



Research Article





Received: September 8, 2024

Accepted: September 22, 2024

Published: October 1, 2024

ISSN 2304-6295

Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils

Kraev, Andrey Nikolaevich^{1*}  Maltseva, Tatyana Vladimirovna¹  Huang, Jiandong²  

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation; kraev-an@mail.ru (K.A.N.); maltsevatv@tyuiu.ru (M.T.V.)

² Guangzhou University, Guangzhou, China; jiandong.huang@hotmail.com (J.H.)

Correspondence: * email kraev-an@mail.ru; tel. [+79097408456](tel:+79097408456)

Keywords:

Thermal stabilization; Plastically frozen soil; Viscoelastic properties of soil; Settlement of the base soils

Abstract:

Under the influence of climatic conditions, highly compressible thawed soil layers appear in the foundation of a construction object. Therefore, the study of the deformed state of such a foundation is relevant, since the creep properties of thawed soil can lead to additional foundation settlements. To prevent the process of soil creep, thermal stabilization of the foundation is considered. **The object of research** is heaving freezing dispersed soils. The work aims to analyze the nature of freezing of the soil base when using thermal stabilization systems and to study soil deformations under gradual loading of foundations. Presents studies of the freezing soil massif, its temperature regime and settlement of pile foundations during thermal stabilization of the soil base. **Method.** Based on the results of experimental, the dependences of soil deformation in the process of ice-soil mass formation are established. An increase in the bearing capacity of the pile during soil freezing from 225 kN to 540 kN was revealed, as well as a gradual decrease in the intensity of the increase in foundation precipitation with its stabilization at around 33 mm. **Results.** Based on the results of field observations and numerical modeling of the soil temperature regime, the nature of soil base freezing was revealed in the form of the formation of individual ice-soil massifs with the presence of thawed soil between them in the first and second years of thermal stabilization and the gradual freezing of thawed zones until the formation of a solid frozen massif. According to the results of the experiment, in the initial period of construction, the foundation settlement of up to 5 mm in the first winter period was caused by frost heaving. With further loading of the base and a decrease in temperature due to thermal stabilizers, the foundation settlement increased to 32 mm according to a linear law. The formation of a solid frozen massif under the entire structure occurred at the end of the third winter period of thermal stabilization.

1 Introduction

Наблюдаемое потепление климата [1], [2] осложняет процесс строительства в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. Связано это с наличием в грунтовом основании сильносжимаемых талых прослоек грунта. Повышение температуры приповерхностного воздуха приводит к увеличению талой прослойки грунта при мерзлоте несливающегося типа, в которой происходит дополнительное влагонакопление, что приводит к дополнительному тепловому влиянию на нижележащие мерзлые слои грунта, которые при оттаивании дают значительные приращения осадки. В статье [3] приведен численный пример расчета срока службы свай в твердом мерзлом грунте фундамента в опоре нефтепровода.

Kraev, A.; Maltseva, T.; Huang, J.

Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11307. doi: 10.4123/CUBS.113.7



Для исключения вышеуказанных негативных процессов при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений чаще всего данные грунты промораживаются системами термостабилизации для обеспечения надежности фундаментов зданий и сооружений [4], [5].

Первый принцип проектирования (многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения, или с допущением их промораживания в период строительства и эксплуатации) в условиях потепления климата обеспечивается применением систем температурной стабилизации грунтов основания, таких как: отдельно стоящих сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ), горизонтально-естественно действующих систем (ГЕТ), вертикально-естественно действующих охлаждающих систем (ВЕТ) и других их комбинаций [6], [7].

Наибольшее распространение получило решение в виде групповой установки отдельно стоящих термостабилизаторов с применением проветриваемого подполья. Данное решение позволяет эффективно промораживать талые слои достаточно большой мощности и поддерживать мерзлое состояние с учетом фиксируемого потепления климата [8].

Изучению работы систем термостабилизации посвящено достаточно большое количество трудов. Авторы работы [8] отмечают эффективность применения систем термостабилизации в условиях потепления климата. В работе [9] авторы рассматривают применение охлаждающих устройств с горизонтальной испарительной частью, изучается изменение температуры вдоль испарительной части и схема циркуляции хладагента в двухфазной системе. Предлагается методика расчета охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем.

Авторы работы [10] рассматривают различные варианты заполнения охлаждающих систем ГЕТ хладагентами, отмечается эффективность применения диоксида углерода, аммиака, фреона 22 в качестве хладагента. В работе [11] авторами рассматривается способ моделирования работы систем ГЕТ, приводится экспериментальный способ определения коэффициента теплоотдачи поверхности конденсатора, а также рассматривается стохастический прогноз температуры грунта и мощности систем ГЕТ. В работе [12] авторы приводят сравнение экспериментальных данных и численного моделирования работы охлаждающей системы, отмечается хорошая сходимость температурных прогнозных расчетов с полевыми наблюдениями.

Авторы [13] исследовали горизонтальные системы температурной стабилизации при их слабонаклонном, горизонтальном и противонаклонном расположениях. Отмечается выявленная наибольшая эффективность при слабонаклонном положении охлаждающих элементов и наименьшая при противонаклонном расположении. В работе [14] рассматривают двухфазные естественно-конвективные устройства (термостабилизаторы), приводятся теоретические предпосылки расчета теплообмена термостабилизатора с грунтом и атмосферой. Предложен способ оценки предельной длины испарительной части охлаждающего устройства. Исследования авторов [15] отмечают эффективность группового применения термостабилизаторов для охлаждения грунтового основания, указывают что в большинстве случаев применение отдельно стоящих термостабилизаторов недостаточно для круглогодичного поддержания грунта в твердомерзлом состоянии.

Указанные выше исследования направлены на изучение отдельных температурных задач при термостабилизации грунтового основания и не включают в себя процессы, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

Однако, промораживание талых слоёв основания, при мерзлоте несливающегося типа, часто происходит в процессе строительства зданий и сооружений, при этом расчетные температуры грунтов, заложенные в проектных решениях, не всегда обеспечиваются. Необходимо отметить, что чаще всего в проектных решениях приняты температуры, направленные на достижение твердомерзлого состояния грунтов, в данном случае не требуются расчеты по второй группе предельных состояний. При температурах выше твердомерзлого состояния выполнение расчетов по деформациям обязательно согласно действующим нормам. Следует отметить, что в работе [16] отмечается возможность появления деформаций грунтового массива при температурах, в том числе обеспечивающих твердомерзлое состояние, в данном случае необходимо ориентироваться на коэффициент сжимаемости мерзлого грунта.

Так как одним из компонентов фазового состава мерзлых грунтов является лёд, при увеличении нагрузки на основание значительно проявляются свойства ползучести грунтов. О необходимости учета ползучести при расчетах фундаментов как в талых, так и в мерзлых грунтах указывается авторами работ [17]-[21]. При этом ползучесть рассматривается в случае

Kraev, A.; Maltseva, T.; Huang, J.

Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11307. doi: 10.4123/CUBS.113.7



ограниченного модуля деформации [22]. Имеется разработанный инструментарий для учета вязкоупругих свойств грунтов в расчетах грунтовых оснований [23]-[25]. В работе [26] представлено использование информационной модели грунта для прогнозирования свойств грунта на основе его известных характеристик и снижения затрат на инженерно-геологические изыскания. В исследовании [27] представлен инженерный метод, основанный на критерии недренированного состояния грунта внутри массива, учитывающий, как упругие, так и остаточные деформации через эквивалентные деформации ползучести. Метод позволяет проводить расчеты на основе данных статического зондирования используя модели упруговязкопластических грунтов.

В процессе промерзания грунта происходит постепенное увеличение льдогрунтового массива, но в отдельные моменты времени (конец летнего периода) намороженный термостабилизаторами мерзлый массив может находиться в охлажденном, либо талом грунте. Температура льдогрунтового массива (либо его части) в период формирования, как правило, выше твердомерзлого состояния, что также указывает на необходимость выполнения расчета осадки фундаментов на различных стадиях строительства, до достижения температур твердомерзлого состояния грунтов.

Изучению напряженно-деформированного состояния (НДС) многолетнемерзлых грунтов посвящены работы [28]-[31]. В работе [28] отмечается, что термостабилизация в процессе строительства позволяет сократить сроки строительства, однако такой подход должен сопровождаться соответствующими деформационными расчетами. Авторами работы [29] проведены численные расчеты, показывающие возможность появления значительных деформаций пучения при применении систем термостабилизации. Аналитическое решение для расчета деформаций пучения с учетом осадки промерзающих, промерзших и подстилающих слоев грунта приводится в работе [30]. Аналитические решения по определению НДС мерзлых грунтов с применением обобщенного закона Гука получены в [31].

Необходимо отметить иностранных ученых, активно занимающихся вопросами исследования многолетнемерзлых грунтов. В работе [32] представлены полевые исследования насыпи с применением двухфазных термосифонов. В работе отмечается максимальная эффективность охлаждения не более 2.0 м. Авторы [33] исследовали различную конденсаторную часть термостабилизаторов с выявлением эффективного расстояния между ними. В работе [34] предлагается метод, сочетающий стальные винтовые сваи с искусственным замораживанием грунта, при котором жидкий хладагент циркулирует по полному стволу винтовой сваи для снижения температуры окружающей вечной мерзлоты. В исследованиях [35, 36] представлены модельные испытания и численное моделирование влияния фильтрационных потоков на замороженный грунт, по которым было выявлено, что по мере увеличения скорости просачивания площадь промерзания, образованная одной трубой, уменьшалась, в то время как доля низкотемпературной зоны увеличивалась, а средняя температура температурного поля снижалась.

Анализ научных источников показал отсутствие комплексного подхода к изучению напряженно-деформированного состояния грунтов в процессе термостабилизации грунтового основания и одновременного возведения зданий и сооружений при мерзлоте неслювающегося типа, который заключался в одновременном изучении влияния температурного режима на НДС грунтового основания. Эта статья посвящена частичному устранению этих пробелов, то есть предложено нивелировать дополнительное тепловое влияние приповерхностного воздуха на нижележащие мерзлые слои грунта за счет применения термостабилизаторов и одновременно изучить НДС грунтового основания экспериментальным путем.

На основании выполненного анализа была сформулирована цель дальнейших исследований, заключающаяся в экспериментальных исследованиях механизмов и закономерностей процессов деформирования грунтового основания при температурной стабилизации грунтов.

В задачи исследования входило выполнение комплекса полевых экспериментов направленных на получение закономерностей о формировании мерзлого массива грунта и деформациях грунтового основания в процессе температурной стабилизации и одновременного возведения конструкций здания.

Объектом исследования являлись пучинистые дисперсные промерзающие грунты, предметом исследования - деформированное состояние промерзающего массива грунта.

Обзор методов изучения систем термостабилизации, температурного режима и напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтов, позволил спланировать

Kraev, A.; Maltseva, T.; Huang, J.

Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11307. doi: 10.4123/CUBS.113.7

экспериментальные наблюдения за указанными параметрами в процессе поэтапного возведения здания.

2 Materials and Methods

Для выявления закономерностей деформирования промерзающего грунтового основания авторами выполнялись натурные исследования на площадке строительства в Ямало-Ненецком автономном округе.

Строительный объект представляет собой жилой дом, расположенный в Ямало-Ненецком автономном округе, каркас которого выполнен из сборных железобетонных элементов. Фундамент здания – свайный, из железобетонных свай длиной 12м, сечением 0.3х0.3м, погруженных в грунт от 9.5 до 10м, объединенных отдельно стоящими монолитными железобетонными ростверками. Для обеспечения первого принципа проектирования у ростверков группами устанавливались термостабилизаторы. Проектными решениями здания было предусмотрено проветриваемое подполье с естественной вентиляцией. Общий вид конструкций фундаментов с установленными термостабилизаторами представлен на рис. 1.



Рис. 1 – Общий вид конструкций фундаментов с термостабилизаторами
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 1 – General view of foundation structures with thermal stabilizers
Image by the author of the article

Установка термостабилизаторов выполнялась после забивки свайного поля, длина испарительной части составляла 10м, длина конденсатора 1м.

Схема свайного поля с расстановкой термостабилизаторов для одной секции здания представлена на рис. 2.

Исследуемая площадка строительства характеризуется сложным напластованием инженерно-геологических элементов с изменяющейся отметкой кровли многолетнемерзлых грунтов (рис. 3).

Многолетнемерзлые грунты встречены с глубины 6.0–11.0 м, их мощность неоднородна, частью скважин вскрыт талик с глубины 15.5–16.5 м. Мерзлые глинистые грунты характеризуются слоисто-сетчатой текстурой, пески – большей частью массивной текстурой.

Наименование инженерно-геологических элементов и некоторые физико-механические характеристики грунтов (сцепление C , кПа; угол внутреннего трения φ , градус; модуль деформации E , МПа; показатель текучести I_L , доли единиц; коэффициент оттаивания A_{th} , доли единиц; суммарная льдистость, I_{tot} , доли единиц; эквивалентное сцепление, C_{eq} , МПа) приведены в таблице 1.

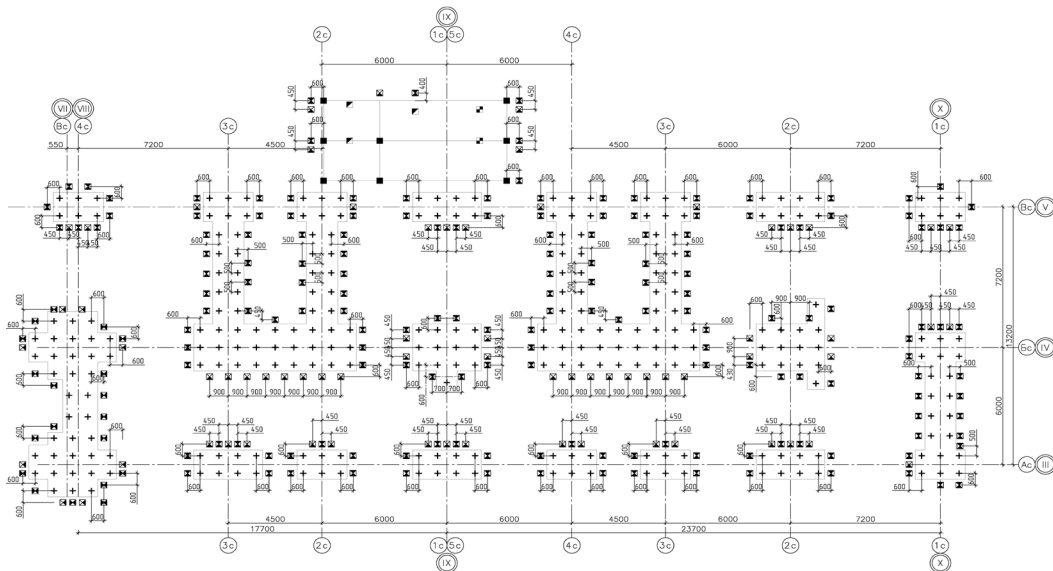


Рис. 2 – Схема свайного поля с расстановкой термостабилизаторов
 Изображение выполнено автором статьи
Fig. 2 – Scheme of pile field with arrangement of thermal stabilizers
 Image by the author of the article

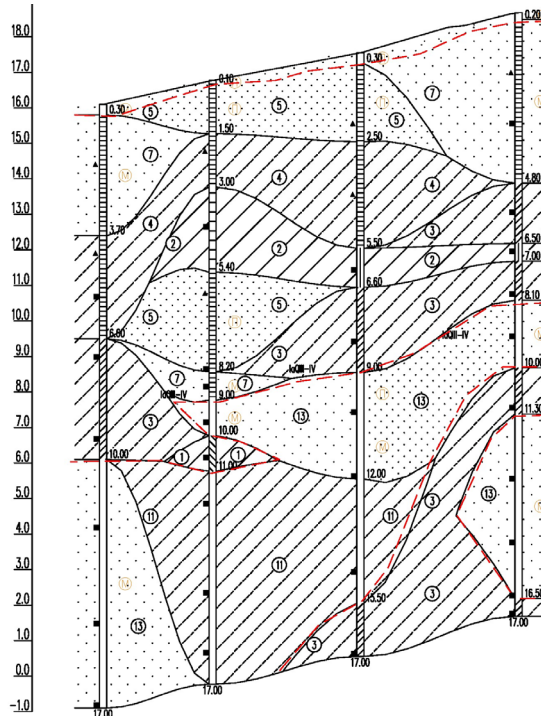


Рис. 3 – Инженерно-геологический разрез строительной площадки
 Изображение выполнено автором статьи
Fig. 3 – Engineering-geological section of the construction site
 Image by the author of the article

Следует отметить, что инженерно-геологический элемент ИГЭ-11 (супесь мерзлая, слоистой криотекстуры, слабльдистая, с примесью органических веществ) в талом состоянии имеет текучую консистенцию. На момент проведения инженерных изысканий данный грунт находился в мерзлом состоянии, однако при проведении статических испытаний грунтов натурными сваями были зафиксированы отдельные участки строительной площадки с наличием данных грунтов в талом состоянии.

Результаты статических испытаний показали значительную разницу частных значений несущей способности свай в мерзлых и талых грунтах (рис. 4).

Таблица 1. Характеристики грунтов
Table 1. Soil characteristics

Грунт	C, кПа	φ , °	E, МПа	I_L , д.е.	A_{th} , д.е.	I_{tot} , д.е.	C_{eq} , МПа
Суглинок текучепластичный (ИГЭ-1)	11	11	5	0.90	—	—	—
Суглинок полутвердый (ИГЭ-2)	26	24	19	0.16	—	—	—
Супесь пластичная (ИГЭ-3)	15	20	10	0.90	—	—	—
Супесь твердая (ИГЭ-4)	13	24	19	-0.15	—	—	—
Песок пылеватый, средней плотности (ИГЭ-5)	4	30	18	—	—	—	—
Песок мелкий, средней плотности (ИГЭ-7)	2	30	28	—	—	—	—
Супесь твердомерзлая, в талом состоянии текучая (ИГЭ-11)	—	—	16	2.14	0.035	0.36	0.294
Песок пылеватый, твердомерзлый (ИГЭ-13)	—	—	24	—	0.038	0.39	0.332

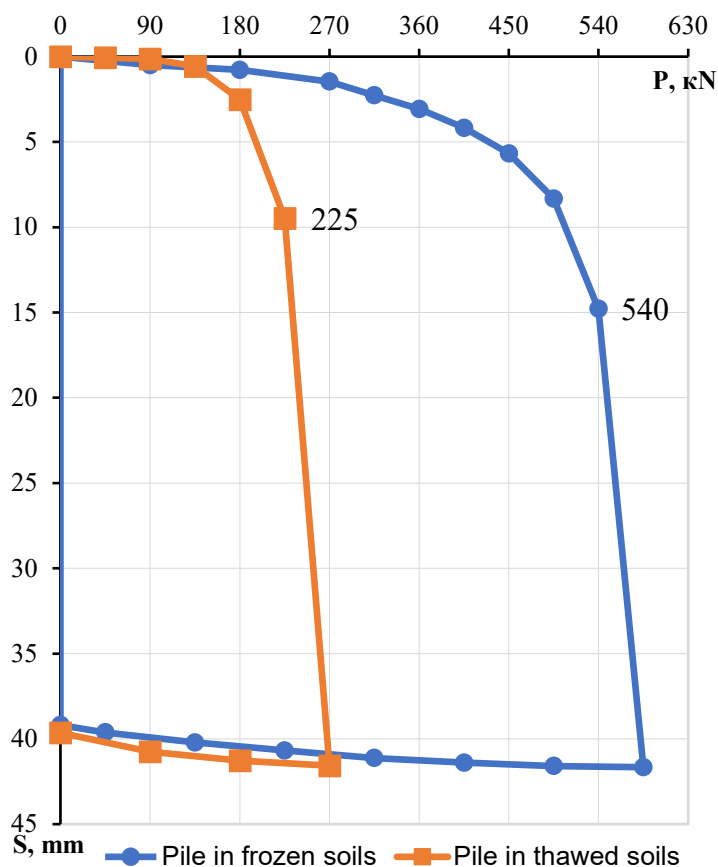


Рис. 4 – Результаты статических испытаний грунтов сваями

Изображение выполнено автором статьи

Fig. 4 – Results of static tests of soils with piles

Image by the author of the article

Частное значение несущей способности сваи, испытанной в мерзлых грунтах, составило 540кН при температуре грунта под пятой сваи минус 0.3°C. Частное значение несущей

Kraev, A.; Maltseva, T.; Huang, J.

Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11307. doi: 10.4123/CUBS.113.7

способности свай в оттаявших многолетнемерзлых грунтах составило **225 кН**. Разница в несущей способности свай составила более чем в 2 раза. Это указывает на необходимость сохранения грунтов в мерзлом состоянии для обеспечения требуемой несущей способности (**500 кН**), а также необходимость ограничения загрузки свай (при температурах грунтов выше расчетных значений) и отслеживания динамики осадки при возведении здания.

Так как деформативность многолетнемерзлых грунтов основания в значительной степени зависит от их температуры, выполнялось наблюдение за температурным режимом основания, путем периодических замеров по термометрическим скважинам глубиной 12м при помощи электронных термометрических датчиков.

Осадка здания фиксировалась при помощи деформационных марок, расположенных в теле отдельно стоящих ростверков. Замеры выполнялись высокоточным нивелированием второго класса точности.

Дополнительно, для уточнения прогнозных расчетов температурного режима грунтов основания, выполнялись замеры плотности и высоты снежного покрова при помощи весового снегомера ВС-43.

Для оценки работоспособности систем термостабилизации (сезонно-действующих охлаждающих устройств) выполнялось их обследование с применением тепловизионной съемки.

3 Results and Discussion

По результатам наблюдений за температурным режимом грунтового основания было выявлено, что полное формирование мерзлого массива грунта происходит только после третьего сезона промораживания, температуры грунтов представлены на конец зимнего и летнего периодов (табл. 2).

Таблица 2. Температуры грунтов основания
Table 2. Temperatures of foundation soils

Глубина, м	Температура грунта, °С							
	2020	2021		2022		2023		2024
	ноябрь	апрель	октябрь	апрель	октябрь	апрель	октябрь	апрель
0	-2.5	0.0	-4.4	-0.7	-2.1	-9.7	3.8	-7.2
0.5	-1.1	-3.1	-1.9	-1.9	-1.0	-10.3	2.4	-9.3
1	0.2	-4.0	-0.2	-3.1	0.0	-9.4	1.7	-9.4
1.5	0.6	-3.6	0.3	-4.0	0.2	-8.3	1.5	-8.8
2	1.0	-3.3	0.3	-4.1	-0.2	-7.7	1.1	-8.2
2.5	1.2	-2.8	0.2	-3.9	0.1	-7.2	0.3	-7.9
3	1.4	-2.2	0.0	-3.7	0.0	-6.8	-0.1	-7.6
3.5	1.5	-1.7	-0.1	-3.5	-0.1	-6.4	-0.4	-7.1
4	1.5	-1.3	-0.1	-3.2	-0.3	-6.0	-0.6	-6.9
4.5	1.4	-1.1	-0.1	-2.8	-0.3	-5.8	-0.9	-6.5
5	1.3	-0.9	-0.1	-2.4	-0.3	-5.5	-1.0	-6.2
6	0.8	-0.9	0.0	-1.9	-0.3	-5.1	-1.2	-5.7
7	0.3	-0.7	0.0	-1.6	-0.3	-4.6	-1.2	-5.3
8	-0.1	-0.7	-0.1	-1.5	-0.3	-4.1	-1.1	-4.9
9	-0.1	-0.5	-0.2	-1.3	-0.2	-3.7	-1.1	-4.4
10	-0.1	-0.4	-0.2	-1.0	-0.3	-2.7	-1.0	-3.6
11	0.0	-0.3	-0.1	-0.6	-0.2	-1.6	-1.0	-2.4
12	-0.1	-0.2	-0.1	-0.4	-0.2	-1.1	-0.8	-1.9
Средние температуры по боковой поверхности	+0.6	-0.9	-0.1	-1.9	-0.2	-4.5	-0.9	-5.2

На начало строительства (ноябрь 2020г) температуры грунтов под пятой сваи, согласно действующей классификации, соответствовали охлажденному состоянию. Практически по всей боковой поверхности сваи температуры грунтов соответствовали талому состоянию.

После первых двух циклов охлаждения температуры грунтов на конец летнего периода опускались значительно ниже расчетной (проектной) температуры минус 0.6°С, что обеспечивалось эффективной работой термостабилизаторов. Однако, ввиду большой теплоемкости промораживаемого талого основания, за летний период времени значительная часть мерзлого массива растеплялась, причем перепад средних температур грунтов за зимний и летний периоды составил в первый год 1.5°С, во второй год строительства 2°С.

После третьего цикла термостабилизации основания температуры грунтов соответствовали расчетным значениям на конец летнего периода, что говорит о достижении расчетных температур грунтов, необходимых для обеспечения несущей способности основания.

Экспериментальные наблюдения за высотой и плотностью снежного покрова позволили выявить возможные отклонения данных параметров от принимаемых осредненных значений по результатам наблюдений. Величины высоты и плотности снежного покрова представлены в виде графиков, замеры выполнялись в разных створах строящегося микрорайона (рис. 5).

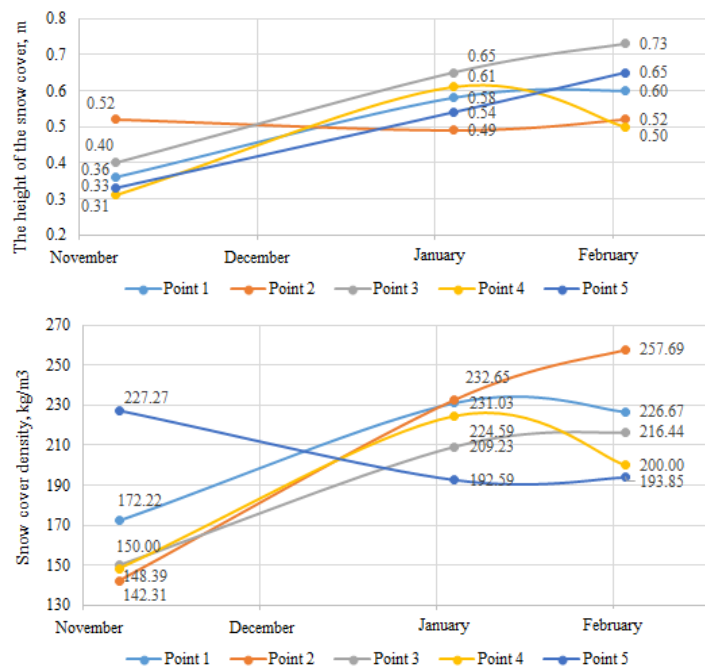


Рис. 5 – Снегомерная съёмка (высота снежного покрова, плотность снежного покрова)

Изображение выполнено автором статьи

Fig. 5 – Snow survey (snow depth, snow density)

Image by the author of the article

По результатам замеров высоты и плотности снежного покрова наибольший разброс значений зафиксирован в начале зимнего сезона. Стоит отметить, что разброс значений указанных параметров в границах одной строительной площадки может составлять более 40 процентов. По результатам снегомерной съёмки корректировались граничные условия при моделировании температурного режима грунтов основания.

Контроль работоспособности систем термостабилизации выполнялся при помощи тепловизионного обследования и требовался для оценки эффективности охлаждающих устройств, а также времени включения их в работу.

a)

б)

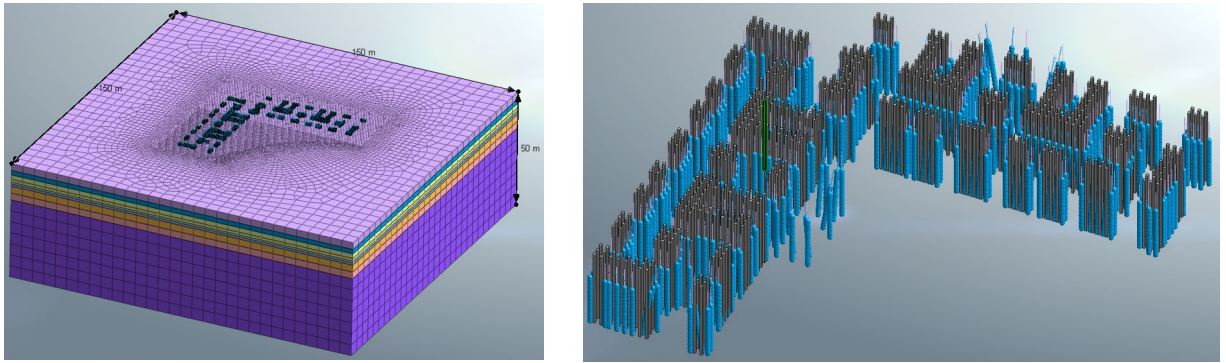


Рис. 6 – Расчетная схема грунтового массива
 а) общий вид расчетной схемы; б) моделирование термостабилизаторов
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 6 – Calculation scheme of the soil massif
 а) general view of the calculation scheme; б) modeling of thermal stabilizers
Image made by the author of the article

Результаты комплексных экспериментальных исследований использовались при выполнении прогнозных расчетов температурного режима грунтов.

Моделирование выполнялось в программном комплексе Midas FEA NX. Грунтовой массив принимался размерами в плане 150x150м и глубиной 50м (рис. 6).

Для описания теплового обмена на границе области между грунтом и окружающей средой использовалось граничное условие третьего рода (конвекция). В качестве исходных параметров задавались температура приповерхностного воздуха и коэффициент теплообмена.

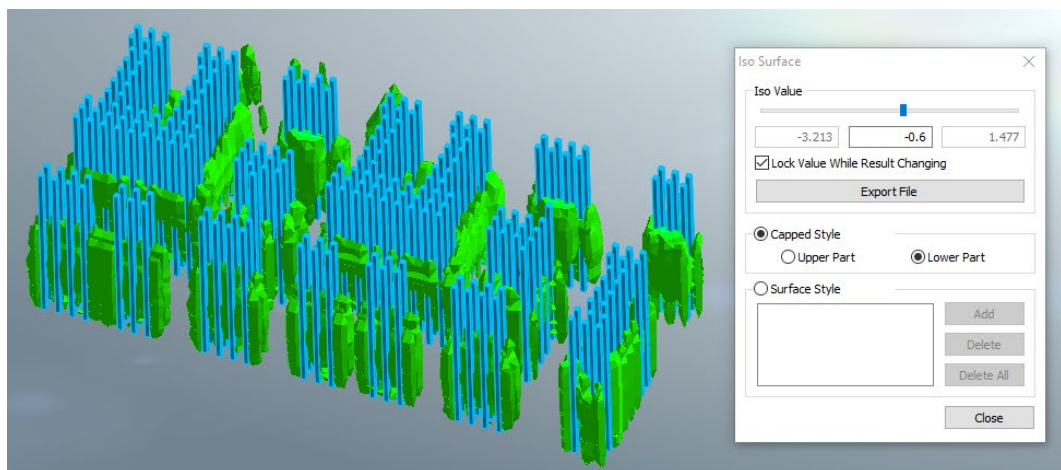


Рис. 7 – Зоны намораживания мерзлого массива грунта за 2 месяца работы термостабилизаторов (температура минус 0.6°C)
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 7 – Freezing zones of frozen soil mass for 2 months of operation of thermal stabilizers (temperature minus 0.6°C)
Image by the author of the article

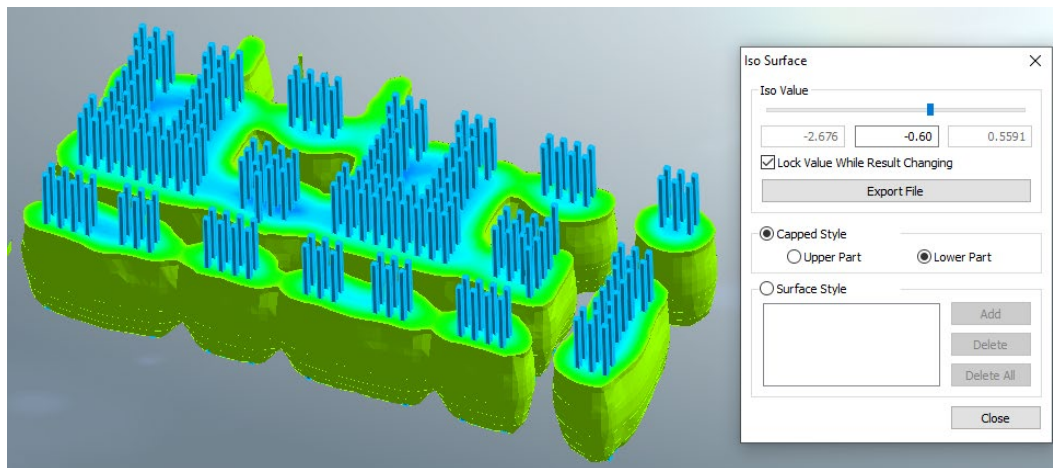


Рис. 8 – Зоны намораживания мерзлого массива грунта на конец первого зимнего периода (температура минус 0.6°C)

Изображение выполнено автором статьи

Fig. 8 – Freezing zones of frozen soil mass at the end of the first winter period (temperature minus 0.6°C)

Image by the author of the article

До выполнения прогнозных температурных расчетов выполнялась «калибровка» схемы в виде стабилизации температурного режима грунтов на глубине нулевых амплитуд колебаний в естественных условиях при отсутствии здания и систем термостабилизации.

Работа термостабилизаторов моделировалась граничным условием третьего рода, которое прикладывалось с глубины 3 метров, ввиду наличия термоизолирующего кожуха в деятельном слое грунта.

По результатам выполненных температурных расчетов были получены поля распределения температур в грунтовом массиве в период экспериментальных наблюдений за объектом.

В первые месяцы работы систем охлаждения намораживание мерзлого массива происходит в виде отдельных зон у термостабилизаторов. Результаты представлены в виде изотермических поверхностей (рис. 7).

В дальнейшем происходит вмерзание свай в мерзлый массив, сформированный у отдельных кустов свайного фундамента (рис. 8).

На конец первого и второго летних периодов происходит значительная деградация отдельных мерзлых массивов грунта.

После третьего зимнего периода работы термостабилизаторов формируется сплошной мерзлый массив под зданием с температурами, соответствующими проектным значениям (минус 0.6°C).

В процессе промерзания грунтового основания велось постепенное возведение конструкций здания, при этом контролировалась осадка фундаментов. В первые два года термостабилизации на конец летнего периода температура грунтов основания поднималась до значений, при которых не обеспечивается несущая способность свай (выше расчетной температуры минус 0.6°C). Однако при постепенном намораживании мерзлого грунтового массива и увеличении нагрузки на фундаменты, происходит постепенное затухание осадки здания до её стабилизации.

В качестве результатов экспериментальных замеров осадки фундаментов представлен характерный график для типового ростверка, ввиду идентичности данных по деформационным маркам на других ростверках. Экспериментальный график осадки здания за период с ноября 2020г по январь 2024г представлен на рисунке 9.

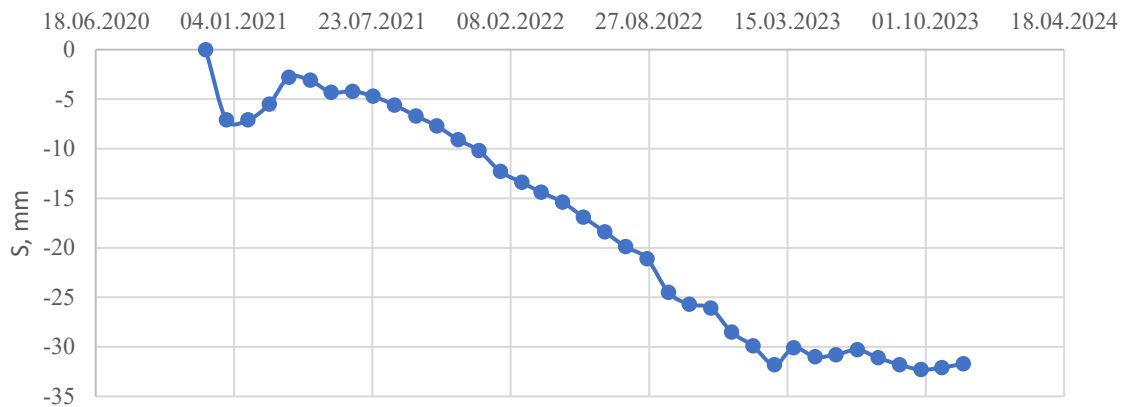


Рис. 9 – Осадка фундаментов, полученная по результатам натуральных наблюдений
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 9 – Foundation settlement obtained from field observations
Image by the author of the article

По результатам экспериментальных наблюдений за осадкой фундаментов в первый зимний период были зафиксированы деформации морозного пучения величиной до 5мм, ввиду малой нагрузки на сваи в начальный период строительства. При дальнейшем загрузении основания происходит практически линейное увеличение осадки фундамента до момента снижения температуры грунтов ниже расчетных значений и формирования цельного мерзлого массива под всем сооружением, на конец третьего зимнего периода термостабилизации.

На основании результатов проведенных полевых исследований и численного моделирования температурного режима грунтов были сделаны основные выводы, в которых, в том числе, сформированы задачи для дальнейшей научно-исследовательской работы в данном направлении.

4 Conclusions

Комплексный анализ результатов полевых и численных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Выявлены закономерности промерзания грунтового основания при применении систем термостабилизации при большой мощности талой прослойки в многолетнемерзлых грунтах неселивающегося типа. Промерзание с групповым расположением СОУ у ростверков приводит к образованию в начальный период времени отдельных мерзлых зон грунта. Формирование данных зон может занимать достаточно длительный период времени (2–3 зимних сезона) с дальнейшим сmerzанием в единый мерзлый массив.

2. Отдельные кусты свайного фундамента, не вмороженные в единый массив грунта, будут взаимодействовать с окружающим грунтом (в первые 2 сезона охлаждения - талым, либо охлажденным) независимо друг от друга, причем деформации разных кустов свай будут зависеть от размеров и температурного режима сформированного вокруг свай мерзлого массива.

3. С учетом выявленных закономерностей формирования мерзлого массива грунта при термостабилизации, требуется дальнейшее изучение НДС промерзающего грунтового основания с пониженной кровлей многолетнемерзлых грунтов неселивающегося типа.

4. Необходимо учесть возможное проявление негативных процессов объемного пучения при промерзании грунтового основания, а также проявление свойства ползучести мерзлых грунтов в процессе термостабилизации.

5 Fundings

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23–29–00118, <https://rscf.ru/project/23-29-00118>

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00118, <https://rscf.ru/project/23-29-00118>

References

Kraev, A.; Maltseva, T.; Huang, J.
 Thermal stabilization of the base from thawed permafrost viscoelastic soils;
 2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11307. doi: 10.4123/CUBS.113.7



1. Roshydromet. (2023) Report on the climate features in the territory of the Russian Federation. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2022_s_podpisiyu_compressed_with_cover.pdf
2. R.K. Pachauri and L.A. Meyer (2014) Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. - IPCC, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf
3. Utkin, V.S., Kosheleva, Zh.V., Yarygina, O.V. (2024). Buckling analysis of piles in solid frozen soils. *Magazine of Civil Engineering*, **17(1)**, 12510. <https://doi.org/10.34910/MCE.125.10>
4. Boyarintsev, A.V. (2019). Representational analysis of the experience of building foundations on frozen soils. Bulletin of PNRPU. *Construction and Architecture*, **10(1)**, 57-68. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.06>
5. Plotnikov, A.A., Merzlyakov, V.P. (2021). Increasing the Bearing Capacity and Durability of Building Foundations on Frozen Soils. *Soil Mech Found Eng*, **58**, 71–77. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09708-0>
6. Lavrik, A., Buslaev, G., and Dvoynikov, M. (2023). Thermal Stabilization of Permafrost Using Thermal Coils Inside Foundation Piles. *Civil Engineering Journal*, **9(4)**, 927-938. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-04-013>
7. Ishkov, A. A. and Anikin, G. V. (2020). Determination of the optimal laying step between evaporator pipes and the number of condenser units of the GET soil temperature stabilization system. *Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*, **6(1)**, 100–117. https://vestnik.utm.ru/upload/iblock/037/100_117.pdf
8. Presnov, O. M., Eliseeva, A. P., Soldatov, I. Yu., and Popkov, I. D. (2023). Modern methods of cooling permafrost soil foundations of multi-story residential buildings. Eurasian Space: Economy, Law, Society, **(1)**, 23–24. <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-ohlazhdeniya-mnogoletnemerzlyh-gruntovyh-osnovaniy-mnogoetazhnyh-zhilyh-zdaniy/viewer>
9. Gorelik, Ya. B. and Gorelik, R. Ya. (2011). Laboratory study of the operation of a two-phase natural-convective cooling device with a horizontal evaporative part. *Earth's Cryosphere*, **15(2)**, 34–43. https://earthcryosphere.ru/archive/2011_2/05.Gorelik_2_2011.pdf
10. Anikin, G. V. and Spasennikova, K. A. (2014). On the choice of a refrigerant for seasonal cooling devices of the “GET” type. *Earth's Cryosphere*, **18(2)**, 31–33. https://earthcryosphere.ru/archive/2014_2/03.Anikin_2_2014.pdf
11. Dolgikh, G. M., Anikin, G. V., Rilo, I. P., and Spasennikova, K. A. (2015). Statistical modeling of the operation of the “GET” system installed at the base of an oil reservoir. *Earth's Cryosphere*, **19(1)**, 70–77. https://earthcryosphere.ru/archive/2015_1/07.Dolgich_1_2015.pdf
12. Dolgikh, G. M., Okunev, S. N., Anikin, G. V., and Spasennikova, K. A. (2014). Comparison of experimental data and numerical modeling of the “GET” cooling system operation using the Vankor field fire station as an example. *Earth Cryosphere*, **18(1)**, 65–69. https://earthcryosphere.ru/archive/2014_1/08.Dolgich_1_2014.pdf
13. Dolgikh, G. M. and Okunev, S. N. (2019). Study of the operation of a horizontal system of temperature stabilization of foundation soils of the pipe-in-pipe (PIP) type. *Oil Gas Exposition*, **5(72)**, 58–61. <https://www.npo-fsa.ru/issledovanie-raboty-gorizontalnnoy-sistemy-temperaturnoy-stabilizacii-gruntov-osnovaniy-tipa-truba-v?ysclid=m3lfyuiad9942081421>
14. Gorelik, Ya. B. and Seleznev, A. A. (2016). On the efficiency of finning vertical two-phase natural-convective cooling devices for construction on frozen soils. *Earth's Cryosphere*, **20(2)**, 78–89. https://earthcryosphere.ru/archive/2016_2/09.Gorelik_2_2016.pdf
15. Gorelik, Ya. B. and Khabitov, A. Kh. (2019). On the efficiency of using thermal stabilizers in construction on permafrost soils. *Bulletin of Tyumen State University. Series: Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*, **5(3)**, 25–46. https://vestnik.utm.ru/upload/iblock/a0a/025_046.pdf
16. Roman, L. T., Kotov, P. I. and Tsarapov, M. N. (2016). Modulus of deformation of frozen soils during compression tests. *Foundations, bases and soil mechanics*, **(5)**, 34-40. <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/791>
17. Roman, L. T. and Kotov, P. I. (2016). Determination of the viscosity of frozen soils using a ball stamp. *Earth's Cryosphere*, **20(4)**, 30–35. https://earthcryosphere.ru/archive/2013_4/04.Roman_4_2013.pdf



18. Roman, L. T. and Kotov, P. I. (2016). Viscosity of frozen and thawing soils. *Foundations, bases and Soil Mechanics*, (1), 30–35. <https://istina.msu.ru/publications/article/21119878/>
19. Alekseev, A. G. and Bezdolev, S. G. (2023). Evaluation of creep indices of plastically frozen soil based on laboratory and field tests. *Foundations, bases and soil mechanics*, (1), 16–24. <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/7268>
20. Kraev A.N., Maltseva T.V., Abdullayev A.A. (2023). Interaction of a sand cushion with a viscoelastic soil base. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 4 (109), 10916. <https://doi.org/10.4123/cubs.109.16>
21. Sharafutdinov, R.F. (2023). Validation metrics for non-linear soil models using laboratory and in-situ tests. *Magazine of Civil Engineering*, 122(6), 12205. <https://doi.org/10.34910/MCE.122.5>
22. Al-Moadhen, M.M., Abdullah, M.M., Oleiwi, M.S. (2024). On the use of constrained modulus for soil settlement analysis. *Magazine of Civil Engineering*, 17(3), 12706. <https://doi.org/10.34910/MCE.127.6>
23. Maltseva, T.V., Nabokov, A.V. and Vatin, N. (2024). Consolidation of water-saturated viscoelastic subgrade. *Magazine of Civil Engineering*, 17(1). <https://cyberleninka.ru/article/n/consolidation-of-water-saturated-viscoelastic-subgrade/viewer>
24. Gladkov, A. E., Maltseva, T. V. and Isakova, N. P. (2023). Method for determining the mechanical characteristics of viscoelastic soils. *Architecture, Construction, Transport*, 4(106), 26–33. <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-mehanicheskikh-harakteristik-vyazkouprugih-gruntov/viewer>
25. Koreshkova, E. V., Shusharin, A. A. and Khasanov, N. M. (2024). Analytical determination of the relaxation function of viscoelastic frozen soil based on experimental data. *Architecture, Construction, Transport*, 3 (109), 36–43. <https://ast.tyuiu.ru/index.php/act/article/view/218/177>
26. Gruzin, A.V. (2024). Soil information model for prediction the soil properties characteristics. *Magazine of Civil Engineering*, 17(5), 12909. <https://doi.org/10.34910/MCE.129.9>
27. Vasenin, A., Sabri, M.M. (2024). Compressible soil thickness and settlement prediction using elastoviscoplastic models: a comprehensive method. *Magazine of Civil Engineering*, 17(4), 12803. <https://doi.org/10.34910/MCE.128.3>
28. Sakharov, I.I., Paramonov, V.N., Paramonov, M.V. and Igoshin, M.E. (2017). Deformations of frost heaving and thawing of soils during operation and damage of seasonal cooling devices. *Industrial and civil engineering*, 12, 23–30. https://elibrary.ru/download/elibrary_32278886_83959634.pdf
29. Ibragimov, E.V., Kronik, Ya.A., Paramonov, V.N. (2018). Forecast of the stress-strain state of a thermally stabilized foundation. *Foundations, Foundations and Soil Mechanics*, 6, 36–40. https://elibrary.ru/download/elibrary_36956376_27779672.pdf
30. Alekseev, A.G. (2020). Deformation of foundations during freezing of heaving soils in the base. *Industrial and civil engineering*, 8, 54–59. https://elibrary.ru/download/elibrary_43963240_90458047.pdf
31. Alekseev, A.G. (2020). Stress-strain state of heaving soil during freezing. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*, 4(291), 72–77. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43977093>
32. Zhang, Ming-yi et al. (2023). Field investigation on the spatiotemporal thermal-deformation characteristics of a composite embankment with two-phase closed thermosyphons on a permafrost slope. *Acta Geotechnica*, 18, 5427-5439. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-023-01878-5>
33. Kukkapalli, V.K., Kim, JH. & Kim, S. (2021) Optimum design of thermosyphon evaporators for roadway embankment stabilization in the arctic regions. *J Mech Sci Technol*, 35, 4757–4764. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0941-1>
34. Liu J., Camacho Botello J. C., Teng J., Deng L. (2023) Use of screw pile foundations to reduce temperature of warming permafrost: Lab tests and numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120263>
35. Huang, R.L., Changb, M.S., Tsaic, Y.S., Lud, S., & Wue, P.K. (2013). Influence of seepage flow on temperature field around an artificial frozen soil through model testing and numerical simulations. http://dx.doi.org/10.3850/978-981-07-4948-4_039
36. Wang, B., Rong, C., Cheng, H., Cai, H., & Zhang, S. (2020). Analytical Solution of Steady-State Temperature Field of Single Freezing Pipe under Action of Seepage Field. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2020/5902184>