

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 504.05: 581.192

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.118.1.003

НОВЫЙ СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВАНИЙ ОДНОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Алина Александровна Горбунова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Москва, Россия

GorbunovaAA@my.msu.ru

Аннотация. В статье рассматривается новая конструкция фундамента (поверхностный фундамент со встроенными контурами теплового насоса) для строительства одноэтажных зданий на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах и его тепловой, гидравлический и механический расчет на примере здания лабораторного корпуса компрессорной станции КС - 6 «Сковородинская».

Ключевые слова: поверхностный фундамент, многолетнемерзлый грунт, искусственное охлаждение основания, обогрев здания, тепловой насос, климатические условия, предварительная подготовка грунтов основания, капитальные затраты, экономический эффект, преимущества.

Цитирование: Горбунова А.А. Новый способ использования высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований одноэтажных зданий в условиях глобального потепления климата // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (118). № 1. С. 38–54. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.118.1.003

Original article

A NEW WAY OF USING HIGH-TEMPERATURE PERMAFROST SOILS AS THE FOUNDATIONS OF SINGLE-STOREY BUILDINGS IN THE CONDITIONS OF GLOBAL CLIMATE WARMING

Alina A. Gorbunova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

GorbunovaAA@my.msu.ru

Abstract. The report discusses a new foundation design (surface foundation with integrated heat pump circuits) for the construction of single-storey buildings on high-temperature permafrost soils and its thermal, hydraulic and mechanical calculation on the example of the building of the laboratory building of the compressor station KS - 6 "Skovorodinskaya".

Keywords: surface foundation, permafrost, artificial cooling of the foundation, heating of the building, heat pump, climatic conditions, preliminary preparation of the foundation soils, capital costs, economic effect, advantages.

Citation: A.A. Gorbunova. A new way of using high-temperature permafrost soils as the foundations of single-storey buildings in the conditions of global climate warming // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (118). №1. P. 38–54. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.118.1.003

Введение

Повышение температуры воздуха влечет за собой и повышение температуры грунта, которое приводит к уменьшению прочностных и увеличению деформационных характеристик многолетнемерзлых грунтов. Это, в свою очередь, может привести к деформациям и нарушению устойчивости зданий и сооружений в криолитозоне. Поэтому в настоящее время одним из основных приоритетов в строительной отрасли, является поиск новых эффективных способов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований в условиях глобального потепления климата. Одним из таких новых способов строительства одноэтажных зданий на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах является применение поверхностного фундамента со встроенными контурами теплового насоса [1].

Описание конструкции

Фундамент представляет собой железобетонную плиту, состоящую из двух частей. В верхней части находится змеевик греющего контура, в нижней – охлаждающего контура. Между контурами имеется теплоизолятор из пеноплекса. Контуровы заполнены жидкостью, верхний – водой, которая обеспечивает обогрев пола первого этажа здания; нижний – антифризом, обеспечивающим искусственное охлаждение основания. Фундамент состоит из отдельных блоков, которые на стройплощадке стыкуются между собой и подсоединяются к тепловому насосу (ТН). Фундаментные модули, в совокупности образующие поверхностный фундамент, подсоединяются параллельно к теплоизолированному коллектору охлаждающего контура и теплоизолированному коллектору греющего контура теплового насоса [1].

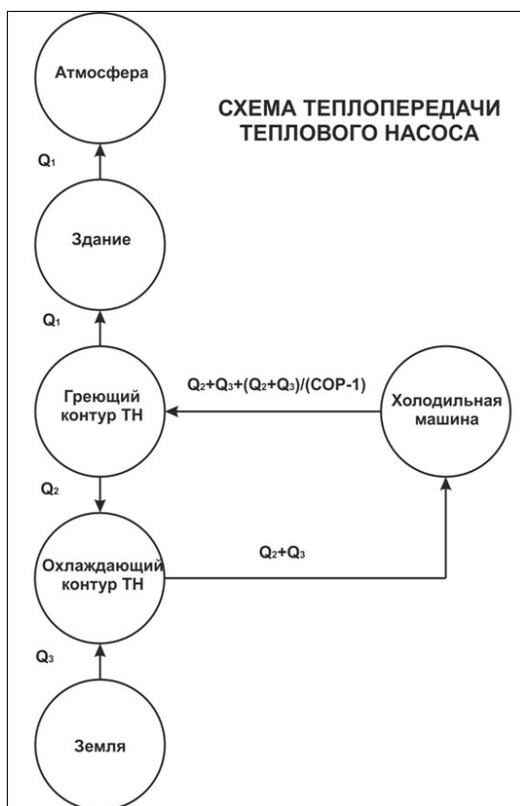


Рис. 1. Схема теплопередачи теплового насоса, совмещенного с поверхностным фундаментом. Условные обозначения: Q_1 – интенсивность теплового потока от греющего контура к зданию и от здания в атмосферу, Вт; Q_2 – то же от греющего контура к охлаждающему; Q_3 – то же от многолетнемерзлого грунта к охлаждающему контуру; COP – коэффициент преобразования [2]

Тепло для отопления здания забирается из грунта Q_3 охлаждающим контуром ТН, одновременно с ним к охлаждающему контуру поступает тепло от греющего контура ТН - Q_2 . Эти потоки подаются в холодильную машину ТН, где низкопотенциальное тепло преобразуется в высокопотенциальное и при этом к нему добавляются потери энергии компрессором холодильной машины, равные $(Q_2+Q_3)/(COP-1)$. Далее эти потоки тепла поступают к греющему контуру ТН, от которого часть из них направляется к зданию Q_1 и идет на обогрев пола, а часть Q_2 возвращается в охлаждающий контур. Далее цикл повторяется. Управление тепловыми потоками осуществляется следующими параметрами: температурой воды и антифриза и термическим сопротивлением между контурами R_b [2]. При этом указанные параметры должны быть подобраны таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$Q_1 = 50 \text{ Вт/м}^2 \leq Q_1^* \quad (1)$$

$$Q_1^* = Q_3 + \frac{(Q_2 + Q_3)}{COP-1}, \quad (2)$$

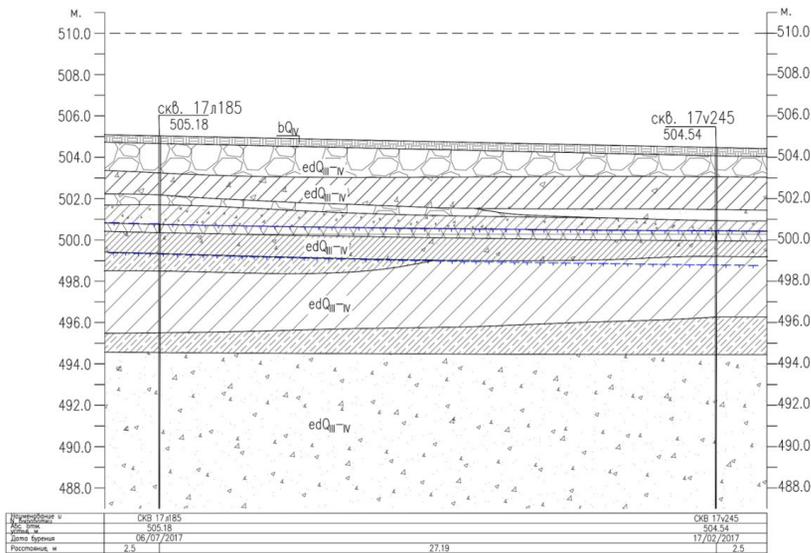
Применение поверхностного фундамента со встроенными контурами теплового насоса и его расчет рассмотрим на примере одноэтажного здания лабораторного корпуса компрессорной станции КС - 6,0 «Сковородинская».

Краткое описание района строительства

Район исследований находится на территории Сковородинского района, Амурской области. Климат района резко континентальный с муссонными чертами. Среднегодовая температура воздуха составляет $-4,2^\circ\text{C}$. В геологическом строении района исследований принимают участие голоценовые биогенные (bQ_{IV}) и техногенные отложения (tQ_{IV}), верхнеплейстоцен–голоценовые нерасчлененные элювиально–делювиальные (edQ_{III-IV}), аллювиальные (aQ_{III-IV}) отложения, залегающие на коренных породах нижней юры (J_1) (рис. 2).

Площадка строительства здания лабораторного корпуса характеризуется многолетнемерзлыми породами несливающегося типа мощностью от 50 до 150 м. Среднегодовая температура пород составляет $-0,3^\circ\text{C}$. Глубина сезонного оттаивания изменяется от 1,0 до 3,0 м, сезонного промерзания от 2,0 до 5,0 м.

Геологический разрез под зданием лабораторного корпуса по скважинам 17л185–17в245



Состав пород

- Растительный слой: суглинок и торф с корнями растений
- Глубокие отложения, массивная криотекстура $W_{\text{от}}=0.146$, $W_i=0.275$, $W_p=0.176$, $I_p=0.099$, $I_t=-0.3$, $\rho=2.70$, $\rho_f=2.25$, $\rho_d=1.96$, $e_p=0.37$, $e_k<1.0$, $T_{\text{от}}=-0.2$, $\lambda_{\text{от}}=1.74$, $\lambda_i=1.97$, $C_{\text{от}}=2.87$, $C_f=2.27$.
- Суглинок слабообводненный, криотекстура массивная, с включенными щебня от 15 до 25% $W_{\text{от}}=0.165$, $W_i=0.273$, $W_p=0.170$, $I_p=0.103$, $\rho=2.71$, $\rho_f=2.06$, $\rho_d=1.74$, $e_p=0.645$, $i=0.151$, $W_{\text{от}}=0.205$, $S=0.52$, $I_{\text{от}}=0.27$, $\lambda_{\text{от}}=1.48$, $\lambda_i=1.66$, $C_{\text{от}}=2.68$, $C_f=2.26$, $T_{\text{от}}=-0.18$, $e_k=6.6$.
- Суглинок незводненный, щебнистый от 25 до 50 % $W_{\text{от}}=0.177$, $W_i=0.177$, $\rho=2.07$, $\rho_f=2.70$, $\rho_d=1.76$, $e_p=0.54$, $S=1.00$, $W_i=0.279$, $W_p=0.174$, $I_p=0.105$, $D_{\text{от}}=0.028$, $e_k=8.7$, $\lambda_{\text{от}}=1.08$, $\lambda_i=1.19$, $C_{\text{от}}=2.67$, $C_f=2.08$, $T_{\text{от}}=-0.19$, $m_p=0.098$, $E=8.44$, $C_{\text{от}}=0.101$.
- Суглинок тугопластичный, щебнистый $W_{\text{от}}=0.220$, $\rho=2.69$, $\rho_f=1.69$, $e=0.59$, $S=1.00$, $W_i=0.272$, $W_p=0.193$, $I_p=0.079$, $D_{\text{от}}=0.028$, по СП 25.13330.2020 : $\lambda_{\text{от}}=1.45$, $\lambda_i=1.71$, по СНиП 2.02.04–88: $C_{\text{от}}=2.74$, $C_f=2.28$.
- Суглинок незводненный, криотекстура массивная, незаоленный, $W_{\text{от}}=0.184$, $W_i=0.184$, $\rho=2.01$, $\rho_f=2.70$, $\rho_d=1.70$, $e_p=0.59$, $S=1.00$, $W_i=0.290$, $W_p=0.181$, $I_p=0.109$, $i=0.00$, $D_{\text{от}}=0.019$, $\lambda_{\text{от}}=1.20$, $\lambda_i=1.64$, $C_{\text{от}}=2.85$, $C_f=2.09$, $T_{\text{от}}=-0.2$, $m_p=0.07$, $E=11.1$, $A_{\text{от}}=0.025$, $m=0.06$, $C_{\text{от}}=0.117$.
- Супесь щебнистая (валунчатая) слабообводненная, криотекстура массивная $W_{\text{от}}=0.189$, $W_i=0.202$, $W_p=0.143$, $I_p=0.059$, $i=0.79$, $\rho=2.68$, $\rho_f=2.07$, $\rho_d=1.74$, $e_p=0.54$, $i=0.03$, $W_{\text{от}}=0.173$, $S=1.00$, $\lambda_{\text{от}}=0.25$, $\lambda_i=1.82$, $C_{\text{от}}=2.764$, $C_f=2.23$, $e_k=4.0$, $A_{\text{от}}=0.06$, $m=0.08$, $C_{\text{от}}=0.016$.
- Дробные форозидные отложения $W_{\text{от}}=0.245$, $W_i=0.266$, $W_p=0.170$, $I_p=0.096$, $I_t=0.780$, $\rho=2.70$, $\rho_f=1.95$, $\rho_d=1.57$, $e=0.719$, $S=0.92$, по СП 25.13330.2020: $\lambda_{\text{от}}=2.15$, $\lambda_i=2.50$, по СНиП 2.02.04–88: $C_{\text{от}}=3.15$, $C_f=2.35$.
- Щебнистые отложения слабообводненные, $W_{\text{от}}=0.161$, $W_i=0.238$, $W_p=0.158$, $I_p=0.08$, $I_t=0.04$, $\rho=2.70$, $\rho_f=2.05$, $\rho_d=1.77$, $e_p=0.53$, $i=0.092$, $W_{\text{от}}=0.161$, $S=0.90$, $I_{\text{от}}=0.32$, $\lambda_{\text{от}}=1.97$, $\lambda_i=2.2$, $C_{\text{от}}=3.02$, $C_f=2.07$, $A_{\text{от}}=0.04$; $m=0.040$, $e_k=0.7$.

Стратиграфические подразделения и генетические типы

Система	Генезис	Обозначения	Состав отложений	Мощность
Четвертичная	Биогенные	bQ _{IV}	Грунт растительного слоя, предстает увеличители и торфом с корнями растений	до 0.5 м.

Структура скважины

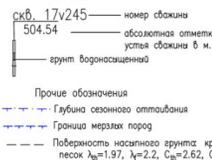


Рис. 2. Геологический разрез под зданием лабораторного корпуса по данным инженерных изысканий, 2019 г.

Расчет поверхностного фундамента под одноэтажное здание

Исходные данные

Одноэтажное каркасное здание лабораторного корпуса на многолетнемерзлых грунтах с охлаждающей системой и обогревающими полами с помощью теплового насоса (ТН). Размер здания в плане 15,0x36,0 м, площадь $S = 540 \text{ м}^2$. Фундамент состоит из 20 самостоятельных блоков, соединяемых на сварке и подключаемых параллельно к одному теплому насосу. Размер блока 7,8 x 3,66 м. Температура в здании — $t_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$.

Продолжительность отопительного периода $\tau_{от} = 8$ мес. = 5760 ч. Температура подстилающих многолетнемерзлых грунтов – $t_0 = -0,3^\circ\text{C}$. 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. В плане фундаментные модули расположены в два ряда и параллельно подключены к ТН с помощью двух коллекторов. Греющий контур использует воду, охлаждающий – антифриз. Температура жидкости в контурах определяется расчётом.

Фундаментные модули присоединяются к ТН с помощью коллекторов, греющего и охлаждающего контуров. Длина каждого коллектора 102 м, включая 4 поворота на 90° . Наружный диаметр коллектора $d_{out}^k = 0,0885$ м, внутренний $d_{in}^k = 0,0805$ м.

Поскольку ММП в районе исследований несливающегося типа, во избежание пучения талый слой грунта, расположенный над многолетнемерзлым, должен быть заморожен еще до устройства фундамента здания. Расчетами определено, что для замораживания грунтов на площади 19×40 м за 6 месяцев (октябрь-март) потребуется 153 термосифона марки ТК 32/7,0.М-03, которые располагаются по 9 рядам с шагом 2.1 м. Также проектом предусматривается планировочная насыпь на всей территории КС высотой 5 м. Если планировку территории лабораторного корпуса выполнить из грунтов, не подверженных пучению при промерзании, то замораживание насыпи можно осуществить во время эксплуатации здания за счет работы ТН фундамента.

Тепловой расчет поверхностного фундамента

Расчет осуществляется методом математического моделирования теплового взаимодействия фундамента со зданием и подстилающим грунтом. В ходе ряда итераций в программном комплексе «QFrost» [3] были подобраны температуры греющего $t_1 = 35^\circ\text{C}$ и охлаждающего контуров $t_2 = -20^\circ\text{C}$ таким образом, чтобы выполнялось условие (1). Между контурами расположен теплоизолятор с термическим сопротивлением $R_b = 0.7 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$. Результаты расчёта тепловых потоков представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета тепловых потоков

$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$R_b, \text{ м}^2\text{°C/Вт}$	$Q_1, \text{ Вт/м}^2$	$Q_2, \text{ Вт/м}^2$	$Q_3, \text{ Вт/м}^2$	$Q_1^*, \text{ Вт/м}^2$
35	-20	0,7	57,19	70,71	9,46	57,47
Номинальная тепловая мощность ТН равна: $N_T = (Q_2 + Q_3 + (Q_2 + Q_3)/(COP-1)) \cdot S = (70,71+9,46+(70,71+9,46)/(2,55 - 1)) \cdot 540 = 69,2 \text{ кВт}$.						
Потребляемая электрическая мощность составит: $N_э = ((Q_2 + Q_3)/(COP-1)) \cdot S = ((70,71+9,46) / (2,55 - 1)) \cdot 540 = 27,1 \text{ кВт}$.						

Гидравлический расчет поверхностного фундамента

Целью расчета является определение расхода воды W_1 и антифриза W_2 в контурах и потери давления. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета греющего и охлаждающего контура

Наименование	Формула	Значение для греющего контура	Значение для охлаждающего контура	Ед. изм.
Потребный расход воды в греющем контуре одного фундаментного блока	$W = \frac{N_T^M}{C \cdot \Delta t}$	0,593	0,673	м ³ /ч
Скорость воды в трубах змеевика	$V = \frac{4 \cdot W}{3600 \cdot \pi \cdot d_{in}^2}$	0,072	0,082	м/с
Местные потери напора	$h_\xi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 \cdot n) \frac{V^2}{2g}$	0,014	0,017	м.в.ст.
Потери напора по длине	$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d_{in}} \cdot \frac{V^2}{2g}$	0,028	0,062	м.в.ст.
Суммарные потери напора	$h_\Sigma = h_L + h_\xi$	0,042	0,079	м.в.ст.

Общие потери напора коллектора греющего контура $h_\Sigma = 0,44$ м.в.ст.

Общие потери напора коллектора охлаждающего контура $h_\Sigma = 0,23$ м.в.ст.

На основе проведенного расчета подбираем тепловой насос по следующим параметрам:

- номинальная тепловая мощность: 69206 Вт,
- потребляемая электрическая мощность: 27100 Вт,
- расход воды в греющем контуре: 11,86 м³/ч,
- потеря давления в греющем контуре: 0,27 м. водяного столба,
- расход антифриза в охлаждающем контуре: 13,46 м³/ч,
- потеря давления в охлаждающем контуре: 0,52 м. водяного столба.

Такой номинальной тепловой мощности соответствует тепловой насос марки CR 185-3 [4]. Стоимость насоса 1 991 800 руб.

Механический расчет поверхностного фундамента

Фундамент опирается на насыпь из талого крупнозернистого песка, которая в отопительные периоды эксплуатации здания замораживается ТН. Однако летом, когда ТН не работает, под действием тепла от здания происходит небольшое оттаивание с поверхности замороженной насыпи, которое достигает 1,2 м каждый сезон. Оттаявший слой зимой вновь промерзает. Таким образом, часть года фундамент опирается на талый грунт. Этот грунт (крупнозернистый песок) по определению не подвержен деформациям при оттаивании и замерзании. Поэтому механический расчет фундамента сводится лишь к проверке первого предельного условия – расчету по несущей способности.

Вес здания, с учетом нагрузок и коэффициента запаса, составляет 2000 т, при площади фундаментной плиты 540 м² давление на грунт составит 0,37 кг/см². Известно, что крупнозернистые пески в составе подсыпки под поверхностные фундаменты в талом состоянии выдерживают давление равное 2,0 кг/см² [5]. Это во много раз больше, чем указанное давление нашего фундамента на грунт.

Фундамент до тех пор, пока он прочно скреплен с грунтом, будет разбит трещиной, если его прочность окажется меньше силы криогенного растрескивания. Противостоять растрескиванию может только железобетон с подобранной арматурной сеткой согласно рекомендациям [6]. В качестве арматуры примем арматурную сетку с размером ячейки 24x24 мм и диаметром прутка 18 мм [7].

Математическое моделирование формирования температурного поля в основании здания лабораторного корпуса

Целью моделирования являлось получение температурного поля основания здания лабораторного корпуса на весь срок эксплуатации (50 лет) для доказательства надежности предлагаемого нового способа обеспечения устойчивости здания в условиях глобального потепления климата. В рамках данной работы расчёты выполнены в программном комплексе «Frost 3D universal». Им предшествовали работы по калибровке модели.

Результаты математического моделирования

Полученный в результате расчетов температурный режим грунтов основания здания лабораторного корпуса показан на рисунках 3–6. Начало расчета – 01.10.2022, окончание – 15.10.2072.

Температура воздуха задавалась с учетом глобального потепления климата. Тренд потепления определен из метеорологических данных метеостанции Сковородино по методике авторетроспективного анализа, разработанной на кафедре геокриологии МГУ в 2000 г [8]. Величина тренда для данного района составляет 0,0345°С [9].

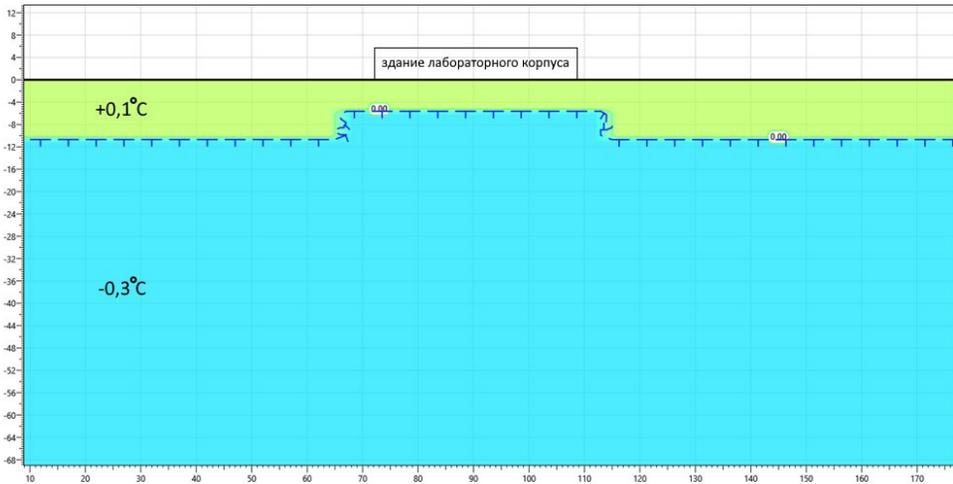


Рис. 3. Фрагмент температурного поля под центром здания на 01.10.2022 (по оси абсцисс – расстояние в метрах в масштабе 1:1, по оси ординат – высота в метрах в масштабе 1:1 за 0,0 м принята отметка 510,0 м)

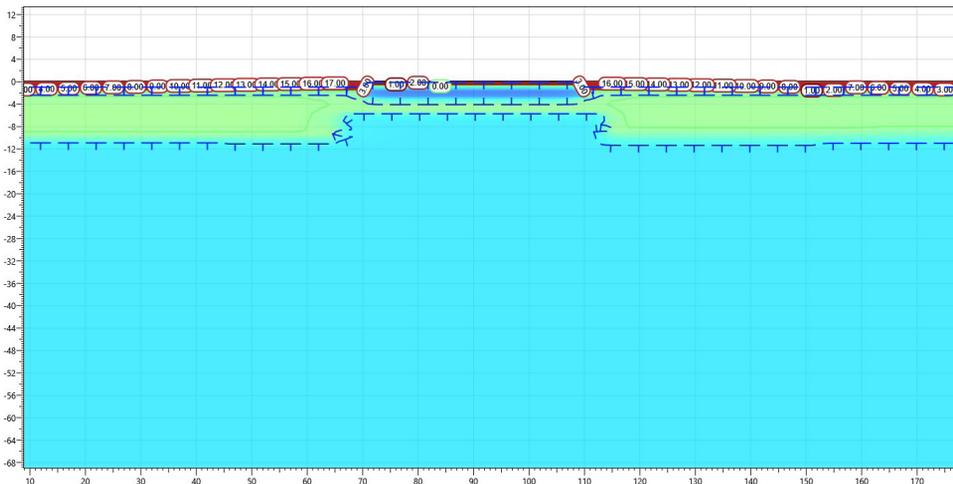


Рис. 4. Фрагмент температурного поля под центром здания на 15.06.2023

Расчеты, выполненные с учетом солнечной радиации и глобального потепления, показали, что кровля многолетнемерзлых грунтов за пределами контура здания за 50 лет опустилась на 9,5 м с глубины 10,5 до 20 м. При этом поверхностный фундамент здания, совмещенный с тепловым насосом, обеспечивает мерзлое состояние грунтов основания.

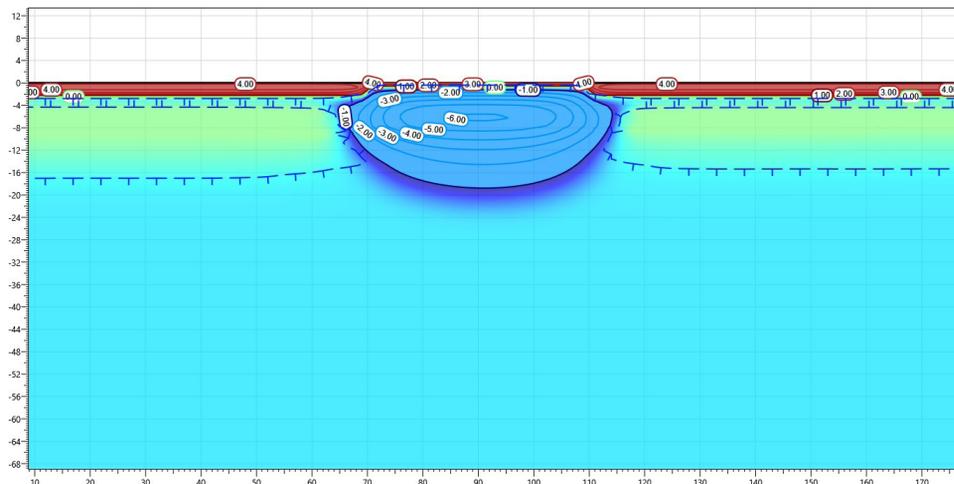


Рис. 5. Фрагмент температурного поля под центром здания на 15.10.2052

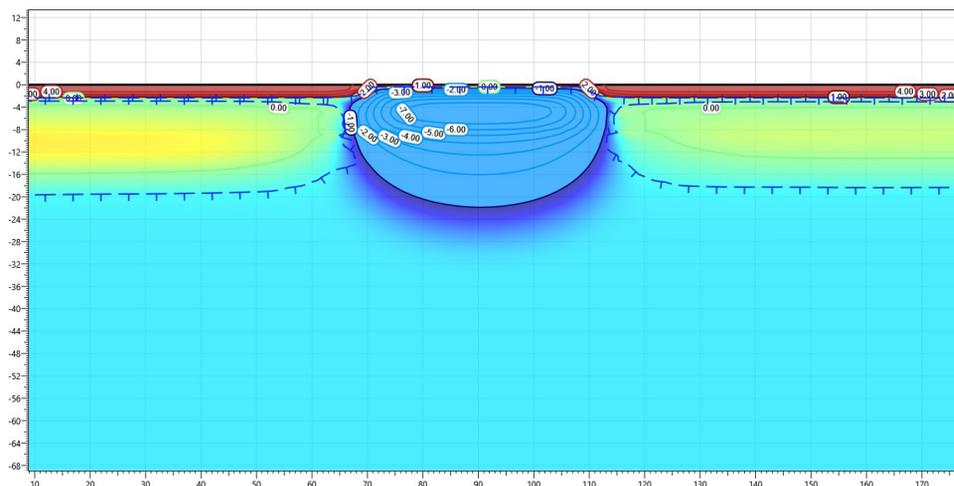


Рис. 6. Фрагмент температурного поля под центром здания на 15.10.2072

Таким образом, все рекомендуемые мероприятия по сохранению основания в мёрзлом состоянии, а именно предварительное промораживание грунтов термосифонами и использование фундамента со встроенными контурами теплового насоса приведут к понижению температурного режима грунтов, несмотря на наличие тренда повышения среднегодовой температуры воздуха.

Преимущества предлагаемой конструкции

Для выявления экономического эффекта от применения ТН сравнивалось два варианта строительства здания лабораторного корпуса: вариант 1 с ТН и вариант 2 (проектное решение) с воздушной охлаждающей системой в виде вентилируемого подполья и термосифонами (рис. 7).

Вариант 1 включает в себя поверхностный фундамент в виде железобетонной плиты со встроенными греющими и охлаждающими контурами теплового насоса марки CR 185-3. Фундамент опирается на насыпь из талого крупнозернистого песка, которая в отопительные периоды эксплуатации здания замораживается тепловым насосом. Поскольку район исследований характеризуется наличием мерзлоты неслюющего типа, талый слой грунта предварительно, до устройства планировочной насыпи, промораживается 153 термосифонами марки ТК 32/7,0.М-03.

Вариант 2 – здание выполнено с устройством проветриваемого подполья высотой от 1,5 до 2,1 м. В качестве фундаментов приняты сваи из металлических труб. Сваи погружаются буроопускным способом. Пазухи и внутренняя полость заполняются цементно-песчаным раствором М150. Сваи диаметром 159, 219 и 325 мм и длиной от 10 до 15 м. Для обеспечения сохранения твердомерзлого состояния грунтов основания в подполье здания размещены термосифоны (ГСС-17са-и, ГСС-15са2-и).

Расчет стоимости капитальных вложений по двум вариантам представлен в табл. 3 – 4.

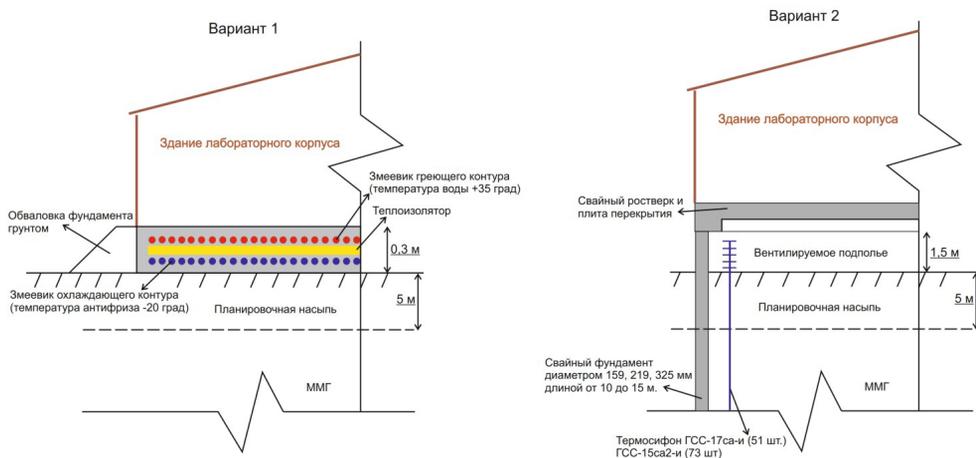


Рис. 7. Варианты фундаментирования здания лабораторного корпуса.

Слева – здание на поверхностном фундаменте (вариант 1); справа – здание на свайном фундаменте (вариант 2)

Таблица 3. Расчет стоимости капитальных вложений при строительстве здания на свайном фундаменте с термосифонами [10]

Наименование работ	Ед. изм	Кол-во	Сметная стоимость	
			на ед. измер.	общая
Свайное основание				
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в сезонно-талых грунтах (с применением обсадных труб) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 159 мм в грунтах 2 группы	п.м сваи	28	3500	98000
Сухой непучинистый грунт	м ³	1,42	1801	2557
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	0,45	7685	3458
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в сезонно-талых грунтах (с применением обсадных труб) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 219 мм в грунтах 2 группы	п.м сваи	224	4200	940800
Сухой непучинистый грунт	м ³	9,46	1801	17038
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	7,25	7685	55713
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в сезонно-талых грунтах (с применением обсадных труб) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 325 мм в грунтах 2 группы	п.м сваи	210	5200	1092000
Сухой непучинистый грунт	м ³	12,36	1801	22261
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	15,74	7685	120955
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в многолетнемерзлых грунтах (без применения обсадной трубы) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 159 мм в грунтах 4 группы	п.м сваи	22	2900	63800
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	1,43	7685	10989
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в многолетнемерзлых грунтах (без применения обсадной трубы) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 219 мм в грунтах 4 группы	п.м сваи	450	3900	1755000
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	33,5	3500	117250
Устройство буроопускных свай методом шнекового бурения в многолетнемерзлых грунтах (без применения обсадной трубы) для объектов Якутского центра газодобычи, диаметром 325 мм в грунтах 4 группы	п.м сваи	470	5500	2585000
Цементно-песчаный раствор М150 Пк4 по ГОСТ 28013-98	м ³	82,83	7685	636514

Продолжение таблицы 3

Наименование работ	Ед. изм	Кол-во	Сметная стоимость	
			на ед. измер.	общая
Бурение скважин глубиной до 10 м вращательным способом (с продувкой сжатым воздухом) диаметром 300 мм (300 мм) в грунтах 7 группы (долотами типа 311,1 Т)	м	16,8	15345	257796
Бурение скважин глубиной до 10 м вращательным способом (с продувкой сжатым воздухом) диаметром 300 мм (319 мм) в грунтах 7 группы, (долотами типа 311,1 Т)	м	134,4	15345	2062368
Бурение скважин глубиной до 10 м вращательным способом (с продувкой сжатым воздухом) диаметром 450 мм (425 мм) в грунтах 7 группы (долотами типа 444,5 Т)	м	126	23265	2931390
Установка в готовые скважины стальных свай объемом до 0,2 м ³	м ³	15,84	1250	19792
Свая из стальной трубы 219х8,0-С255-ТУ 1380-123-05757848-214 длина до 11 м с наконечником	т	54,2	28345	1536299
Свая из стальной трубы диаметр 325х8,0-С255-ТУ 1380-123-05757848-2014 длина до 11 м с наконечником	т	29,6	55342	1638123
Свая из стальной трубы 219х8,0-С255-ТУ 1380-123-05757848-2014 длина более 11 м с наконечником	т	41,69	40590	1692197
Свая из стальной трубы диаметр 325х8,0-С255-ТУ 1380-123-05757848-2014 длина более 11 м с наконечником	т	17,05	63679	1085727
Свая из стальной трубы 159х8,0-С255-ТУ 1380-123-05757848-2014 с открытым концом (с анкерными элементами)	т	2,41	23960	57744
Монтаж оголовков свай из тл/л стали	т	3,11	20183	62769
Стоимость м/к из стали С245 ГОСТ 27772-2015 [11]	т	7,86	60317	474092
Крепеж (болты)	т	0,68	58540	39807
Монтаж фундаментных балок	т	4,43	8915	39493
Обезжиривание поверхности стальных свай	м ²	592,5	2,34	1386
Обеспыливание поверхности стальных свай	м ²	592,5	1,12	664
Устройство антикоррозионного покрытия	м ²	592,5	14,66	8686
Термостабилизаторы				
Термостабилизатор ГСС-17са-и [12]	шт	51	18000	918000
Шнековое бурение скважин в грунтах группы 4 (диаметр скважины 114 мм)	м	841,5	600	504900
Заполнение скважин песчано-глинистым раствором состава 1:1 влажностью 50%	м ³	6,987	176	1230
Термостабилизатор ГСС-15са2-и [12]	шт	73	21000	1533000

Продолжение таблицы 3

Наименование работ	Ед. изм	Кол-во	Сметная стоимость	
			на ед. измер.	общая
Шнековое бурение скважин в грунтах группы 4 (диаметр скважины 114 мм)	м	1058,5	600	635100
Заполнение скважин песчано-глинистым раствором состава 1:1 влажностью 50%	м ³	9,855	176	1734
Планировочная насыпь				
Планировочная насыпь из местного песка	м ³	2700	593,20	1601640
		Сумма	24 625 273 руб.	

Таблица 4. Расчет стоимости капитальных вложений при использовании поверхностного фундамента со встроенными контурами теплового насоса [10]

Наименование работ	Ед. изм	Кол-во	Сметная стоимость	
			на ед. измер.	общая
Фундамент				
Бетон	м ³	129,6	13037	1689595
Устройство железобетонных фундаментов общего назначения объемом: до 25 м ³	1 м ³ бетона в деле	129,6	79,71	10330
Арматурная сетка и её монтаж [6]	м ²	570,96	200	114192
Тепловой насос	шт.	1	1991800	1991800
Трубы системы охлаждения и отопления и их установка	м	6160	194	1195040
Изоляция	м ³	32,4	1134	36742
Термостабилизаторы				
Термостабилизатор ТК 32/7,0.М-03 [12]	шт.	153	9356,22	1431502
Шнековое бурение скважин в грунтах группы 4 (диаметр скважины 44 мм)	м	1001	250	250250
Заполнение скважин песчано-глинистым раствором состава 1:1 влажностью 50%	м ³	1,54	176	271
Планировочная насыпь и обваловка				
Планировочная насыпь из привозного крупнозернистого песка	м ³	2700	1009	2724300
Обваловка поверхностного фундамента местным грунтом [2]	м ³	201*1	550	110550
		Сумма	9 554 572 руб.	
*1 Объем подсыпки для обваловки поверхностного фундамента определяется по формуле:				
$V_{\text{под}} = (B_{\text{зд}} + 2) \cdot (L_{\text{зд}} + 2) \cdot h_{\text{под}} + 1,5 \cdot h_{\text{под}}^2 \cdot (B_{\text{зд}} + L_{\text{зд}} + 4),$				
где $B_{\text{зд}}$ – ширина здания, 15 м; $L_{\text{зд}}$ – длина здания, 36 м; $h_{\text{под}}$ – высота поверхностного фундамента, 0.3 м.				

Экономический эффект определяется по формуле [2]:

$$\Delta = Z_2 - Z_1, \text{ или} \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{от}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где Z_1, Z_2 – текущие затраты по вариантам 1 и 2, руб./год или %.
Текущие затраты по вариантам [2].

$$\text{Вариант 1: } Z_1 = p \cdot K_1 + C_{\Delta} \cdot Q_1, \quad (5)$$

$$\text{Вариант 2: } Z_2 = p \cdot K_2 + \frac{C_{\Delta}}{m} Q_2, \quad (6)$$

где p – ставка погашения банковского кредита, 0,12 1/год; K_1, K_2 – сумма капитальных вложений по вариантам 1 и 2 в руб., по данным таблиц 3 – 4; C_{Δ} – тариф на электроэнергию, 3,2 руб./кВт·ч; m – отношение тарифа на электрическую энергию к тарифу на тепловую, 3,24; Q_1, Q_2 – затраты тепла на обогрев помещения по вариантам 1 и 2, кВт·ч.

$$Q_1 = (q_2 + q_3) \cdot S \cdot t_{\text{он}} / (COP - 1), \quad (7)$$

$$Q_2 = (q_3 + (q_2 + q_3) / (COP - 1)) \cdot S \cdot t_{\text{он}}, \quad (8)$$

$t_{\text{он}}$ – продолжительность отопительного сезона.

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчета экономического эффекта от применения поверхностного фундамента со встроенным контуром ТН по сравнению со свайным фундаментом с термосифонами

	Сумма капитальных вложений, руб	Затраты тепла на обогрев помещения, кВт·ч	Текущие затраты в одном году, руб.	Экономический эффект, 1/год	Экономический эффект, %
Вариант 1 (ТН)	9 554 572	160 877	1 661 355	1 341 841	55,3
Вариант 2 (свайный фундамент)	24 625 273	190 302	3 003 196		

Из таблиц 3 – 5 следует, что поверхностный фундамент, совмещенный с тепловым насосом, дает большую экономию капитальных вложений (61,2%) и текущих затрат (55,3%) по сравнению со свайным, за счет расположения фундамента на дневной поверхности без его заглубления в грунт и выполнением фундаментом одновременно трех функций: передачи нагрузки от здания на основание, охлаждения основания и обогрева помещения. Также данный тип фундамента возможно

многоразово использовать и изготавливать на строительной площадке. Основное преимущество поверхностного фундамента со встроенными контурами теплового насоса, по сравнению со свайным фундаментом с термосифонами – в независимости охлаждения грунтов основания от климатических изменений.

Заключение

Подводя итог проделанной работе, можно отметить, что выбранная новая конструкция фундамента позволяет надежно купировать негативные последствия глобального потепления климата в районах распространения высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов, и по сравнению с широко применяемыми в настоящее время в указанных районах свайными фундаментами и термосифонами имеет следующие преимущества:

- гарантированно обеспечивает мерзлое состояние грунтов основания независимо от климата;

- осуществляет обогрев помещений первого этажа здания;

- уменьшает расход электрической энергии на обогрев помещений по сравнению с расходом энергии в электрических котлах;

- снижает сумму капитальных затрат на строительство за счет расположения фундамента на дневной поверхности без его заглубления в грунт и выполнением фундаментом одновременно трех функций: а) передачи нагрузки от здания на основание, б) охлаждения основания, в) обогрева помещения.

Освещенный в работе новый способ сохранения мерзлого состояния грунтов в основании здания, по нашему мнению, будучи использован на практике, станет хорошим ответом на новый природный вызов – глобальное потепление климата.

Список источников

1. Хрусталева 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.
2. Хрусталева Л. Н., Хилимонюк В. З. Новый фундамент для зданий в Арктике // Криосфера Земли.– 2018. – Т. 22, № 4. – С. 25–30.
3. Песоцкий Д.Г. Программа расчета теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами QFrost. Свидетельство № 2016614404. Государственный реестр программ для ЭВМ, 22.04.16.

4. Каталог GRUNDFOS. Вертикальные многоступенчатые центробежные насосы. [Электронный источник] – <http://mnk-rus.com/d/databooklet-cr-91830035-0616.pdf>. Дата обращения – 26.01.2022.
5. Рекомендации по проектированию и устройству зданий на подсыпках в районах распространения вечномёрзлых грунтов / НИИОСП, М., 1977. 39 с.
6. Попов Н.Н., Забегаев А.В. Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций. Учебник. Высшая школа, М., 1989
7. Сортамент арматурных сеток [Электронный источник] <https://mbaza24.ru/katalog-prokata/svarnaya-setka>. Дата обращения 05.09.2022.
8. Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. – Москва, Университетская книга, 2011, 260 с.
9. Горбунова А. А. Прогноз температуры воздуха для целей геотехники // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России. Мониторинг в криолитозоне с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. / Под ред. Р. Г. Мотенко. – КДУ, Добросвет Москва, 2022. – С. 582–589.
10. ГЭСН-2022. Государственные элементные сметные нормы на строительные работы и специальные строительные работы.
11. Стоимость м/к из стали С245 ГОСТ 27772-2015. [Электронный источник] - <https://www.metalloprokat.ru/list/listi/s245/> Дата обращения 10.12.2022.
12. Стоимость термостабилизаторов. [Электронный источник] – <https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/kcfinder/files/Price-list%20termostabilizatorov%20%20%202015.pdf> Дата обращения 10.12.2022.

Сведения об авторе

Горбунова Алина Александровна, 2000 г. р. Студент 2-го курса магистратуры геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра геокриологии. Сфера научных интересов: геотехника в криолитозоне.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023 г., принята к публикации 31.03.2023 г.

The article was submitted on February 20, 2023, accepted for publication on March 31, 2023.