

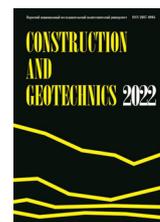


**пермский  
политех**

**CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS**

**Т. 14, № 4, 2023**

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.01

УДК 624.139

## **РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМОГО ОСНОВАНИЯ С ОДИНОЧНОЙ СВАЕЙ**

**Е.А. Жайсамбаев, Т.В. Мальцева, А.Н. Краев**

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 05 Мая 2023  
Одобрена: 02 Августа 2023  
Принята к публикации:  
10 ноября 2023

#### Ключевые слова:

термостабилизация основания, многолетнемерзлый грунт, оттаявший многолетнемерзлый грунт, одиночная железобетонная свая, несущая способность, геометрические параметры, грунтовый массив, одиночный вертикальный парожидкостный термостабилизатор, мерзлое ядро.

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается одна из основных проблем строительства на территории распространения многолетнемерзлых грунтов – наличие площадок, представленных оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, образованными вследствие природных условий (обводненности участка, особенностей рельефа участка, заболоченности и т.д.) и техногенных воздействий (отепляющего воздействия зданий и сооружений, систематических сбросов и утечек из инженерных сетей, стока и застоя поверхностных дождевых вод и т.д.). Для обеспечения несущей способности одиночной сваи и заданного температурного режима грунтов основания в данных инженерно-геокриологических условиях возможно применение охлаждающих устройств сезонного действия. Основным вопросом при их использовании является определение основных параметров, влияющих на несущую способность одиночной сваи и деформативность основания.

Для определения параметров, влияющих на несущую способность одиночной сваи и деформативность основания был выполнен комплекс численных температурных расчетов термостабилизированного грунтового массива, представленного оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, с одиночной сваей при разных начальных граничных условиях в сертифицированном программном комплексе Frost 3D. Температурные расчеты выполняли для массива талого грунта, в который погружена одиночная железобетонная свая с конструкцией одиночного вертикального парожидкостного термостабилизатора. Геометрические размеры расчетной области равны 30 × 30 × 30 м.

По результатам численных экспериментов определены основные физические, теплофизические и геометрические параметры формируемого мерзлого ядра, которые будут заложены в методику прогноза несущей способности одиночной сваи в термостабилизированном вязкоупругом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами. На основе выполненных расчетов была построена расчетная схема одиночной сваи в термостабилизированном основании и были построены графические зависимости изменения диаметра, высоты и геометрического положения мерзлого ядра в зависимости от начальных граничных условий.

© **Жайсамбаев Ерн Аскерович** – аспирант, ассистент, e-mail: zhaysambaeverkn@mail.ru.

**Мальцева Татьяна Владимировна** – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.

**Краев Алексей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: kraev\_aln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2316-246X.

**Erkn A. Zhaysambaev** – Postgraduate Student, Assistant, e-mail: zhaysambaeverkn@mail.ru.

**Tatyana V. Maltseva** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.

**Aleksey N. Kraev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: kraev\_aln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2316-246X.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## **CALCULATION OF THE TEMPERATURE CONDITION OF A THERMOSTABILIZABLE BASE WITH A SINGLE PILE**

**E.A. Zhaysambaev, T.V. Maltseva, A.N. Kraev**

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 05 May 2023  
Approved: 02 August 2023  
Accepted for publication:  
10 November 2023

#### *Keywords:*

Thermal stabilization of foundation, permafrost soil, thawed permafrost soil, single reinforced concrete pile, bearing capacity, geometric parameters, soil mass, single vertical vapor-liquid thermal stabilizer, frozen core.

### ABSTRACT

The article deals with one of the main problems of construction in the area of permafrost soils – the presence of sites represented by thawed permafrost soils [1-3], formed due to natural conditions (waterlogged site, site relief features, swamping, etc.) and man-made impacts (warming effect of buildings and structures, systematic discharges and leaks from engineering networks, runoff and stagnation of surface rainwater, etc.). To ensure the bearing capacity of a single pile and the specified temperature regime of the foundation soils in the given engineering-geocryological conditions, it is possible to use the cooling devices of seasonal action.

The main issue when using the cooling devices of seasonal action is to determine the main parameters affecting the bearing capacity of a single pile and the deformability of the foundation.

To determine the parameters affecting the bearing capacity of a single pile and the deformability of the foundation, a set of numerical temperature calculations of thermostabilized soil mass represented by thawed permafrost soils with a single pile under different initial boundary conditions was performed in the certified Frost 3D software package. Temperature calculations were performed for the thawed soil mass, in which a single reinforced concrete pile with a single vertical vapor-liquid thermal stabilizer structure is submerged. The geometrical dimensions of the calculated area are  $30 \times 30 \times 30$  m.

Based on the results of numerical experiments, the main physical, thermal and geometric parameters of the formed frozen core have been determined, which will be incorporated into the methodology for predicting the bearing capacity of a single pile in a thermally stabilized viscoelastic foundation represented by thawed permafrost soils. On the basis of the calculations performed, a design diagram of a single pile in a thermostabilized foundation was built and graphical dependences of changes in the diameter, height and geometric position of the frozen core depending on the initial boundary conditions were plotted.

---

## **Введение**

На более чем 63 % территории Российской Федерации существуют многолетнемерзлые грунты сплошного распространения, преимущественно сплошного распространения, прерывистого распространения, массивно-островного распространения, островного и редкоостровного распространения [1–3]. Этот факт существенно усложняет возведение промышленных и гражданских объектов в данных инженерно-геокриологических условиях.

Возведение объектов промышленного и гражданского назначения на территориях распространения вечномерзлых грунтов возможно согласно СП 25.13330.2020 по следующим принципам проектирования [4]: принцип I – грунтовое основание сохраняют в мерзлом состоянии в период возведения и на весь срок эксплуатации объекта; принцип II – грунтовое основание используют в оттаянном или оттаивающем состоянии.

Принцип проектирования оснований сооружений, методы и средства обеспечения температурного режима назначают исходя из экономической целесообразности проектных решений. В большинстве случаев основание проектируют по I принципу, так как мерзлый грунт обладает значительной несущей способностью.

В настоящее время строительство по I принципу возможно путем использования следующих основных способов сохранения мерзлого состояния грунтов основания:

1. Охлаждающая подсыпка по поверхности грунта.
2. Вентилируемое подполье.
3. Монтаж охлаждающих труб и каналов.
4. Монтаж сезонно-действующих охлаждающих устройств.

Изучению и анализу работы охлаждающих устройств сезонного действия (СОУ) посвящены труды [5–19]. Работы [20, 21] посвящены расчету деформированного состояния мерзлого и талого вязкоупругого основания. Изучению вопросов теплового взаимодействия промышленных и гражданских объектов с вечномерзлыми грунтами посвящены работы Я.Б. Горелика, Г.М. Долгих, Э.Д. Ершова, Я.А. Кроника, С.А. Кудрявцева, В.П. Мельникова, С.Н. Окунева, В.Г. Порхаева, И.И. Сахарова, Л.Н. Хрусталева и других авторов [22–27].

Проведенный анализ научной и нормативной документации показал, что классические технические решения, такие как устройство вентилируемых подполий, охлаждающих подсыпок по поверхности грунта, охлаждающих труб и каналов, нерентабельны, а зачастую существенно повышают стоимость строительства. В настоящее время строительство по I принципу на территориях распространения площадок, представленных оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, образованными вследствие природных условий (обводненности участка, особенностей рельефа участка, заболоченности и т.д.) и техногенных воздействий (отепляющего воздействия зданий и сооружений, систематических сбросов и утечке из инженерных сетей, стока и застоя поверхностных дождевых вод и т.д.), осуществляют в основном путем термостабилизации основания с помощью сезонно действующих охлаждающих устройств, которая способствует сохранению и повышению несущей способности одиночной сваи. Согласно исследованиям [28] к 2050 г. произойдет значительное снижение несущей способности основания вследствие глобального потепления, т.е. продолжается повышение средней температуры на планете. Так, за последние 50 лет в Ямало-Ненецком автономном округе среднегодовая температура выросла на 3,5 °С. В среднем каждые десять лет – на 0,7 °С. Наиболее интенсивные изменения климата происходят с 2010 г., установили в Научном центре изучения Арктики.

## Методика и постановка задачи

Для определения основных геометрических параметров формируемого мерзлого ядра, которые будут заложены в методику определения несущей способности одиночной сваи в термостабилизированном вязкоупругом основании, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, был выполнен комплекс численных экспериментов по расчету температурного режима грунтов при разных начальных граничных условиях в сертифицированном программном комплексе Frost 3D. Расчеты проводились в 3D постановке при разных начальных граничных условиях:

1. При разной начальной температуре грунтов основания. Для расчетов использовали начальную температуру грунтов основания:  $T_{нач} = -0,1; -0,15; -0,2; 0; 1; 2$  °С.

2. При разных типах грунтов. В расчетах использовали четыре типа грунтов: пески, супеси, суглинки и глины.

3. При разной влажности и плотности грунтов основания. В расчетах использовали плотность грунтов основания 1400 и 1600 кг/м<sup>3</sup> с влажностями –20, 25 и 30 %.

Температурный расчет выполняли для массива талого грунта, в который погружена одиночная железобетонная свая с конструкцией одиночного вертикального парожидкостного термостабилизатора (СОУ). Геометрические размеры расчетной области равны 30 × 30 × 30 м. Длина сваи, погруженной в грунт, равна 7 м, сечение сваи 30 × 30 см, длина испарительной части сезонно действующего охлаждающего устройства (термостабилизатора) равна 8 м. Технические характеристики термостабилизатора задавались согласно паспорту технических условий производителя ООО НПО «Фундаментстройаркос» (табли-

ца). Расчеты выполняли для наихудших условий: скорость ветра принималась близкой к нулю. Климатические данные принимались по метеостанции г. Салехарда, теплофизические характеристики грунтов принимались по СП 25.13330.2020, прил. Б.

### Основные технические характеристики термостабилизатора

#### Main technical characteristics of the temperature stabilizer

№ п/п	Наименование параметров	Значение
1	Общая длина термостабилизатора, м	10,0
2	Длина подземной части, м	6,0
3	Диаметр корпуса / толщина стенки, мм	33,7/3,5
4	Диаметр оребрения, мм	67,0
5	Поверхность надземной части, не менее, м <sup>2</sup>	1,61
6	Поверхность подземной части, не менее, м <sup>2</sup>	0,634
7	Материал оребрения	Алюминий
8	Материал подземной части	Сталь 09Г2С
9	Хладагент	Аммиак
10	Защитное покрытие: ТНЦ 80-1 ГОСТ 9.304-87	

### Результаты расчетов и их анализ

Обобщенные результаты проведенных расчетов температурных режимов основания представлены на рис. 1. Синими берг-штрихами показана область распространения мерзлого грунта. В инженерной практике интерес представляет температурное распределение на конец первого цикла летнего периода (1 октября), т.е. наихудшее температурное распределение (температура грунтов основания в данный период имеет максимальные значения).

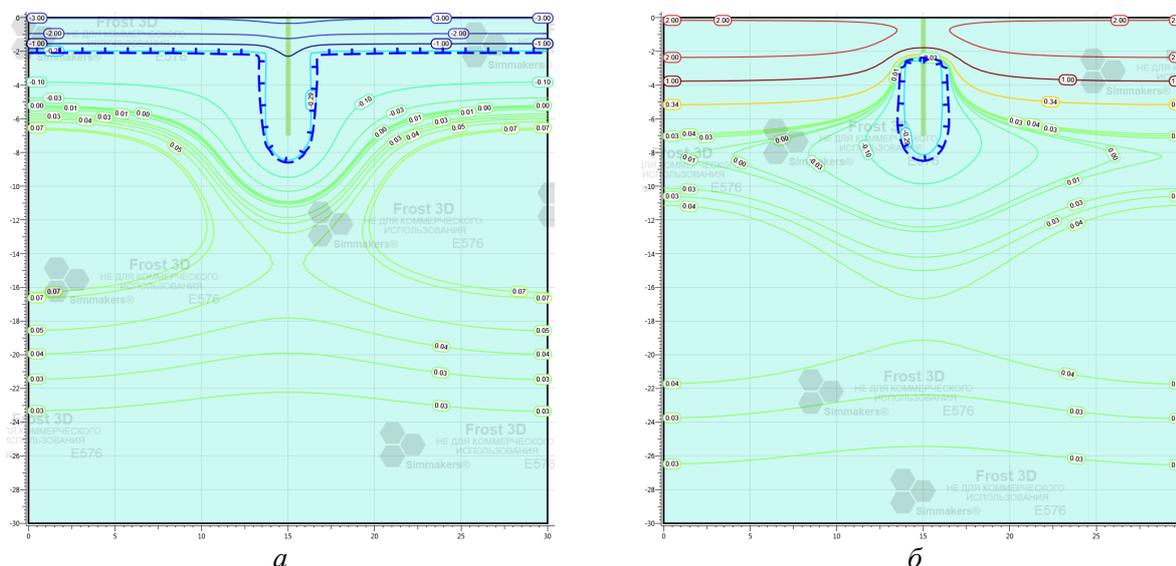


Рис. 1. Результаты расчета температурного режима: *а* – температура грунта на конец первого цикла зимнего периода (1 мая); *б* – температура грунта на конец первого цикла летнего периода (1 октября)

Fig. 1. Results of calculating the temperature regime: *a* – ground temperature at the end of the first cycle of the winter period (May 1); *b* – ground temperature at the end of the first cycle of the summer period (October 1)

По результатам анализов температурных расчетов была построена расчетная схема (рис. 2) одиночной железобетонной сваи с мерзлым ядром в термостабилизированном основании, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами. Можно отметить, что мерзлое ядро похоже с некоторыми допущениями на геометрическую фигуру в виде цилиндра. На данной расчетной схеме:  $h$  – высота мерзлого ядра;  $d$  – диаметр мерзлого ядра;  $L$  – глубина погружения (заложения) сваи,  $H$  – расстояние от дневной поверхности грунта до нижней точки мерзлого ядра.

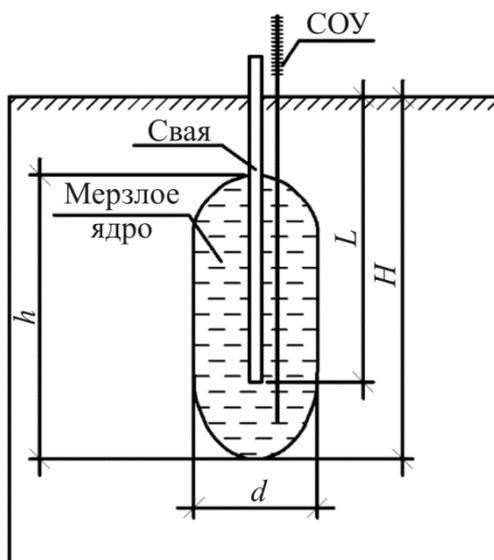


Рис. 2. Расчетная схема сваи в термостабилизированном грунтовом основании, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами. На данной расчетной схеме:  $h$  – высота мерзлого ядра;  $d$  – диаметр мерзлого ядра;  $L$  – глубина погружения (заложения) сваи,  $H$  – расстояние от дневной поверхности грунта до нижней точки мерзлого ядра

Fig. 2. Calculation diagram of a pile in a thermally stabilized soil base represented by thawed permafrost soils. In this computational scheme:  $h$  is the height of the frozen core;  $d$  is the diameter of the frozen core;  $L$  is the depth of pile immersion (embedding),  $H$  is the distance from the daytime ground surface to the bottom point of the frozen core

Проанализировав результаты расчетов, авторы построили графические зависимости:

1. Диаметра ( $d$ , м) мерзлого ядра от начальной температуры грунтов основания ( $T_{нач}$ , °С) для разных типов грунтов (рис. 3–5).
2. Высоты мерзлого ядра ( $h$ , м) от начальной температуры грунтов основания ( $T_{нач}$ , °С) для разных типов грунтов (рис. 6–8).
3. Геометрического положения ( $H - L$ , м) мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи в зависимости от начальной температуры грунтов основания ( $T_{нач}$ , °С) для разных типов грунтов (рис. 9–11).

На рис. 3–5 представлена графическая зависимость изменения диаметра мерзлого ядра ( $d$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °С) грунтов основания на конец первого цикла летнего периода.

Анализируя данные графиков, представленных на рис. 3–5, можно отметить, что установка одиночного вертикального парожидкостного термостабилизатора рядом с одиночной железобетонной свайей при разной начальной температуре грунтов основания позволяет получить диаметр мерзлого ядра от 0,5 до 3,0 м.

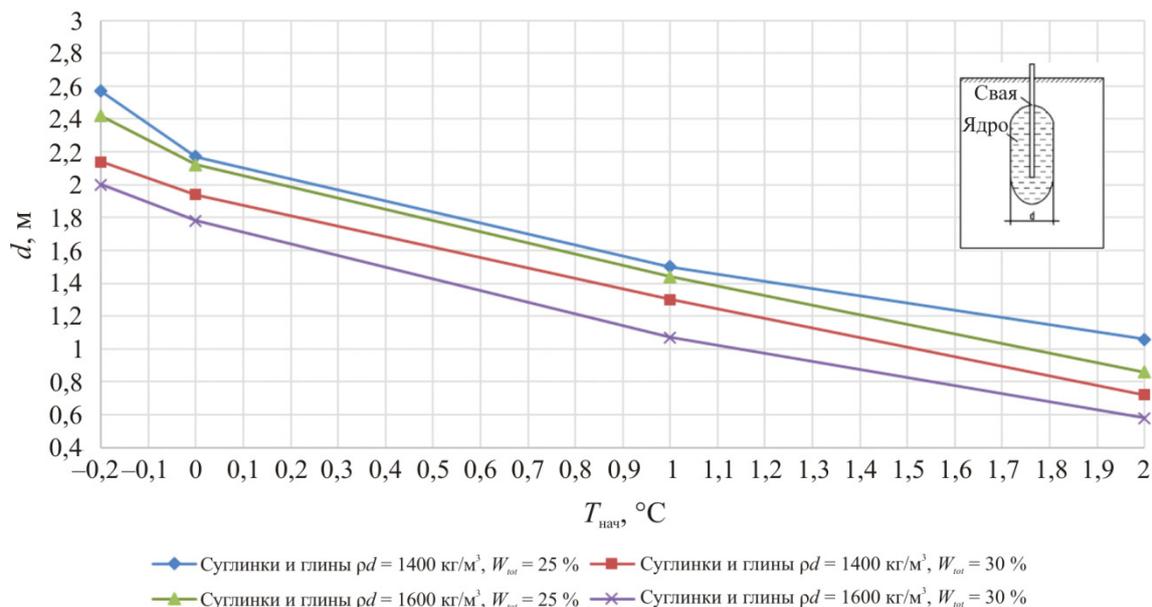


Рис. 3. Зависимость изменения диаметра мерзлого ядра ( $d$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) суглинков и глин на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 3. Dependence of the change in the diameter of the frozen core ( $d$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of loams and clays at the end of the first cycle of the summer period

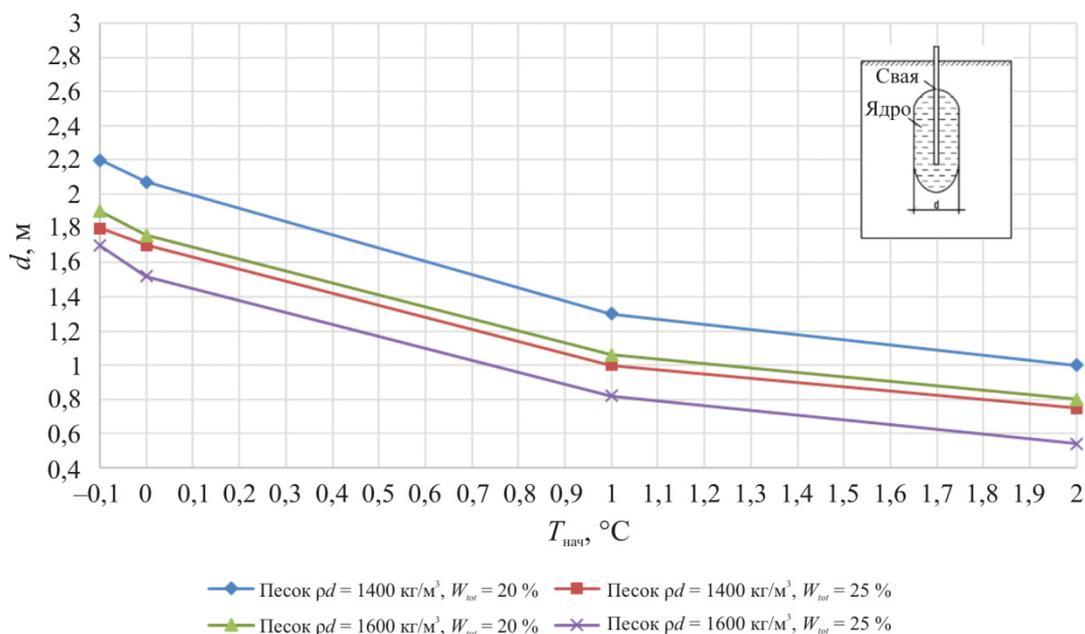


Рис. 4. Зависимость изменения диаметра мерзлого ядра ( $d$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) песков на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 4. Dependence of the change in the diameter of the frozen core ( $d$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of the sands at the end of the first cycle of the summer period

Другим важным параметром является геометрическое положение мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи, которое графически отображено на рис. 6–8.

По данным графиков на рис. 6–8 возможно определить геометрическое положение мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи при установке одиночного вертикального

парожидкостного термостабилизатора рядом с одиночной железобетонной свайей при разной начальной температуре грунтов основания, т.е. определить разность величин  $H - L$ .

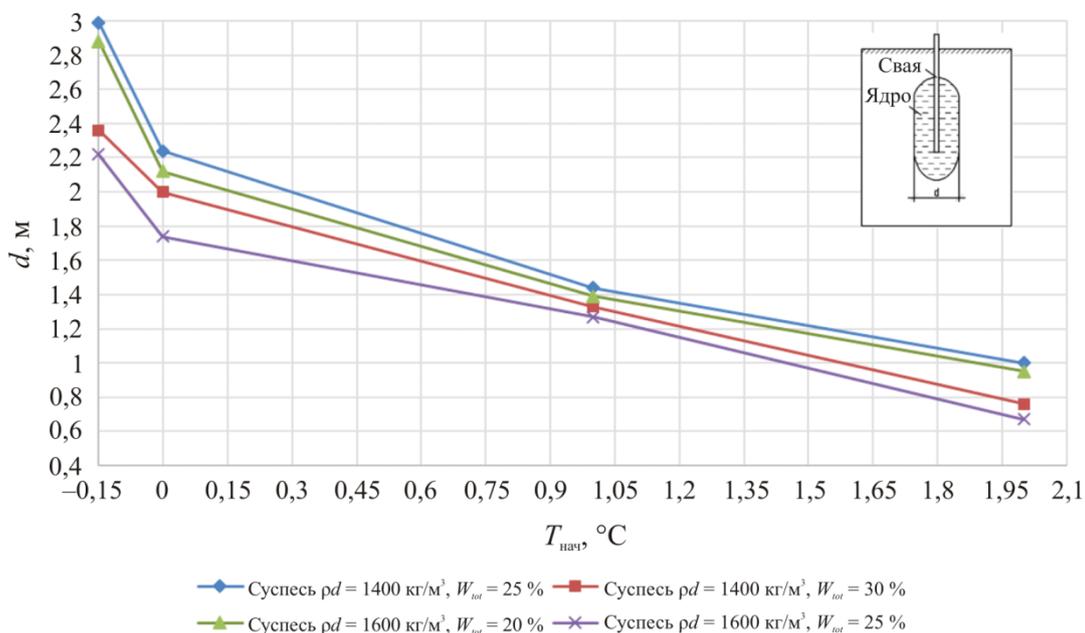


Рис. 5. Зависимость изменения диаметра мерзлого ядра ( $d$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) супесей на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 5. Dependence of the change in the diameter of the frozen core ( $d$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) of sandy loam at the end of the first cycle of the summer period

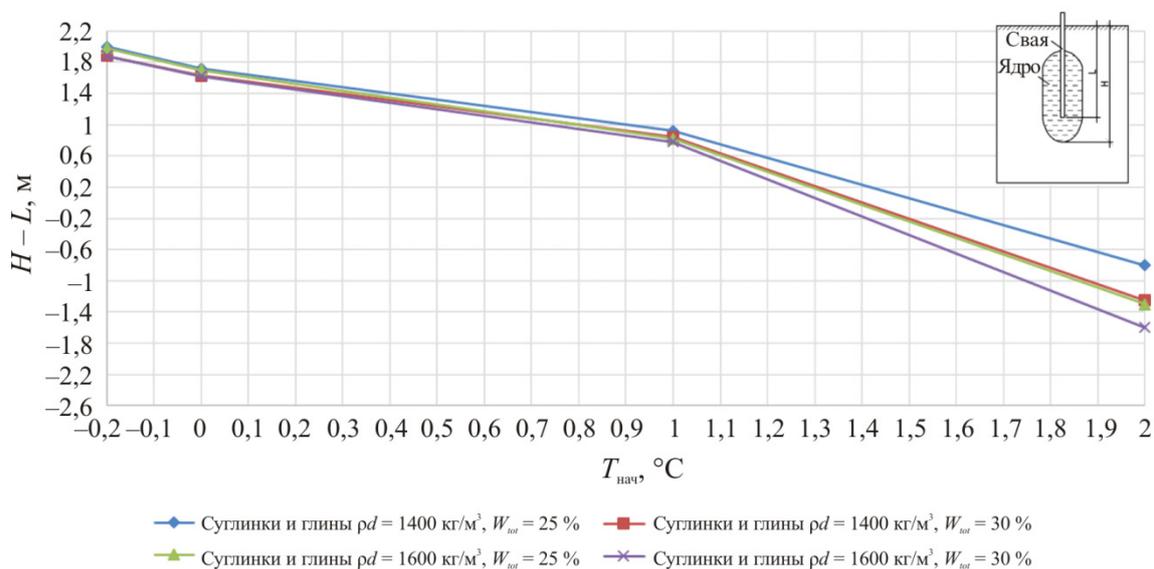


Рис. 6. Зависимость геометрического положения ( $H - L$ , м) мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи от начальной температуры ( $T_{нач}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) суглинков и глин на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 6. Dependence of the geometric position ( $H - L$ , m) of the frozen core relative to the lower end of the pile on the initial temperature ( $T_{нач}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) of loam and clay at the end of the first cycle of the summer period

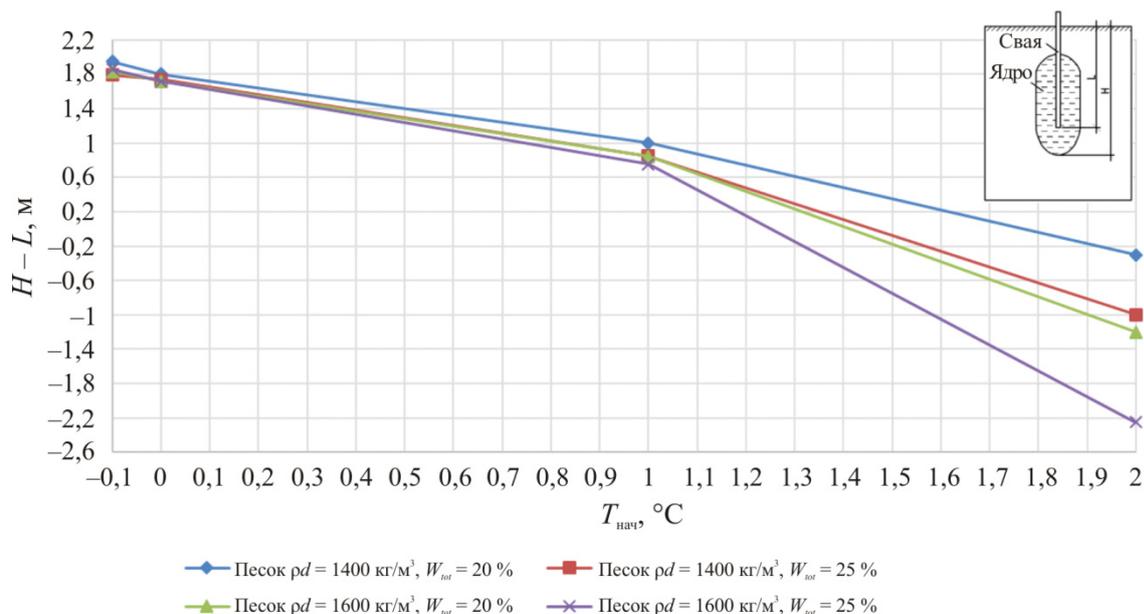


Рис. 7. Зависимость геометрического положения ( $H - L$ , м) мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) песков на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 7. Dependence of the geometric position ( $H - L$ , m) of the frozen core relative to the lower end of the pile on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of the sands at the end of the first cycle of the summer period

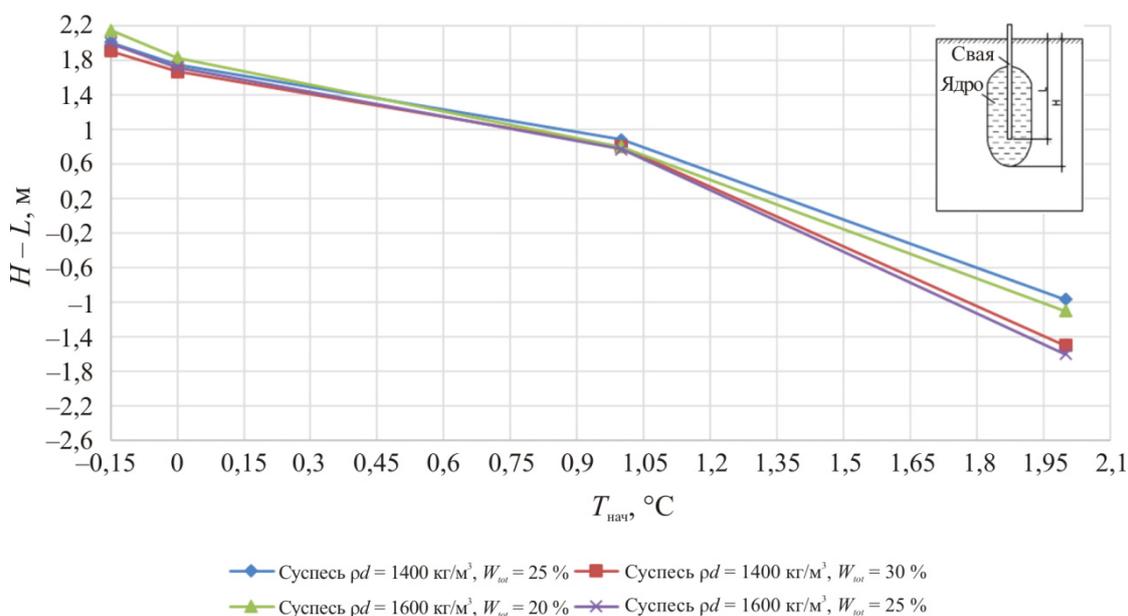


Рис. 8. Зависимость геометрического положения ( $H - L$ , м) мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) супесей на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 8. Dependence of the geometric position ( $H - L$ , m) of the frozen core relative to the lower end of the pile on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of sandy loam at the end of the first cycle of the summer period

На графиках, представленных на рис. 9–11, отображена зависимость изменения высоты мерзлого ядра от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) грунтов основания на конец первого цикла летнего периода.

По данным графиков, представленных на рис. 9–11, монтаж одиночного вертикального парожидкостного термостабилизатора рядом с одиночной железобетонной свайей при

разной начальной температуре грунтов основания позволяет получить высоту мерзлого ядра от 1,3 до 7,4 м.

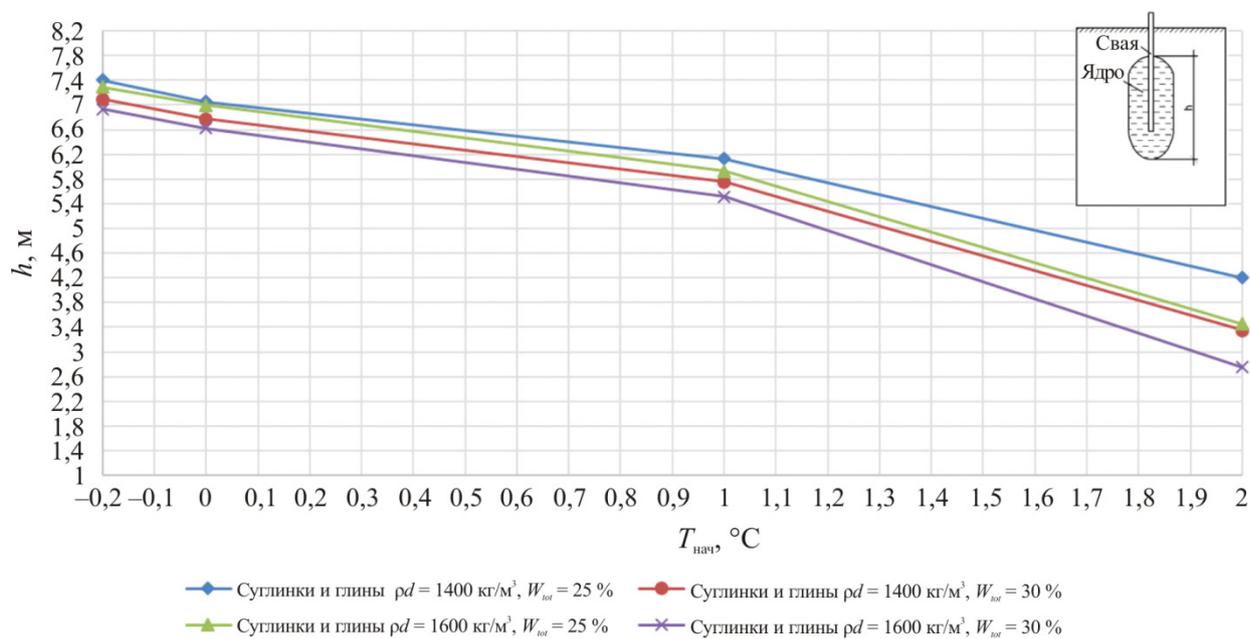


Рис. 9. Зависимость изменения высоты мерзлого ядра ( $h$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) суглинков и глин на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 9. Dependence of the change in the height of the frozen core ( $h$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of loam and clay at the end of the first cycle of the summer period

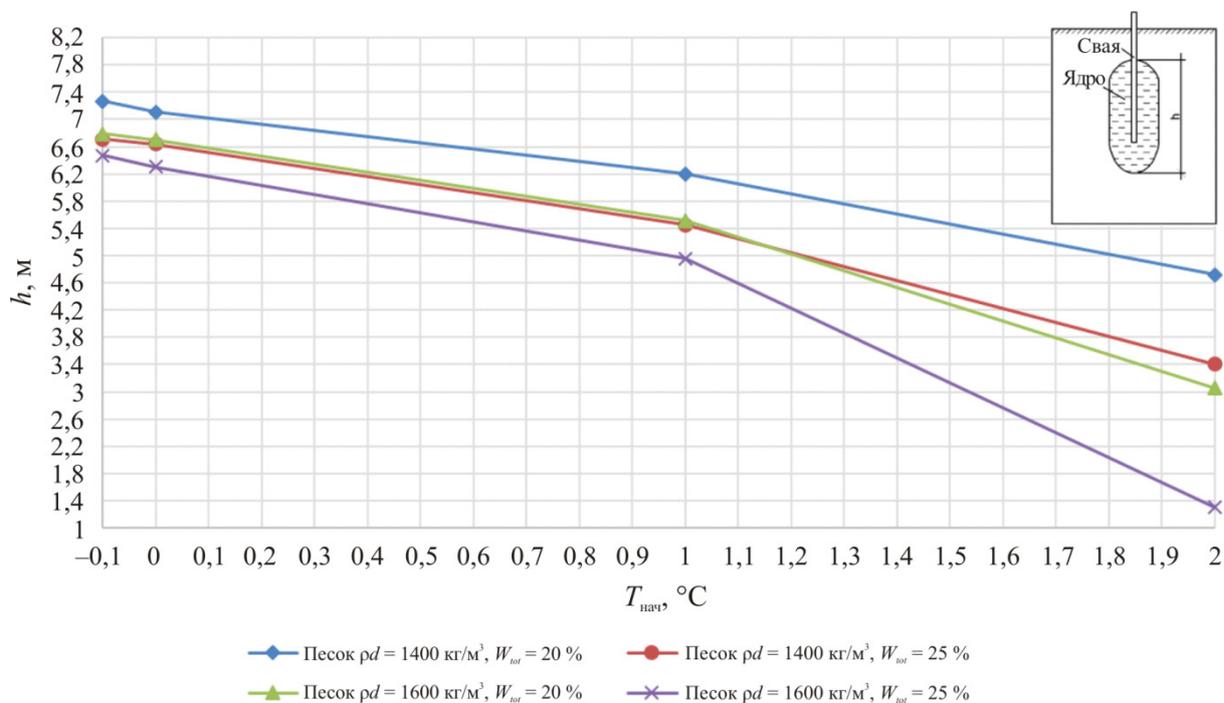


Рис. 10. Зависимость изменения высоты мерзлого ядра ( $h$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) песков на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 10. Dependence of the change in the height of the frozen core ( $h$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of the sands at the end of the first cycle of the summer period

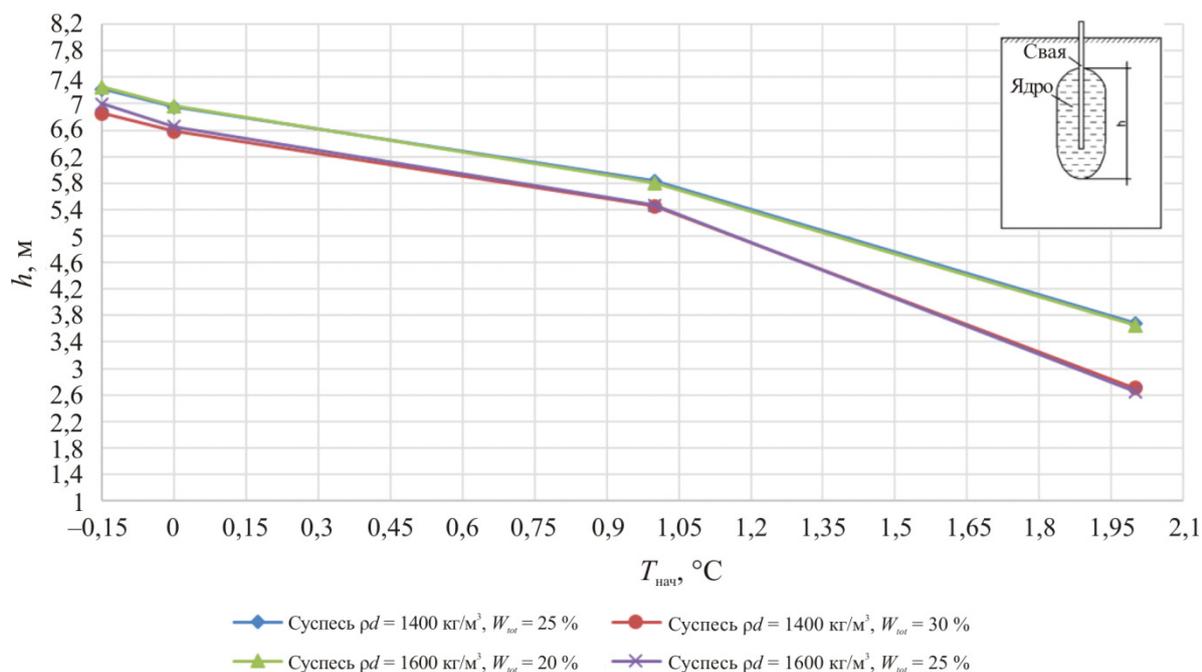


Рис. 11. Зависимость изменения высоты мерзлого ядра ( $h$ , м) от начальной температуры ( $T_{нач}$ , °C) супесей на конец первого цикла летнего периода  
 Fig. 11. Dependence of the change in the height of the frozen core ( $h$ , m) on the initial temperature ( $T_{нач}$ , °C) of sandy loam at the end of the first cycle of the summer period

## Выводы

Проведены численные эксперименты по определению основных геометрических параметров формируемого мерзлого ядра, которые способствуют сохранению и повышению несущей способности одиночной сваи в термостабилизированном основании, представленным оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами. На основе выполненного моделирования по прогнозу температурного режима термостабилизированного грунтового массива с одиночной свайей в программном комплексе Frost 3D на конец первого цикла летнего периода (1 октября) можно сделать следующие выводы:

1. При установке одиночного вертикального парожидкостного термостабилизатора рядом с одиночной железобетонной свайей по результатам численного моделирования получены значения диаметров мерзлого ядра:

- от 1,7 до 3,0 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = -0,1, -0,15, -0,2$  °C;
- от 1,5 до 2,25 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = 0$  °C;
- от 0,8 до 1,5 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = 1$  °C;
- от 0,5 до 1,1 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = 2$  °C.

2. По результатам расчетов при установке СОУ рядом с одиночной железобетонной свайей определено геометрическое положение мерзлого ядра относительно нижнего конца сваи при разной начальной температуре грунтов основания, вычислена разность величин  $H - L$ . При начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = -0,1, -0,15, -0,2, 0, 1$  °C разность величин  $H - L$  будет больше нуля, то есть нижний конец сваи находится в мерзлом ядре. А при начальной температуре грунтов основания  $T_{нач} = 2$  °C разность величин  $H - L$  будет меньше нуля, т.е. мерзлое ядро не выходит за пределы нижнего конца сваи.

3. Анализ температурных данных показал, что монтаж СОУ рядом с одиночной железобетонной сваей позволил получить значения высот мерзлого ядра:

- от 6,4 до 7,4 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = -0,1, -0,15, -0,2$  °С;
- от 6,3 до 7,2 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 0$  °С;
- от 4,9 до 6,2 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 1$  °С;
- от 1,3 до 4,8 м при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 2$  °С.

4. По данным численных экспериментов вычислены объемы мерзлого ядра в зависимости от начальной температуры грунтов основания:

- от 14,67 до 50,66 м<sup>3</sup> при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = -0,1, -0,15, -0,2$  °С;
- от 11,42 до 27,37 м<sup>3</sup> при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 0$  °С;
- от 2,61 до 10,82 м<sup>3</sup> при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 1$  °С;
- от 0,29 до 3,70 м<sup>3</sup> при начальной температуре грунтов основания  $T_{\text{нач}} = 2$  °С.

**Финансирование.** Выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-29-00118.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. – IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. – 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. – Geneva: IPCC Secretariat, 2019.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1007 с.
4. Бояринцев А.В. Репрезентативный анализ опыта строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 57–68. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.06
5. Long E.L. Means for maintaining permafrost foundations. Patent USA. N 3217791, Cl 165-45. – 1964.
6. Хрусталева Л.Н., Черкасова Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания – оттаивания грунта // Известия Сибирского отд. АН СССР. Серия технических наук. – 1966. – Т. 6, № 2. – С. 12–24.
7. Горелик Я.Б. Расчет температурного поля грунта вокруг жидкостной термосваи. – Проблемы нефти и газа Тюмени: науч.-техн. сб. // Записки СибНИГНИ, 1980. – Вып. 46. – С. 65–69.
8. Система температурной стабилизации оснований / Г.М. Долгих и др. // Наука в СССР. – 1991. – № 2. – С. 118–119.
9. Хрусталева Л.Н. Проблемы инженерной геокриологии на рубеже XXI века // Криосфера Земли. – 2000. – Т. IV, № 1. – С. 3–10.
10. Kotlyakov V., Khromova T. Permafrost, snow and ice // Land Resources of Russia, Digital Media / Eds. Stolbovoi V., McCallum I. – International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, Laxenburg, Austria. – 2002.

11. Yarmak Jr.E., Long E.L. Recent developments in thermosyphon technology // Proceedings of the 11th International Conference on Cold Regions Engineering. – 2002. – P. 656–662.
12. Долгих Г.М., Окунев В.Н. Системы замораживания и температурной стабилизации грунтов в зоне многолетнемерзлых пород, применяемые ООО НПО «Фундаментстройаркос» // Моделирование технологий замораживания искусственным холодом: материалы IX науч.-техн. конф. – 2003. – С. 123–129.
13. Аникин Г.В., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Тепломассоперенос в вертикальном парожидкостном термосифоне // Криосфера земли. – 2009. – Т. XIII, № 3. – С. 54–58.
14. Долгих Г.М., Вельчев С.П. Строительство на вечномерзлых грунтах: проблемы качества // Геотехника. – 2010. – № 6. – С. 23–29.
15. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 1. – С. 33–40.
16. Аникин Г.В., Поденко Л.С., Вакулин А.А. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII, № 1. – С. 51–55.
17. Long E.L. The long thermopile // Proceedings of the First International Conference on Permafrost. – Purdue University, US National Academy of Sciences. – P. 487–490.
18. Примаков С.С, Паздерин Д.С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезонно действующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4 – С. 124–125.
19. Ибрагимов Э.В., Кроник Я.А. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне (на примере вертикального стального резервуара РВС-20000 м<sup>3</sup>) // Геотехника. – 2018. – № 5-6. – С. 52–61.
20. Расчет деформированного состояния вязкоупругого водонасыщенного основания / Т.В. Мальцева, А.В. Набоков, В.В. Воронцов, Т.В. Крижанивская, А.В. Минаева // Нефть и Газ. – 2010. – № 4. – С. 94–99.
21. Ибрагимов Э.В., Кроник Я.А., Парамонов В.Н. Прогноз напряженно-деформированного состояния термостабилизированного основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – № 6. – С. 36–40.
22. Кроник Я.А. Термомеханические расчеты систем «грунтовое сооружение – вечномерзлое основание» с учетом криогенных процессов для прогноза безопасности // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 129–133.
23. Кроник Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне // Материалы IV конференции геокриологов России. – 2011. – Т. 3, ч. 8. – С. 285–292.
24. Кудрявцев С.А., Шестаков И.В., Петерс А.А. Численное моделирование при реконструкции и ремонте линейных сооружений на буронабивных свайных фундаментах в сезоннопромерзающих грунтах дальнего востока // Вестник ТОГУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 20. – С. 65–74.
25. Деформации морозного пучения и оттаивания грунтов при работе и повреждении сезонно-охлаждающих устройств / И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов, М.В. Парамонов, М.Е. Игошин // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 12. – С. 23–30.
26. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород / С.П. Степанов, А.Н. Цеева, В.И. Васильев, И.К. Сирдитов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – № 1. – С. 142–159.

27. Корнилов Т.А., Никифоров А.Я., Рабинович М.В. Мониторинг состояния многолетнемерзлых грунтов основания малоэтажных зданий с непрветриваемыми подпольями // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 4. – С. 27–32.

28. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

## References

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.

2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. Geneva, IPCC Secretariat, 2019.

3. Second Assessment report of roshydromet on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow, Roshydromet, 2014, 1007 c.

4. Boyarintsev A.V. Representative analysis of the experience of construction of foundations on permafrost soils. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i Arhitektura*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 57-68. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.06.

5. Long E.L. Means for maintaining permafrost foundations. Patent USA, no. 3217791, Cl 165-45 (1964).

6. Khrustalev L.N., Cherkasova L.N. Numerical method for solving the problem of freezing-thawing of soil. *Izvestiia of Siberian Branch of A.N. USSR, Series of Technical Sciences*, 1966, vol. 6, no. 2, pp. 12-24.

7. Gorelik Y.B. Calculation of temperature field of the soil around the liquid thermal pile. *Problems of oil and gas Tyumen: Scientific and Technical Collection. SibNIGNI*, 1980, iss. 46, pp. 65-69.

8. Dolgikh G.M. [et al.]. System of temperature stabilization of bases. *Science in USSR*, 1991, no. 2, pp. 118-119.

9. Khrustalev, L.N. Problems of engineering geocryology at the turn of XXI century / L.N. Khrustalev // *Earth Cryosphere*. - 2000. - Vol. IV. - №1. - С. 3-10.

10. Kotlyakov V., Khromova T. Permafrost, snow and ice. *Land Resources of Russia, Digital Media*. Eds. V. Stolbovoi, I. McCallum. International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, Laxenburg, Austria, 2002.

11. Yarmak Jr. E., Long E.L. Recent developments in thermosyphon technology. *Proceedings of the 11th International Conference on Cold Regions Engineering*, 2002, pp. 656-662.

12. Dolgikh G.M., Okunev V.N. Systems of freezing and temperature stabilization of soils in the zone of permafrost used by NPO "Fondamentstroyarkos". *Proceedings of IX Scientific and Technical Conference "Modeling of Technology of Freezing by Artificial Cold"*, 2003, pp. 123-129.

13. Anikin G.V., Podenko L.S., Feklistov V.N. Heat and mass transfer in the vertical steam-liquid thermosyphon. *Earth Cryosphere*, 2009, vol. XIII, no. 3, pp. 54-58.

14. Dolgikh G.M., Velchev S.P. Construction on permafrost soils: quality issues. *Geotekhnika*, 2010, no. 6, pp. 23-29.

15. Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Computer modeling of heat and mass transfer in horizontal soil cooling systems. *Earth Cryosphere*, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 33-40

16. Anikin G.V., Podenko L.S., Vakulin A.A. Calculation of soil freezing dynamics under influence of single thermosyphon. *Earth Cryosphere*, 2013, vol. XVII, no. 1, pp. 51-55.

17. Long E.L. The long thermopile. proceedings of the first international conference on permafrost. Purdue University, US National Academy of Sciences, pp. 487- 490.
18. Primakov S.S., Pazderin D.S. On the calculation of heat exchange when designing the condenser part of a seasonally operating cooling unit. *Oil Industry*, 2013, no. 4, pp. 124-125.
19. Ibragimov E.V., Kronik J.A. Optimization of bases and foundations in cryolithozone (by the example of a vertical steel tank RVS-20000 m<sup>3</sup>). *Geotechnika*, 2018, no. 5-6, pp. 52-61.
20. Maltseva T.V., Nabokov A.V., Vorontsov V.V., Krizhanivskaya T.V., Minaeva A.V. Calculation of the deformed state of a viscoelastic water-saturated foundation. *Oil and Gas*, 2010, no. 4, pp. 94-99.
21. Ibragimov E.V., Kronik J.A., Paramonov V.N. Prediction of the stress-strain state of a thermostabilized foundation. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*. 2018, no. 6, pp. 36-40.
22. Kronik Y.A. Thermomechanical calculations of systems "soil structure - permafrost base" taking into account cryogenic processes for safety prognosis. *Vestnik MGSU*, 2008, no. 2, pp. 129-133.
23. Kronik Y.A. Dynamics of accident rate and safety of natural-technogenic systems in cryolithozone. *Proceedings of IV Conference of Russian Geocryologists*, 2011, vol. 3, iss. 8, pp. 285-292.
24. Kudryavtsev S.A., Shestakov I.V., Peters A.A. Numerical modeling for reconstruction and repair of linear structures on bored pile foundations in seasonally freezing soils of the Far East. *Vestnik of TOFY. Construction and Architecture*, Khabarovsk, 2016, no. 20, pp. 65-74.
25. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.V., Igoshin M.E. Deformations of frost swelling and thawing of soils during operation and damage of seasonal cooling devices. *Industrial and Civil Engineering*, 2017, no. 12, pp. 23-30.
26. Stepanov S.P., Tseeva A.N., Vasiliev V.I., Sirditov I.K. Mathematical modeling of the temperature regime of foundations grounds in conditions of permafrost. *Bulletin of N.E. Bauman Moscow State Technical University*, 2017, no. 1, pp. 142-159.
27. Kornilov T.A., Nikiforov A.Y., Rabinovich M.V. Monitoring of permafrost soils of low-rise buildings with unventilated cellars. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2020, no. 4, pp.27-32.
28. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Bearing capacity of piles in permafrost soils under climate change. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02.