

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.340: 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(25-30)

НОВЫЙ ФУНДАМЕНТ ДЛЯ ЗДАНИЙ В АРКТИКЕ

Л.Н. Хрусталева, В.З. Хилимонюк

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; vanda@geol.msu.ru*

Рассмотрен новый поверхностный фундамент, который одновременно выполняет три функции: передает нагрузку от здания на основание; искусственно понижает температуру многолетнемерзлого грунта в основании здания и тем самым увеличивает надежность основания; поддерживает необходимую положительную температуру воздуха в помещениях первого этажа здания. Это достигается путем совмещения конструкции фундамента с тепловым насосом. Такой фундамент имеет существенные преимущества по сравнению с применяемым в Арктике свайным фундаментом: независимость охлаждения основания от климатических условий, малые капитальные затраты, многоразовое использование.

Поверхностный фундамент, многолетнемерзлый грунт, искусственное охлаждение основания, обогрев здания, тепловой насос, капитальные затраты, климатические условия

NEW FOUNDATION FOR STRUCTURES IN THE ARCTIC

L.N. Khrustaleva, V.Z. Khilimonjuk

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; vanda@geol.msu.ru*

The paper describes a novel upperbound foundation which simultaneously performs three functions: transferring load from the structure to the its base; deliberately decreasing the temperature of permafrost in the soil base of structure, increasing thereby the bearing capacity of the basements and maintaining the required positive air temperature in the ground floor of the structure. These are achieved by introducing a heat pump into the foundation design. The considered foundation has significant advantages over the pile foundations widely applicable in the Arctic and provide for: independence of basement's cooling from climatic conditions; low capital expenditures; multiple use.

Upperbound foundation, permafrost, artificial cooling of the structure base, structure heating, heat pump, capital expenditures, climatic conditions

ВВЕДЕНИЕ

Предстоящее широкое освоение Арктики потребует новых строительных технологий, которые будут отличаться от известных новыми материалами, высокой сборностью конструкций, меньшим весом, энергосберегающими технологиями и экологической безопасностью. Особенно остро стоит вопрос в фундаментостроении. Это обусловлено тем, что в осваиваемых районах мало крупносkeletalных грунтов, позволяющих создавать подсыпки для поверхностных фундаментов. В итоге большинство зданий возводится на свайных фундаментах, что значительно увеличивает сроки строительства и затраты. Во избежание оттаивания многолетнемерзлых грунтов и разрушения зданий под ними устраиваются вентилируемые подполья, что исключает передачу больших нагрузок на пол здания, увеличивает материалоемкость конструкции и затраты на обогрев помещений.

В качестве материала свай и элементов перекрытия подполья используется металл, который, как правило, доставляется по воздуху и является дефицитным товаром. Кроме того, установка свай занимает много времени и связана с экологическими нарушениями природных условий.

Усилия авторов были направлены на то, чтобы устранить указанные недостатки в фундаментостроении. В результате в 2015 г. были разработаны конструкция и метод расчета поверхностного фундамента, не требующего подсыпок из крупносkeletalного грунта, надежно обеспечивающего мерзлое состояние грунтов основания и обогрев здания с малыми энергетическими затратами в течение всего периода его эксплуатации [Патент..., 2016]. Эти свойства конструкции фундамента были достигнуты путем его совмещения с тепловым насосом (ТН).

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Фундамент представляет собой железобетонную плиту, состоящую из двух частей. В верхней части находится змеевик греющего контура ТН, в нижней – охлаждающего контура. Между контурами имеется теплоизолятор из пеноплекса с термическим сопротивлением R_b . Контур заполнен жидкостью: верхний – водой с температурой t_1 , нижний – антифризом с температурой t_2 . Верхний змеевик обеспечивает обогрев пола первого этажа здания, нижний – искусственное охлаждение основания. При этом змеевик охлаждающего контура заходит за наружную стену здания на два витка. Этим исключается оттаивание грунта основания под краем здания в летнее время. Такой фундамент одновременно выполняет три функции: 1) передает нагрузку от здания на основание; 2) понижает температуру многолетнемерзлого грунта в основании здания и тем самым увеличивает надежность основания; 3) поддерживает необходимую положительную температуру воздуха в помещениях первого этажа здания.

Фундамент состоит из отдельных блоков, которые на стройплощадке стыкуются между собой

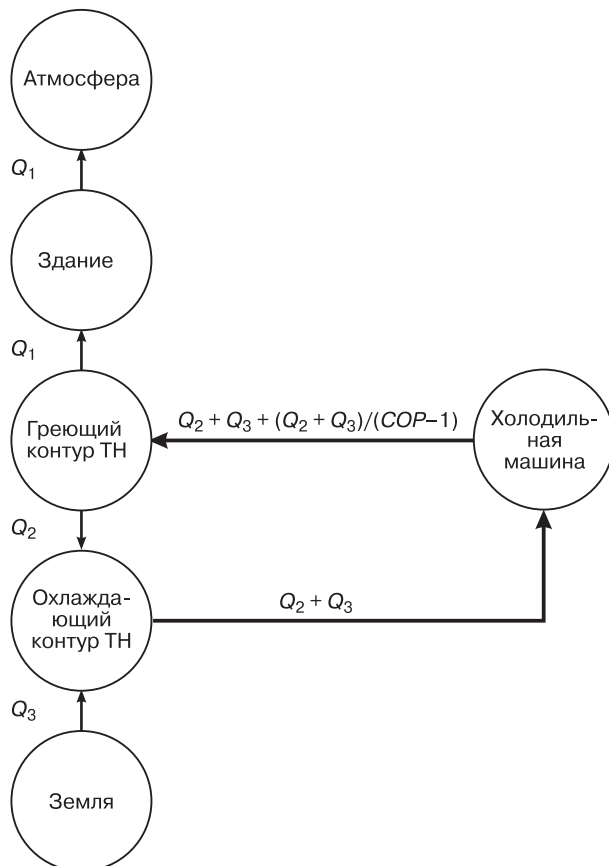


Рис. 1. Схема теплопередачи теплового насоса, совмещенного с поверхностным фундаментом.

Обозначения см. в тексте.

с помощью закладных деталей на сварке и подсоединяются к ТН параллельно. При параллельном подсоединении блоков гидравлические потери в контурах минимальны.

Фундамент устанавливается на многолетнемерзлый грунт во второй половине зимы после промерзания слоя сезонного оттаивания. Торцевые стороны фундамента обваловываются местным грунтом. Блоки фундамента рекомендуется изготавливать на месте в летнее время и зимой на санях перемещать к месту установки.

Подсоединенный к фундаменту ТН работает непрерывно, поскольку отопительный сезон в Арктике длится круглый год, и обеспечивает постоянное отопление здания и искусственное охлаждение его основания. Схема работы теплового насоса показана на рис. 1.

Как следует из схемы, тепло для отопления здания Q_3 забирается из грунта охлаждающим контуром ТН, одновременно с ним к охлаждающему контуру поступает тепло Q_2 от греющего контура ТН. Эти потоки подаются в холодильную машину ТН, где тепловая энергия от низкопотенциального источника (низкопотенциальное тепло) преобразуется в высокопотенциальную тепловую энергию [Освоение..., 2012], при этом к ней добавляются потери энергии компрессором холодильной машины:

$$(Q_2 + Q_3)/(COP - 1).$$

Коэффициент преобразования COP вычисляется по формуле [Новиков, 1984]

$$COP = 0.5 \frac{t_1 + 273 + 3}{t_1 + 3 - (t_2 - 3)}, \quad (1)$$

где t_1, t_2 – температура в греющем и охлаждающем контурах ТН, °С. Далее эти потоки тепла поступают к греющему контуру ТН, от которого часть Q_1 направляется к зданию и идет на обогрев пола, а часть Q_2 возвращается в охлаждающий контур. Этот цикл повторяется в дальнейшем.

Управление тепловыми потоками осуществляется следующими параметрами: температурой воды t_1 в греющем и антифриза t_2 в охлаждающем контурах ТН и термическим сопротивлением между контурами R_b . Указанные параметры должны быть подобраны таким образом, чтобы Q_1 была не больше $Q_3 + (Q_2 + Q_3)/COP$ и не меньше 50 Вт на 1 м^2 пола здания в наиболее холодную пятидневку. Поясним сказанное примером расчета.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные. Одноэтажное каркасное общественное здание на многолетнемерзлых грунтах с охлаждающей системой и обогреваемыми полами с помощью теплового насоса. Срок эксплуатации здания 25 лет. Размер здания в плане $25 \times 40 \text{ м}$, площадь $S = 1000 \text{ м}^2$. Фундамент для

такого здания будет состоять из 26 фундаментных модулей размером в плане 3.1×12.5 м, площадь модуля $S_m = 38.75$ м². Температура в здании $t_{in} = 20$ °С. Интенсивность максимальных теплопотерь здания в отопительный период $Q_b = 50$ кВт. Продолжительность отопительного периода $\tau_w = 12$ мес = 8760 ч. Температура подстилающих многолетнемерзлых грунтов $t_0 = -5.5$ °С. Фундаментный модуль представляет собой железобетонную плиту (рис. 2) со встроенными греющими и охлаждающими контурами ТН в виде системы змеевиков из полиэтиленовых труб, расположенных с шагом $s = 0.15$ м. Наружный диаметр труб $d_{out} = 0.06$ м, внутренний $d_{in} = 0.054$ м. Длина труб греющего или охлаждающего контура одного фундаментного модуля 251 м, включая 38 поворотов на 90°. Между контурами расположен теплоизолятор с термическим сопротивлением $R_b = 0.278$ м²·°С/Вт.

В плане фундаментные модули расположены в два ряда и параллельно подключены к ТН с помощью двух коллекторов (рис. 3). Длина каждого коллектора 220 м, включая 4 поворота на 90°. Наружный диаметр коллектора $d_{out}^k = 0.0885$ м, внутренний $d_{in}^k = 0.0805$ м. Греющий контур использует воду, охлаждающий – антифриз (20%-й водный раствор этиленгликоля, который замерзает при температуре ниже температуры его охлаждения в испарителе термосифона). Температура жидкости в контурах принята $t_1 = +40$ °С, $t_2 = -10$ °С. Климатические и грунтовые условия соответствуют району пос. Сабетта на полуострове Ямал.

Тепловой расчет поверхностного фундамента.

Расчет осуществляется методом математического моделирования теплового взаимодействия фундамента со зданием и подстилающим многолетнемерзлым грунтом. Результаты расчета по программе QFrost [Программа..., 2016] приведены ниже:

время работы ТН 25 лет; температура воды в греющем контуре $t_1 = 40$ °С; температура антифриза в охлаждающем контуре $t_2 = -10$ °С; терми-

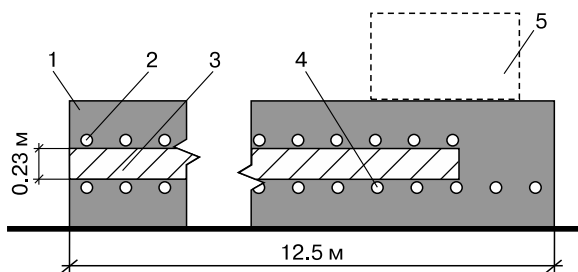


Рис. 2. Продольный разрез фундаментного модуля.

1 – железобетонный корпус фундамента; 2 – змеевик греющего контура ТН; 3 – теплоизолятор (пеноплекс); 4 – змеевик охлаждающего контура ТН; 5 – место расположения наружной стены здания.

ческое сопротивление между контурами $R_b = 0.278$ м²·°С/Вт; интенсивность теплового потока: $Q_1 = 67.94$ кВт (от греющего контура к зданию и от здания в атмосферу), $Q_2 = 128.57$ кВт (от греющего контура к охлаждающему), $Q_3 = 2.58$ кВт (от многолетнемерзлого грунта к охлаждающему контуру); $Q_3 + (Q_2 + Q_3)/(COP - 1) = 74.64$ кВт (где COP – коэффициент преобразования, см. формулу (1)).

Из приведенных данных следует, что подача тепла ТН незначительно превышает необходимый для данного здания минимум 50 кВт, что свидетельствует о правильности подобранных управляющих параметров t_1 , t_2 и R_b .

Номинальная тепловая мощность ТН будет равна $N_T = Q_2 + Q_3 + (Q_2 + Q_3)/(COP - 1) = 128.57 + 2.58 + (128.57 + 2.58)/(2.82 - 1) \approx 203.2$ кВт. Коэффициент преобразования вычисляется по формуле (1):

$$COP = 0.5 \frac{t_1 + 273 + 3}{t_1 + 3 - (t_2 - 3)} = 2.82.$$

Требуемая электрическая мощность составляет $N_E = (Q_2 + Q_3)/(COP - 1) = (128.57 + 2.58)/(2.82 - 1) \approx 72.1$ кВт.

Кроме того, результаты моделирования свидетельствуют, что за время эксплуатации поверхностного фундамента сезонное оттаивание не распространится под подошву фундамента, и фундамент постоянно будет опираться на твердомерзлый грунт, практически не подверженный сжимаемости (рис. 4).

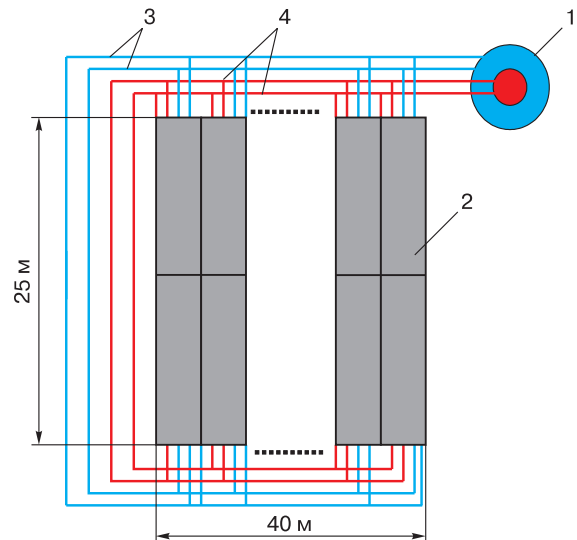


Рис. 3. Схема подключения фундаментных модулей к тепловому насосу.

1 – тепловой насос; 2 – фундаментный модуль; 3 – коллектор греющего контура ТН; 4 – коллектор охлаждающего контура ТН.

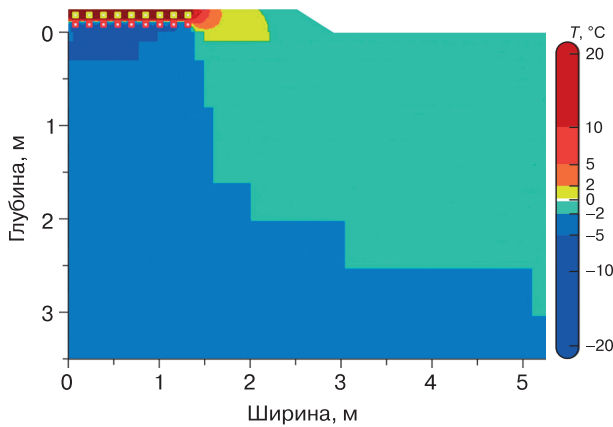


Рис. 4. Температурное поле в основании здания спустя 25 лет эксплуатации (результаты математического моделирования).

Гидравлический расчет греющего и охлаждающего контуров. В расчете определяли расход воды W_1 и антифриза W_2 в контурах и потери давления воды h_1 и антифриза h_2 . Расход жидкости (вода, антифриз) в контурах находится по формуле

$$W_{1,2} = \frac{N_T}{C_{1,2}\Delta t},$$

где $W_{1,2}$ – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; N_T – номинальная тепловая мощность ТН, Вт; $C_{1,2}$ – теплоемкость жидкости, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C})$; Δt – разность температуры жидкости на входе и выходе из контура, равная 5°C .

Зная расход жидкости, определяем скорость ее движения на каждом участке контура и по ней потерю давления. Расчет осуществляли по общеизвестным формулам (см., например, [Справочник..., 1972]). Опуская их, приведем окончательные результаты расчетов (табл. 1).

На основе проведенного теплового и гидравлического расчета подбираем тепловой насос по следующим параметрам: номинальная тепловая мощность 203.2 кВт; потребляемая электрическая мощность 72.1 кВт; расход воды в греющем контуре 40.64 $\text{м}^3/\text{ч}$; потеря давления в греющем контуре 3.05 м водного столба; расход антифриза в охлаждающем контуре 36.58 $\text{м}^3/\text{ч}$; потеря давления в охлаждающем контуре 3.91 м водного столба.

Такой номинальной тепловой мощности соответствует тепловой насос марки CR-230xB. Стоимость насоса 1 604 460 руб.

Механическое взаимодействие поверхностного фундамента с многолетнемерзлыми грунтами основания. Фундамент под одноэтажное общественное каркасное здание испытывает небольшие нагрузки от веса здания, оборудования и людей. При этом фундаментная плита расположена на практически несжимаемом основании. В силу этого ар-

Таблица 1. Результаты гидравлических расчетов

Параметр	Греющий контур	Охлаждающий контур
Суммарный расход жидкости в контуре, $\text{м}^3/\text{ч}$	40.64	36.58
Расход жидкости в змеевике фундаментного блока, $\text{м}^3/\text{ч}$	1.56	1.41
Скорость движения жидкости в змеевике, м/с	0.19	0.17
Потеря давления в змеевике, м	0.33	0.31
Потеря давления в коллекторе, м	3.05	3.91
Суммарные потери давления в контуре, м	3.05	3.91

мирование фундамента может быть минимальным и определяться только из условий его монтажа и возможных перемещений.

РАСЧЕТ ЭКОНОМИИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ФУНДАМЕНТА

Для выявления экономического эффекта сравнивалось два варианта строительства описанного выше здания (пос. Сабетга, п-ов Ямал): вариант 1 – с тепловым насосом и вариант 2 – с воздушной охлаждающей системой в виде вентилируемого подполья (рис. 5).

Здание по варианту 1 возводится непосредственно на поверхности мерзлого грунта и стороны поверхностного фундамента обваловываются местным грунтом. Здание по варианту 2 возводится на свайном фундаменте из металлических свай диаметром 219×8 мм и общей длиной 1944 м и диаметром 159×8 мм и общей длиной 2093 м. По головам свай устроен железобетонный ростверк, на который уложено железобетонное перекрытие подполья. Объем железобетона в ростверке и перекрытии составляет 100 м^3 . Стоимостные расчеты производились в соответствии с СБЦП 81-2001-03 [2010].

Экономический эффект определяется по формуле

$$E = D_2 - D_1, \quad (2)$$

или

$$E_w = \frac{D_2 - D_1}{D_2} \cdot 100\%,$$

где D_1, D_2 – текущие затраты по вариантам 1 и 2, руб./год (или %).

Текущие затраты по вариантам 1 и 2:

$$D_1 = pK_1 + P_E Q_1,$$

$$D_2 = pK_2 + \frac{P_E}{m} Q_2, \quad (3)$$

где p – ставка погашения банковского кредита, 0.12 год^{-1} ; K_1, K_2 – сумма капитальных вложений

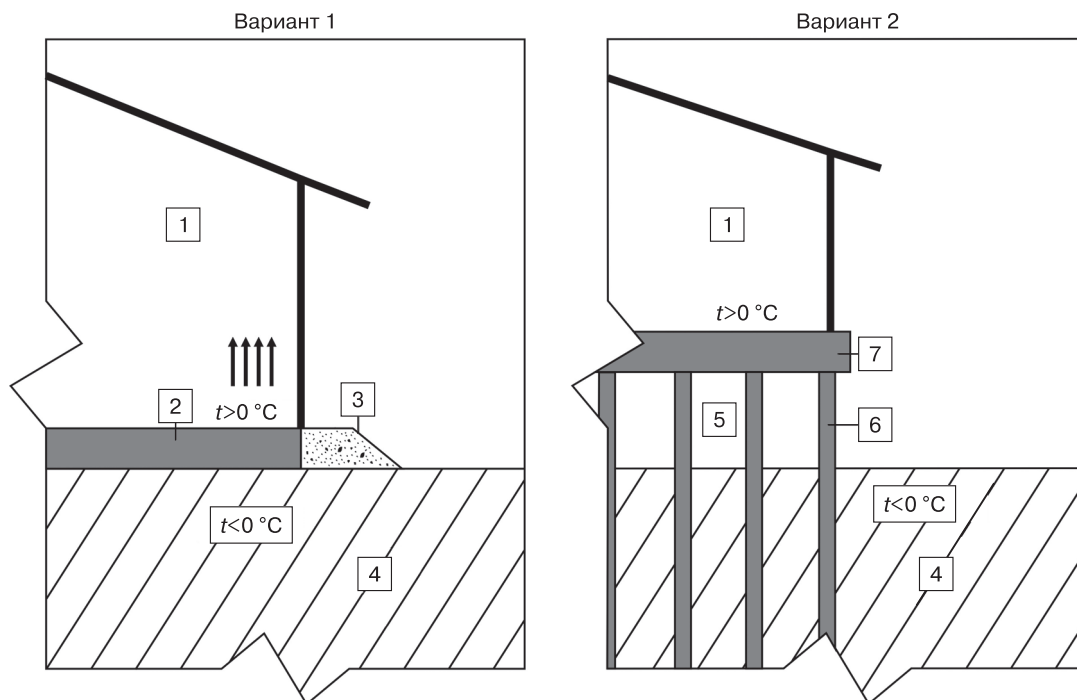


Рис. 5. Варианты строительства здания.

1 – здание; 2 – поверхностный фундамент; 3 – грунтовая обваловка; 4 – мерзлое основание; 5 – вентилируемое подполье; 6 – свайный фундамент; 7 – ростверк и теплоизоляция.

по вариантам 1 и 2, руб.; P_E – тариф на электроэнергию, 0.82 руб./кВт·ч; m – отношение тарифа на электрическую энергию к тарифу на тепловую; Q_1 , Q_2 – затраты тепла на обогрев помещения по вариантам 1 и 2, кВт·ч;

$$Q_1 = (Q_2 + Q_3)t_y / (COP - 1), \quad (4)$$

$$Q_2 = (Q_3 + (Q_2 + Q_3) / (COP - 1))t_y$$

(t_y – продолжительность года, ч). Капитальные вложения по вариантам 1 и 2:

$$K_1 = D_1^f + D_1^w + D_1^c + D_{HP}, \quad (5)$$

$$K_2 = D_2^f + D_2^w + D_2^c,$$

где $D_{1,2}^f$, $D_{1,2}^w$, $D_{1,2}^c$ – затраты на строительство фундаментов, системы отопления, системы охлаж-

Таблица 2. Расчет экономии от применения поверхностного фундамента

Наименование затрат	Вариант 1			Вариант 2		
	Цена, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.	Цена, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
Фундамент						
железобетон	6723 (за 1 м ³)	193.1 м ³	1 298 211	6723 (за 1 м ³)	100 м ³	672 300
грунтовая обваловка	550 (за 1 м ³)	23.81 м ³	13 093	–	–	–
сваи Ф219x8 мм	–	–	–	45 595 (за 1 т)	80.93 т	3 690 000
сваи Ф159x8 мм	–	–	–	36 400 (за 1 т)	62.36 т	2 270 000
погружение с испытанием	–	–	–	17 441.9	344	6 000 000
Система отопления						
трубы	180 (за 1 м)	381 м	68 580	3000 (за 1 м ²)	1000 м ²	3 000 000
изоляция	4861 (за 1 м ³)	9.73 м ³	47 297	4861 (за 1 м ³)	87.5 м ³	425 338
Система охлаждения						
трубы	180 (за 1 м)	381 м	68 580	–	–	–
Тепловой насос	1 604 460	1 шт.	1 604 460	–	–	–
Сумма капвложений			3 100 221			16 057 638
Текущие затраты в одном году			889 651			2 092 397

дения по вариантам 1 и 2, руб.; D_{HP} – стоимость теплового насоса, руб.

$$D_1^f = c_{fc} V_{fc1} + c_{gr} V_{gr1}, \quad (6)$$

$$D_2^f = c_{fc} V_{fc2} + c_p G_p + c_{pp} n_p + C_v$$

где c_{fc} – стоимость железобетона в деле, 6723 руб./м³; c_{gr} – стоимость местного грунта в деле, 550 руб./м³; V_{fc1} , V_{gr1} – объем фундамента и подсыпки, м³; V_{fc2} – объем железобетонного свайного ростверка и плиты перекрытия, м³; c_p – стоимость 1 т свай, руб./т; c_{pp} – стоимость погружения свай, руб./шт.; C_v – стоимость испытания свай на площадке, руб.; G_p – общая масса погруженных на площадке свай, т; n_p – количество погруженных свай, шт.

$$D_1^w = c_{pt} L + c_{is} V_{is1}, \quad (7)$$

$$D_2^w = c_w S + c_{is} V_{is2},$$

где c_{pt} – стоимость полимерной трубы в деле, 180 руб./м; c_{is} – стоимость изоляции в деле, 4861 руб./м³; c_w – стоимость отопительной системы в расчете на 1 м² пола, руб./м²; L – длина труб греющего контура ТН, м; V_{is} – объем теплоизоляции, м³; S – площадь пола здания, м².

$$D_1^c = c_{pt} L, \quad (8)$$

где L – длина труб охлаждающего контура, м.

Объем подсыпки для обваловки поверхностного фундамента определяется по формуле

$$V_{pf} = h_{pf}(2 + 1.5h_{pf})(B_{bl} + L_{bl} + 2 + 1.5h_{pf}), \quad (9)$$

где B_{bl} – ширина здания, 25 м; L_{bl} – длина здания, 40 м; h_{pf} – высота поверхностного фундамента, 0.23 м.

Результаты расчета по формулам (3)–(9) приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что поверхностный фундамент, совмещенный с тепловым насосом, дает большую экономию капитальных вложений (80.7 %) и текущих затрат (57.5 %). Кроме того, этот фундамент по сравнению со свайным значительно сокращает сроки строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поверхностный фундамент, совмещенный с тепловым насосом, имеет ряд существенных пре-

имуществ по сравнению с широко применяемым в Арктике свайным фундаментом:

- одновременно выполняет три функции: передает нагрузку от здания на основание, понижает температуру многолетнемерзлого грунта в основании, поддерживает необходимую положительную температуру воздуха в помещениях первого этажа;
- его надежность не зависит от климатических условий;
- имеет высокую сборность;
- сокращает сроки строительства.

Широкое внедрение предлагаемого способа строительства в практику станет важным шагом технического прогресса в Арктике.

Литература

- Новиков И.И.** Термодинамика: учеб. пособие. М., Машиностроение, 1984, с. 563–568.
Novikov, I.I., 1984. Thermodynamics: Textbook. Mashinostroyeniye, pp. 563–568. (in Russian)
- Освоение** низкопотенциального геотермального тепла / Под ред. В.Е. Фортова. М., Физматлит, 2012, с. 31–35.
Fortov, V.E. (Ed.), 2012. Utilization of Low-potential Geothermal Energy. Fizmatlit, Moscow, pp. 31–35. (in Russian)
- Патент** № 2583025. Поверхностный фундамент сооружения, обеспечивающий сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии с одновременным обогревом сооружения / Хрусталева Л.Н., Хилимониюк В.З., Перлштейн Г.З., Каманин Д.В. Опубл. 2016. Бюл. № 12.
Khrustalev, L.N., Khilimonyuk, V.Z., Perlshtein, G.Z., Kamantin, D.V., 2016. Upperbound foundation of structure ensuring preservation of base soils in the permafrost state, with simultaneous heating of structures. Patent No. 2583025. Bulletin No. 12.
- Программа** расчета теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами QFrost / Песоцкий Д.Г. Свидетельство № 2016614404. Гос. реестр программ для ЭВМ; 22.04.2016.
Pesotskii, D.G., 2016. QFrost program for calculation of thermal interaction between structures and permafrost. Certificate No. 2016614404 of State Registration of Programs for ECM; 22.04.2016.
- СБЦП 81-2001-03.** Объекты жилищно-гражданского строительства. Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве. М., Минрегион, 2010, 41 с.
BPRGD (SBtsP) 81-2001-03. Buildings and Civil Housing Objects. Benchmark Price Reference Guide for Design Works, 2010. Minregion, Moscow, 41 pp. (in Russian)
- Справочник** по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. Киев, Вища шк., 1972, 279 с.
Bolshakov, V.A. (Ed.), 1972. Hydraulics: Reference Book. Vysshaya Shkola, Kiev, 279 pp.

Поступила в редакцию
12 апреля 2017 г.