеренным климатом в качестве источника возобновляемой энергии, необходимо адаптировать и для условий криолитозоны с целью поддержания стабильно низкой температуры грунта. Система, функционирующая на основе теплового насоса, извлекает тепло из грунта с помощью геотермальных контуров и теплоносителя. Тепло, теряемое через основание здания, может быть утилизировано, а температура грунта снижена до необходимого значения.

Опыт применения тепловых насосов к криолитозоне

На практике концепция применения ТН в северном строительстве была впервые реализована выдающимся норвежским инженером Бьерном Инстанесом [\[10\]](#). В 1986 г. в населенных пунктах Свергрув и Лонгьебин, которые расположены на острове Шпицберген в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов, он оборудовал теплонасосными охлаждающими установками основания двух складских помещений (площадью по 900 м²) и одного магазина. С их помощью грунты оснований в течение всего года поддерживаются при постоянной температуре около минус 10 °С.

В 1988 году экспериментальные исследования в этом же направлении проводились в

канадских поселках Росс Ривер и Олд Кроу на территории Юкона^[11]. Системы охлаждения двух гаражей площадью по 350 м² состояли из полистирольной изоляции, труб испарителя и гравелистой подушки, опирающейся на мерзлые грунты. В качестве хладагента использовалась водная смесь метил-гидрата с температурой кипения в испарителе -10 °С. В обоих случаях применялись плитные фундаменты, которые в течение 2-х лет наблюдений надежно обеспечивали устойчивость зданий. На электроприводе компрессора использовалась дешевая энергия местной гидроэлектростанции, что обеспечило заметную экономию.

В работах^[12, 13] предложена методика круглогодичного замораживания грунтов путем подачи охлаждаемого холодильной машиной теплоносителя к термоэлементам, размещенным внутри свай. Термоэлементы сохраняют грунты основания в мерзлом состоянии за счет тепловой энергии, вырабатываемой технологическими источниками, расположенными на фундаменте (дизель-генераторы, электродвигатели и т.д.). В работе отмечена возможность размещения термоэлементов внутри свай на разной глубине, что приводит к более эффективному охлаждению грунтов основания.

Крупный проект по применению тепловых насосов проводился в Лонгхире, крупнейшем населенном пункте на Шпицбергене. Основание площадью 3400 м² непрерывно охлаждается в течение всего срока эксплуатации здания. Создана и верифицирована трехмерная модель, имитирующая температурный режим грунта под охлаждающей плитой. Оценка годовых эксплуатационных расходов составляет от 16 000 до 54 000 норвежских крон (от 142,3 до 480,4 тыс. рублей) в зависимости от эффективности теплового насоса и температуры охлаждения. Хорошо функционирующая система мониторинга является неотъемлемым компонентом данной технологии, позволяя предотвратить незамеченные отключения электроэнергии, которые могут привести к повышению температуры грунта на 4 °С в течение одного года. В работе отмечается эффективность применения тепловых насосов в районах с многолетнемерзлыми грунтами и грунт остается замороженным даже при отключении системы охлаждения зимой в течение трех месяцев подряд. Это означает, что система может быть отключена в течение определенного периода времени в темное время года и питаться от солнечной энергии в теплый сезон. Таким образом, результаты указывают на возможность разработки автономной системы охлаждения, которая может быть интегрирована с возобновляемым источником энергии, таким как солнечная энергия, для питания системы^[14].

В России применение тепловых насосов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах не так распространено, как за рубежом, однако работа в этом направлении ведется и имеются как теоретические и расчетные работы^[15], так и полевые эксперименты^[16]. Большое количество изобретений по конструкциям и способам использования тепловых насосов в строительстве на мерзлых грунтах пока дожидаются своего часа для использования на практике. Одним из таких изобретений является поверхностный фундамент со встроенными контурами теплового насоса, применение и эффективность которого подробно рассматривается в данной работе.

Актуальность выполненной работы

Наиболее распространенный способ возведения зданий на многолетнемерзлых грунтах, разработанный и внедренный в строительную практику в СССР – использование проветриваемого подполья под сооружением. При этом проветриваемое подполье может использоваться как на участках с мерзлотой сливающегося типа, так и на участках с

заглубленной кровлей – в первом случае подполье выхолаживает грунты основания, что повышает их несущую способность, а во втором регулирует количество поступающего в массив тепла, предотвращая промерзание и протаивание грунтов под зданием. Сейчас широко используются методы термостабилизации с использованием сезонно-охлаждающих установок – они могут быть размещены как под зданиями, так и по контуру сооружения. В меньшей степени используются технологии управления геокриологическими параметрами, такие как расчистка снега вокруг здания или использование теплоизоляции для уменьшения сезонного протаивания вокруг зданий. Однако все перечисленные выше способы строительства имеют один общий недостаток – все они зависимы от климата. С увеличением среднегодовой температуры воздуха, каждый из перечисленных способов теряет свою эффективность. Если тренд на потепление в ближайшие годы не будет сломлен, то уже через 2 – 3 десятка лет, в южных районах распространения многолетнемерзлых пород эти методы будут неэффективны и потребуют дополнительных экономических вложений.

Существует мнение, что применение морозильных установок для поддержания мерзлого состояния грунтового массива на протяжении 50 – 80 лет эксплуатации сооружения является изначально чрезмерно затратным решением. Однако сочетание теплового насоса и современных теплоизоляционных материалов может существенно снизить экономические расходы. Теплоизоляционные плиты снижают тепловой поток от сооружения в грунтовый массив, а использование теплового насоса, позволяет выкаченную тепловую энергию конвертировать в дополнительный источник тепла в обогревателях или системах водоснабжения. В России получен патент и разрабатывается плитный малозаглубленный фундамент для легких зданий, содержащий в себе холодный и теплый контур теплового насоса [\[17\]](#). Холодный контур плиты охлаждает грунты основания, а тепло отведенное из основания идет на обогрев пола здания. Переток тепла из теплого контура в холодный минимизируется за счет использования слоя теплоизоляции (рис. 1).

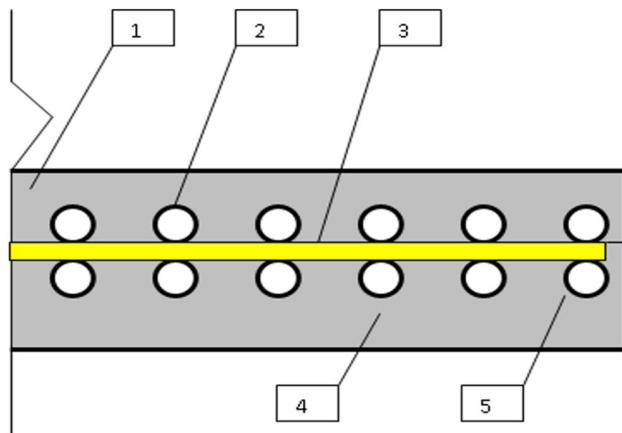


Рисунок 1 - Фрагмент модуля поверхностного фундамента: 1 – верхняя часть железобетонной плиты; 2 – змеевик греющего контура теплового насоса; 3 – теплоизолятор; 4 – нижняя часть железобетонной плиты; 5 – змеевик охлаждающего контура теплового насоса [\[17\]](#)

При строительстве же тяжелых зданий, предложенная технология не позволит обеспечить достаточную несущую способность грунтов основания. Решением этой проблемы является масштабирование – необходимо разместить охлаждающий контур достаточно глубоко в грунтовом массиве.

Использование теплового насоса при строительстве зданий на участках с заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород рассмотрим на примере одного из жилых домов города Салехард Ямalo-Ненецкого автономного округа. В качестве фундаментов сооружения используются железобетонные сваи сечением 30×30 см и длиной 11,0 м. Нагрузки, передаваемые на одну сваю, составляют до 94,45 тс. Температура внутри здания плюс 20 °С. Продолжительность отопительного периода составляет от = 8 мес = 5760 ч. Температура подстилающих многолетнемерзлых грунтов – $t_0 = -0,3$ °С. Здание имеет фундамент в виде железобетонной плиты со встроенными греющими и охлаждающими контурами теплового насоса (ТН) в виде системы змеевиков из полиэтиленовых труб, расположенных с шагом $s = 0,18$ м. Наружный диаметр труб $d_{out} = 0,06$ м, внутренний $d_{in}=0,054$ м.

Краткое описание района исследований

Район расположен в северо-западной части Западно-Сибирской низменности и представляет собой сравнительно высоко приподнятую над уровнем моря равнину Обско-Полуйского водораздела.

Территория, на которой расположены окрестности г. Салехарда и прилежащих населённых пунктов, относится к субарктическому климатическому поясу. Средняя температура воздуха в течение года в Салехарде равна -6,2 °С. Самым холодным месяцем года является январь со среднемесячной температурой воздуха -24,2 °С, а самым тёплым – июль, когда воздух прогревается в среднем до 15 °С. Средняя высота снежного покрова достигает 57 см (максимум в апреле).

Таблица 1 - Климатические характеристики района исследований

	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °С	- 24,2	- 23,5	- 15,4	-9,2	-1,1	8,6	14,4	11,1	5,3	-4,1	- 15,2	- 20,6
Скорость ветра, м/с	3,8	3,6	4,1	4,4	4,5	5,0	4,6	4,1	4,2	4,5	3,9	3,7
Средняя высота снежного покрова, м	0,42	0,49	0,56	0,57	0,36	-	-	-	-	0,07	0,21	0,33

Площадка строительства расположена на III озерно-аллювиальной террасе. Геологический разрез площадки представлен сверху вниз:

- до глубины 2,3 м - насыпными грунтами песками пылеватыми со строительным мусором;
- до глубины 3,7 м - озерно-аллювиальными песками пылеватыми;
- до глубины 9,9 м - озерно-аллювиальными глинами и суглинками;
- ниже 9,9 м - озерно-аллювиальными песками пылеватыми и мелкими.

Все грунты незасоленные, не содержат крупнообломочных включений и органических веществ.

Площадка сложена многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) сливающегося и несливающегося типов с глубиной погружения кровли мерзлых грунтов от 3,4 до 13,1 м.

Среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м составляет от плюс 0,2 °С до минус 0,3 °С. Глубина сезонного промерзания-оттаивания (СМС - СТС) грунтов составляет 1,5 - 2,2 м. Многолетнемерзлые грунты представлены песками пылеватыми и мелкими льдистыми массивной криотекстуры, суглинками слоистой криотекстуры и глинами слоисто-сетчатой криотекстуры. Талые грунты площадки представлены песчаными грунтами - песками пылеватыми средней плотности и средней степени водонасыщения, суглинками мягкотпластичными и глинами тугопластичными. Физические и теплофизические характеристики грунтов представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Физические и теплофизические характеристики грунтов

Грунт	Плотность грунта в сухом состоянии, ρ_d , кг/м ³	Температура начала замерзания, °C T_{bf}	Теплопроводность талого грунта, Вт/(м·°C) λ_{th}	Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°C), λ_f	Объем теплоемкость талого грунта, Дж/(м ³ ·10 ⁻⁶)
Насыпной грунт - песок	1820	-0,10	1,8	2,0	2,4
Песок мелкий	1930	-0,19	2,80	2,21	2,
Суглинок льдистый	1850	-0,20	1,57	2,02	3,2
Суглинок слабольдистый	1860	-0,20	1,63	1,96	3,1
Глина	1600	-0,2	1,96	1,63	2,2

Математическое моделирование температурного поля

Постановка задачи

При назначении расчетной области мы руководствовались опытом постановки подобных задач, согласно которому размеры области должны превышать размеры теплоисточника не менее, чем в 2,5 раза. Исходя из этого, в качестве расчетной области принят трехмерный грунтовый массив глубиной 70 м, с размерами в плане 350,0×250,0 м. Шаг сетки принят аддитивным от $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ до $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м. Общий вид расчётной области представлен на рисунке 2. Задаваемые верхние граничные условия представлены в таблице 3

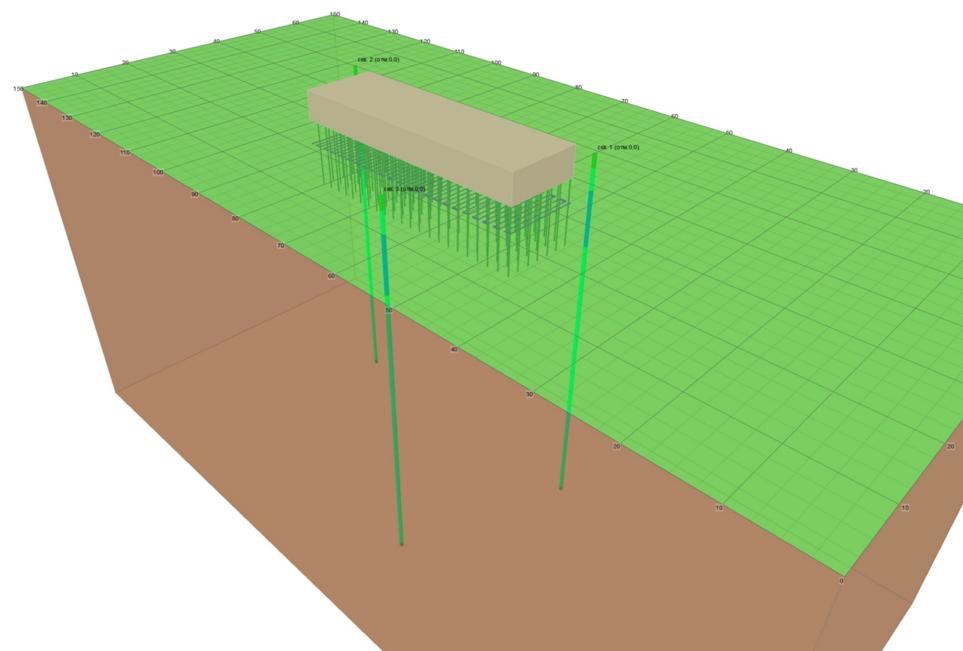


Рисунок 2 - Общий вид расчетной области

Таблица 3 - Верхние граничные условия по результатам калибровки

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_e, {}^\circ\text{C}$	-24,2 23,5	- 23,5	- 15,4	-9,2	-1,1	8,6	14,4	11,1	5,3	-4,1	- 15,2	-20,6
$a_e,$ $\text{Вт}/\text{м}^2\text{C}$	0,65	0,61	0,62	0,66	0,78	11,5	11,46	10,53	10,78	0,71	0,61	0,63

Условные обозначения: T_e – температура воздуха; a_e – коэффициент теплообмена.

Учет изменения температуры воздуха

Расчеты выполнены с учетом глобального изменения климата из температурных наблюдений путем сопоставления метеорологических рядов до 1970 г. с рядами после 1970 г. и их экстраполяции на будущее. Методика такого анализа среднегодовой температуры воздуха была разработана на кафедре геокриологии МГУ в 2000 г и названа авторами методикой авторетроспективного анализа [18]. Прогнозная формула (1), состоит из суммы периодических составляющих, моделирующих естественный ход температуры воздуха, одной линейной составляющей (тренда), моделирующей антропогенные изменения температуры воздуха после рубежного года. Для города Салехард прогнозная формула выглядит следующим образом:

$$T_{hg}(t^*) = -6,21 + \sum_{j=1}^{14} A_j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{y_j} \cdot t^* + \phi_j\right) + 0.02 \cdot (t^* - 1979), \quad (1)$$

где t – время в календарных годах; T_{cp} (-6,21) – средняя многолетняя температура на базовом интервале, ${}^\circ\text{C}$; A_j – амплитуды гармоник, ${}^\circ\text{C}$; ϕ_j – фазы гармоник, рад; y_j – периоды, лет, N – количество гармоник; g – антропогенный тренд; t_p (1979) – рубежный год.

Результаты расчетов

По результатам работы выполнена оценка температуры грунта на глубине заложения свайного фундамента (11 м) через 50 лет эксплуатации здания в зависимости от расстояния охлаждающего контура от тепловыделяющей границы и времени работы теплового насоса. Результаты математического моделирования представлены на рисунке 3. Результаты расчета температурного поля при расположении охлаждающего контура на 5 м от тепловыделяющей границы при разном времени работы ТН, представлены на рисунках 3 – 6. Для сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии время работы ТН должно превышать 2 месяца не зависимо от расстояния заложения охлаждающего контура от тепловыделяющей границы и более 3 месяцев при расстоянии от тепловыделяющей границы менее 3,3 метров. Для определения оптимального варианта расстояния от тепловыделяющей границы и времени работы ТН выполнена оценка значений несущей способности по грунту в соответствии с СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [19]. Результаты расчета показали, что несущая способность по грунту обеспечивается на все времена эксплуатации здания при времени работы ТН более 3-х месяцев и 3 месяца при расстоянии от тепловыделяющей границы 4 и более метров.

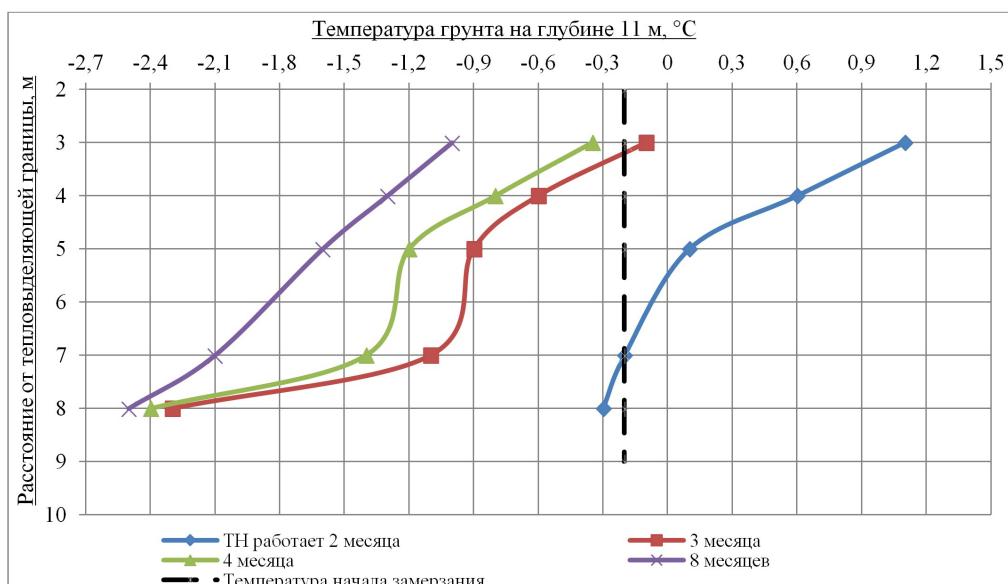


Рисунок 3 - Результаты расчета температуры грунта на глубине 11 м, через 50 лет эксплуатации здания в зависимости от расстояния охлаждающего контура от тепловыделяющей границы и времени работы ТН

Таблица 4 - Результаты расчета несущей способности по грунту, кН

Время работы теплового насоса	Расстояние от тепловыделяющей границы, м				
	3	4	5	7	8
2 месяца	-	-	-	-	834
3 месяца	-	2098	1960	1462	1457
4 месяца	2204	2160	2067	1564	1476
8 месяцев	2530	2263	2207	1737	1496

Помимо сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии и обеспечения стабильной работы зданий и сооружений в криолитозоне, тепловые насосы обеспечивают значительную экономическую выгоду и способствуют снижению выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ, что важно в контексте глобальных изменений климата и стремления к устойчивому развитию. Кроме того, постановлением

Правительства от 11 марта 2023 года №373 проекты, при реализации которых используется технология электрических тепловых насосов, могут претендовать на льготное финансирование через специальные облигации или займы, что также сможет существенно снизить первоначальные затраты на установку и применение ТН.

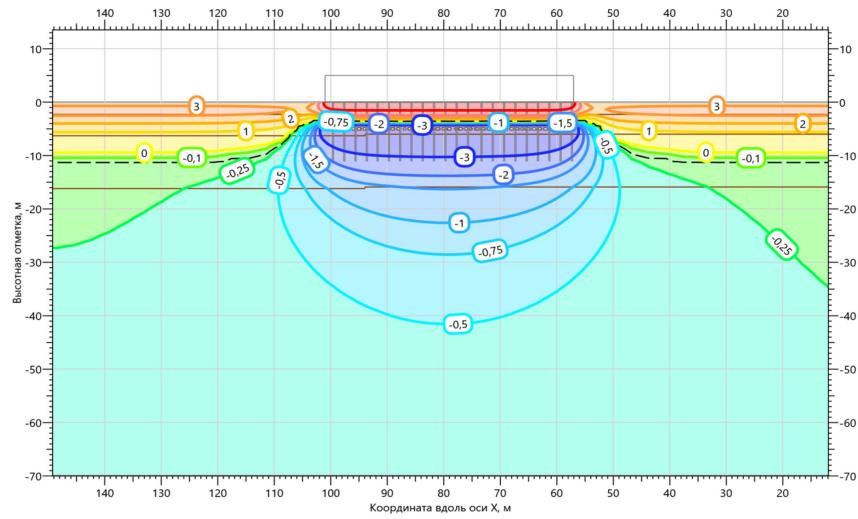


Рисунок 3 - Температурное поле через 50 лет эксплуатации при расположении охлаждающего контура на 5 м от тепловыделяющей границы и времени работы 12 месяцев

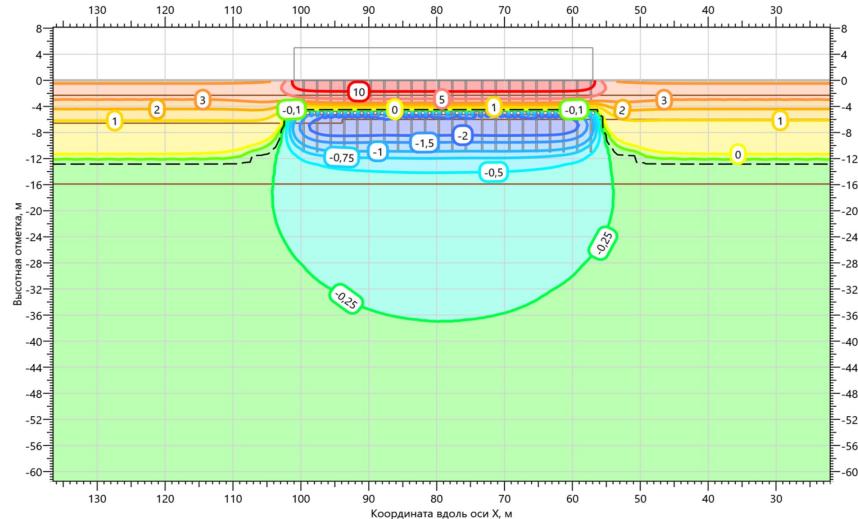


Рисунок 4 - Температурное поле через 50 лет эксплуатации при расположении охлаждающего контура на 5 м от тепловыделяющей границы и времени работы 4 летних месяца

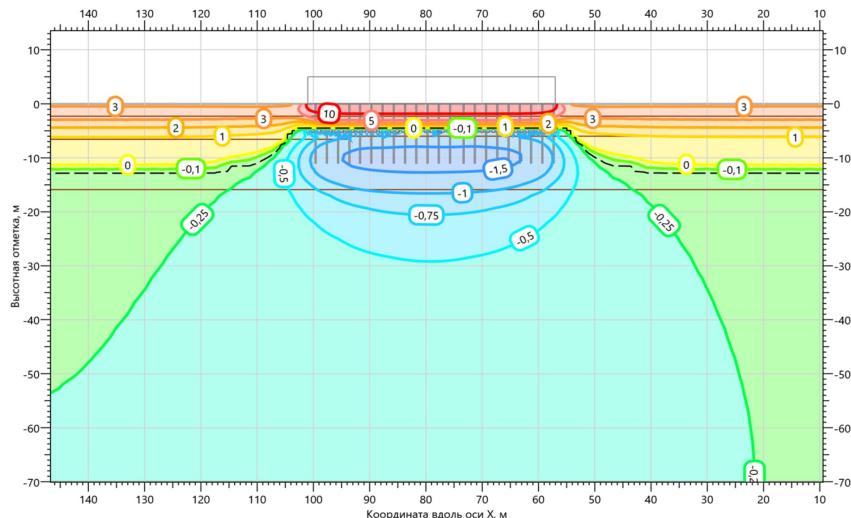


Рисунок 5 - Температурное поле через 50 лет эксплуатации при расположении охлаждающего контура на 5 м от тепловыделяющей границы и времени работы 8 зимних месяцев

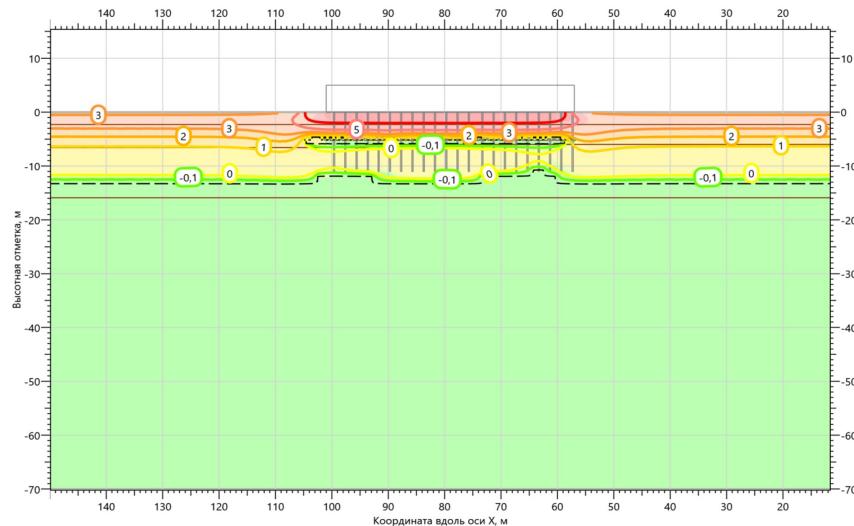


Рисунок 6 - Температурное поле через 50 лет эксплуатации при расположении охлаждающего контура на 5 м от тепловыделяющей границы и времени работы 2 месяца

Вывод

Выбор того или иного технического решения на этапе проработки проекта должен основываться на технико-экономическом сравнении вариантов, однако зависимость от климата стандартных проектных решений создает некоторую неопределенность в оценке надежности сооружений на всем сроке их эксплуатации. Решением этой проблемы является закладывание в проект методов активной термостабилизации грунтов. Для участков высоких насыпей охлаждающий контур позволяет создать буферную зону циклически промерзающих и оттаивающих грунтов, которая полностью исключает тепловой поток от здания к заглубленной кровле многолетнемерзлых пород. Для участков с мерзлотой сливающегося типа тепловые насосы могут рассматриваться как резервирующее устройство – в случае, если заложенные в проекте климатические параметры выйдут за допустимые пределы, включение заложенной на этапе проекта охлаждающей установки исключит оттаивание основания. Экономическая целесообразность предложенного решения обуславливается снижением эксплуатационных затрат и практически полным исключением проблем, связанных с оттаиванием мерзлого основания.

Библиография

1. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата. *Construction and geotechnics* T. 12, № 3, 2021.
2. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири. *Криосфера Земли*, 2012, т. XVI, № 1, С. 22–32.
3. Алексеев А.Г., Зорин Д.В. и др. Прогноз изменения температуры грунтов на территории Республики Коми (Городской округ Воркута). Научно-исследовательская работа, АО «НИЦ «Строительство». Москва, 2018.
4. Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2023. № 5. С. 105–116.
5. Горбунова А.А. Новый способ использования высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований одноэтажных зданий в условиях глобального потепления климата // *Науч. вестн. Ямало-Ненец. автоном. округа*, 2023, т. 118, № 1, С. 38–54.
6. Хрусталев Л.Н., Хилимонюк В.З. Новый фундамент для зданий в Арктике // *Криосфера Земли*, 2018, т. XXII, № 4, с. 25–30.
7. Макмайл Д. Тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1982.
8. Кибл Дж. Применение и экономика тепловых насосов // Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1983, С. 56 - 65.
9. Мартыновский В.С. Тепловые насосы. М.-Л., Госэнергоиздат, 1955.
10. Instanes B. Permafrost engineering on Svalbard // International Work-shop on Permafrost engineering Longyearbyen, Svalbard, Norway, 2000.
11. Stenbeak-Nielson, Sweet L.R. Heating with Ground Heat, An Energy saving Method for Home Heating // *The Northern*. 1975. No. 7(1). Pp. 20 – 25.
12. Lavrik A., Buslaev G., Dvoinikov M. Thermal Stabilization of Permafrost Using Thermal Coils Inside Foundation Piles. *Civil Engineering Journal*. 2023. No.9(4). Pp. 927 – 938.
13. Khalil A., Attom M., Khan Z., Astillo P.V., El-Kadri O.M. Recent Advancements in Geothermal Energy Piles Performance and Design. *Energies*. 2024, No. 17. Pp. 5 – 9.
14. Heller S. A. Numerical Simulation of Permafrost Thermal Regime under a Heat Pump Chilled Foundation in Longyearbyen, Svalbard Master's thesis in Civil Engineering and Cold Climate Engineering (UNIS), Rao Martand Singh (NTNU), 2021.
15. Горбунова А. А. Термодинамический расчет теплового насоса, совмещенного с поверхностным фундаментом на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2024. Т. 28, № 3. С. 63 – 69.
16. Гулый С.А. Опыт использования льда и снега при строительстве ледяного склада в Магадане // Колыма, 2000, № 1, С. 53 – 55.
17. Хрусталев Л.Н., Хилимонюк В.З., Перльштейн Г.З., Каманин Д.В. Поверхностный фундамент сооружения, обеспечивающий сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии с одновременным обогревом сооружения. Патент № 2583025, Бюл. № 12, 2016.
18. Хрусталев Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. М.: Университетская книга, 2011.
19. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом исследования в данной работе является изучение эффективности использования теплового насоса при строительстве зданий на участках заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород.

Методология исследования основана на методах активной термостабилизации циклично промерзающих и оттаивающих грунтов (при помощи методов математического моделирования температурного поля).

Актуальность. В настоящее время, в связи с потоплением климата на планете, существует актуальная проблема поддержания мерзлого состояния грунтового массива в криолитозонах. Однако, применение морозильных установок для этих целей является чрезмерно затратным решением. Решение данной проблемы возможно за счет применения теплового насоса и современных теплоизоляционных материалов, применяемых при строительстве зданий и сооружений. Теплоизоляционные плиты снижают тепловой поток от сооружения в грунтовый массив, а использование теплового насоса, позволяет выкаченную тепловую энергию конвертировать в дополнительный источник тепла в обогревателях или системах водоснабжения. Тепловые насосы, помимо сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии и обеспечения стабильной работы зданий и сооружений в криолитозоне, обеспечивают значительную экономическую выгоду и способствуют снижению выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ, что важно в контексте глобальных изменений климата и стремления к устойчивому развитию. Поэтому, тема, рассматриваемая автором статьи очень актуальная и требует научного обоснования.

Научная новизна заключается в получении патента и разработке плитного малозаглубленного фундамента для легких зданий, содержащего в себе холодный и теплый контур теплового насоса. Холодный контур плиты охлаждает грунты основания, а тепло отведенное из основания идет на обогрев пола здания. При строительстве же тяжелых зданий, предложенная технология не позволит обеспечить достаточную несущую способность грунтов основания. Решением этой проблемы является масштабирование – необходимо разместить охлаждающий контур достаточно глубоко в грунтовом массиве.

Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Однако, по мнению рецензента, следует немного расширить объём текстовой части статьи (должно быть свыше 12 тыс. знаков по требованиям журнала).

Считаем, что, исходя из содержания статьи, в ее названии слово «перспективы» можно заменить на слово «эффективность»: «Эффективность использования теплового насоса при строительстве зданий на участках с заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород».

В целом, содержание научной статьи раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан научным языком.

Библиография статьи очень мала, включает в себя 7 литературных источников. Это не соответствует требованиям журнала (не менее 15 источников). Следовательно, автору рекомендуется в этом аспекте доработать статью. В тексте нет ссылок на иностранных авторов.

Выводы в статье достаточной степени аргументированы и обоснованы.

Автор приходит к выводу, что решением проблемы является закладывание в проект методов активной термостабилизации грунтов. Для участков высоких насыпей

охлаждающий контур позволяет создать буферную зону циклично промерзающих и оттаивающих грунтов, которая полностью исключает тепловой поток от здания к заглубленной кровле многолетнемерзлых пород. Для участков с мерзлотой сливающегося типа тепловые насосы могут рассматриваться как резервирующее устройство – в случае, если заложенные в проекте климатические параметры выйдут за допустимые пределы, включение заложенной на этапе проекта охлаждающей установки исключит оттаивание основания.

Реценziруемая работа имеет важную практическую значимость. Экономическая целесообразность предложенного автором решения обуславливается снижением эксплуатационных затрат и практически полным исключением проблем, связанных с оттаиванием мерзлого основания. Это очень важно с точки зрения практического применения результатов исследований.

Реценziруемая статья несомненно будет интересна и полезна грунтоведам-практикам, студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Данная статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, детальное исследование эффективности использования теплового насоса при строительстве зданий на участках с заглубленной кровлей льдистых многолетнемерзлых пород в северо-западной части Западно-Сибирской низменности, которая представляет собой сравнительно высоко приподнятую над уровнем моря равнину Обско-Полуйского водораздела.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании результатов математического моделирования и расчета температурного поля при расположении охлаждающего контура. Автором также использовался метод литературного анализа, сравнительных характеристик объектов и процессов алгоритмического и экономического моделирования.

Актуальность затронутой темы связано с тем, что исследование распространенного способа возведения зданий на многолетнемерзлых грунтах, использование проветриваемого подполья под сооружением. Сейчас широко используются методы термостабилизации с использованием сезонно-охлаждающих установок – они могут быть размещены как под зданиями, так и по контуру сооружения. При строительстве тяжелых зданий, предложенная технология не позволит обеспечить достаточную несущую способность грунтов основания. Решением этой проблемы является масштабирование – необходимо разместить охлаждающий контур достаточно глубоко в грунтовом массиве. Автор восполнил этот пробел.

Научная новизна заключается в том, что автор статьи на основе проведенных исследований того или иного технического решения на этапе проработки проекта предлагает основываться на технико-экономическом сравнении вариантов, однако зависимость от климата стандартных проектных решений создает некоторую неопределенность в оценке надежности сооружений на всем сроке их эксплуатации. Решением этой проблемы является закладывание в проект методов активной термостабилизации грунтов. Для участков высоких насыпей охлаждающий контур позволяет создать буферную зону циклично промерзающих и оттаивающих грунтов,

которая полностью исключает тепловой поток от здания к заглубленной кровле многолетнемерзлых пород. Для участков с мерзлотой сливающегося типа тепловые насосы могут рассматриваться как резервирующее устройство.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, рисунки, таблицы и схемы иллюстративны уместны.

Однако есть авторские неточности, так например «Территория, на которой расположены окрестности г. Салехарда и прилежащих населённых пунктов, относится к субэкваториальному климатическому поясу. Средняя температура воздуха в течение года в Салехарде равна $-6,2^{\circ}\text{C}$.». Ясно, что речь идет об субарктическом поясе. Следует также обратить внимание на опечатки «Расчеты выполнены с учетом глобального изменения климатаиз температурных наблюдений».

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.