

УДК 692

Марков Максим Дмитриевич, магистрант, Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-
Петербург

**РАСЧЕТ ОСАДКИ ЗДАНИЯ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ШАХТНЫХ ВОД В Г. НЕРЮНГРИ С УЧЕТОМ СЕЗОННОГО
ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ
ГРУНТОВ**

Аннотация. В статье рассматривается расчет деформаций основания здания очистных сооружений шахтных вод на многолетнемерзлых грунтах в г. Нерюнгри с учетом их сезонного промерзания и оттаивания. Расчет осадки здания был выполнен на основании результатов численного моделирования температурной задачи по расчету чаши оттаивания мерзлых грунтов в ПК Plaxis 2D. В работе представлены результаты сравнения полученных результатов в ходе расчета осадки фундаментов здания и результатов натурных наблюдений за их деформациями на объекте. Изложен метод расчета осадок здания на многолетнемерзлых грунтах. Исходные данные были приняты согласно материалам по инженерным изысканиям и данным по климатологии г. Нерюнгри за последние 10 лет.

Ключевые слова: геотехника, механика мерзлых грунтов, чаша оттаивания, вечная мерзлота, Plaxis 2D, осадка мерзлых грунтов.

Annotation. The article considers the calculation of deformations of the foundation of the mine water treatment plant building on permafrost soils in Neryungri, taking into account their seasonal freezing and thawing. The calculation of the building settlement was performed based on the results of numerical modeling of the temperature problem for calculating the thawing bowl of frozen soils in the Plaxis 2D PC. The paper presents the results of comparing the results obtained during the calculation of the settlement of the building

foundations and the results of in-kind observations of their deformations at the site. A method for calculating the settlement of the building on permafrost soils is presented. The initial data were adopted according to the materials on engineering surveys and data on the climatology of Neryungri over the past 10 years.

Keywords: geotechnics, frozen soil mechanics, thawing area, permafrost, Plaxis 2D, deformations of thawing soils.

Введение

Проектирование зданий на мерзлых грунтах требует особого внимания к специфическим условиям, связанным с изменениями температуры и свойствами грунта. Первый принцип проектирования заключается в необходимости учета термоклиматических факторов, что включает в себя анализ температурных колебаний и их влияние на мерзлотные условия, чтобы избежать деформаций и разрушений. Второй принцип связан с выбором подходящих конструктивных решений, таких как использование свайных фундаментов или специальных теплоизоляционных материалов, которые помогают предотвратить промерзание грунта под зданием и обеспечивают его стабильность. Эти принципы являются ключевыми для обеспечения долговечности и безопасности зданий в условиях мерзлых грунтов.

Исходные данные

Здание очистных сооружений шахтных вод – одноэтажное каркасное промышленное здание, сложной формы, с габаритами в плане 36,6×78 м и максимальной высотой 14,1 м. Конструктивная схема здания представлена рамно-связевым металлическим каркасом.

В геокриологическом отношении участок расположения здания находится в зоне островного развития многолетнемерзлых пород и сложен вечномерзлыми грунтами.

На период изысканий грунты до глубины 3,5-4,2 м находились в сезонно-талом, ниже – в мерзлом состоянии, массивной и корковой криогенной текстуры, при оттаивании от малой степени водонасыщения до водонасыщенных.

Температура горных пород близка к 0°С, что свидетельствует о возможности взаимоперехода из мерзлого состояния в талое и наоборот при незначительных изменениях теплообмена на поверхности. Нормативная глубина сезонного промерзания составляет (в среднем) 4,33 м.

Так как участок строительства находится в зоне многолетнемерзлых грунтов, изменение природных условий при хозяйственном освоении приводит: к изменению глубин оттаивания – промерзания, среднегодовой температуры пород, активизации криогенных геологических процессов и явлений, осадкам грунтов - оснований инженерных сооружений.

В основании здания залегают насыпные щебенистые грунты и низкопрочные скальные грунты – песчаники.

Физико-механические свойства залегающих дисперсных и скальных грунтов, а также характер их напластования представлены в таблице 1 и на рисунке 1 соответственно. На рисунке 2 представлен план расположения скважин.

В ходе инженерно-геологических изысканий также были выполнены исследования температуры грунтов площадки строительства. Данные

представлены в виде графиков распределения температур по глубине на рисунке 3.

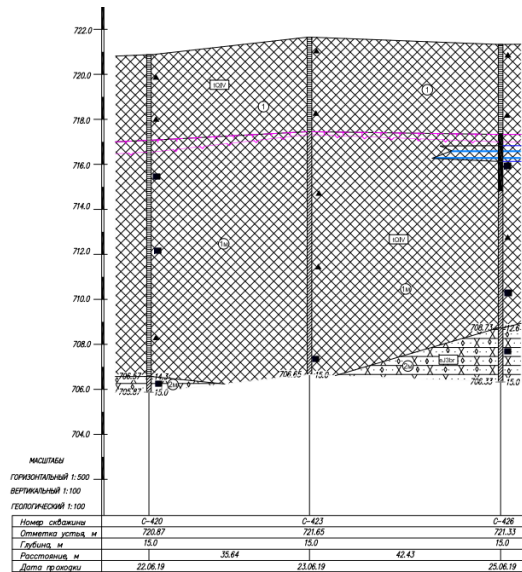


Рисунок 1 – Характерный инженерно-геологический разрез

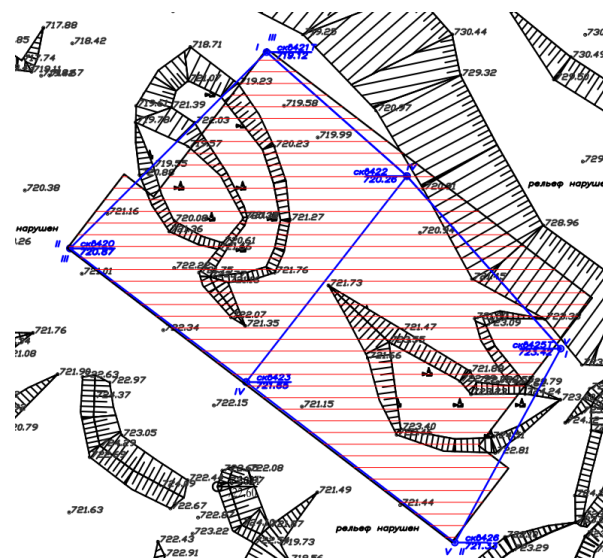


Рисунок 2– План здания со скважинами и разрезами

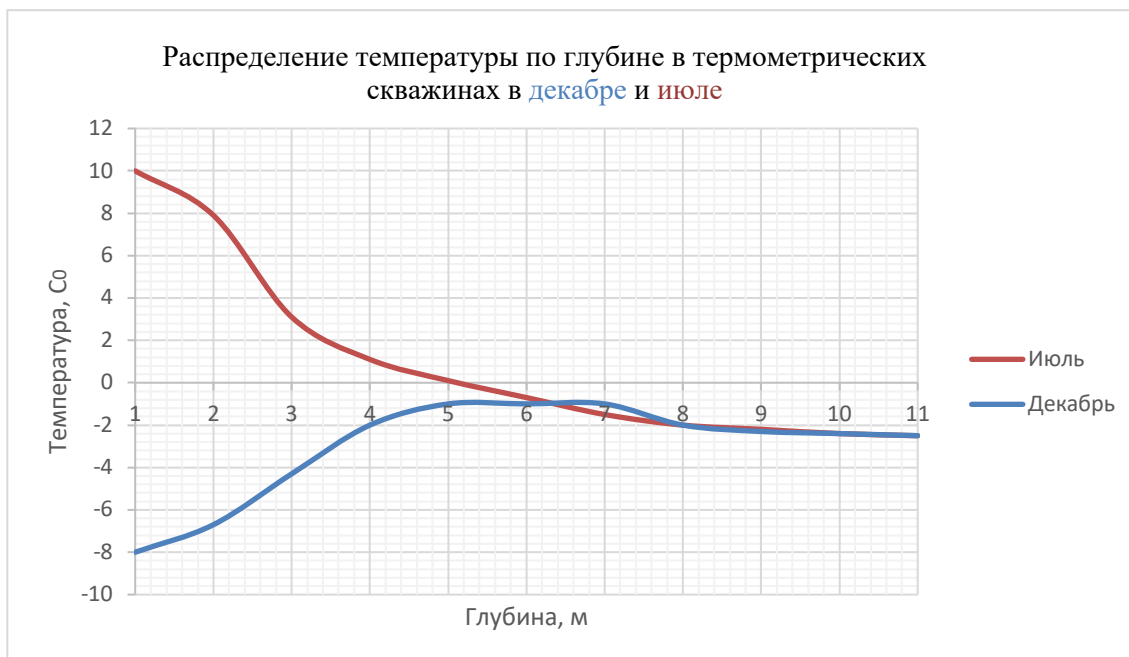


Рисунок 3– Распределение температуры по глубине в термометрических скважинах

Таблица 1 – Нормативные и расчетные характеристики дисперсных грунтов

№ ИГЭ (слой)	Номенклатура грунта	Нормативные и расчетные характеристики													R ₀ , кПа	
		w %	J _p %	J _L	e	E Мпа	ρ г/см ³	c _n кПа	φ _n град	α = 0,95			α = 0,85			
										ρ _n г/см ³	c _n кПа	φ _n град	ρ _n г/см ³	c _n кПа		φ _n град
		Влажность	Число пластичности	Консистенция	Коэффициент пористости	Модуль деформации	Плотность грунта	Удельное сцепление	Угол внутреннего трения	Плотность грунта	Удельное сцепление	Угол внутреннего трения	Плотность грунта	Удельное сцепление	Угол внутреннего трения	Расчетные сопротивления грунтов оснований
1	Насыпной щебенистый грунт незасоленный, талый, малой степени водонасыщения	6			0,42	29,01	2,04	27,9	21	1,99	25	19	2,01	28	21	250
1м	Насыпной щебенистый грунт незасоленный, твердомерзлый, слабодистый, при оттаивании средней степени водонасыщения	7	4		0,33	42,1	2,16	28,2	16,5	2,11	25	15	2,13	28	16	250
2м	Песчаник очень низкой прочности (дресвяный грунт с песчаным заполнителем), твердомерзлый, слабодистый, при оттаивании средней степени водонасыщения	9	4		0,43	29,04	2,06	58	29	2,02	53	26	2,04	58	29	400

Основные положения расчета

Для расчета чаши оттаивания основания здания очистных сооружений шахтных вод была создана двухмерная расчетная конечно-элементная модель размерами 86 x 20 м (по осям x и y соответственно), показанная на рисунке 4.

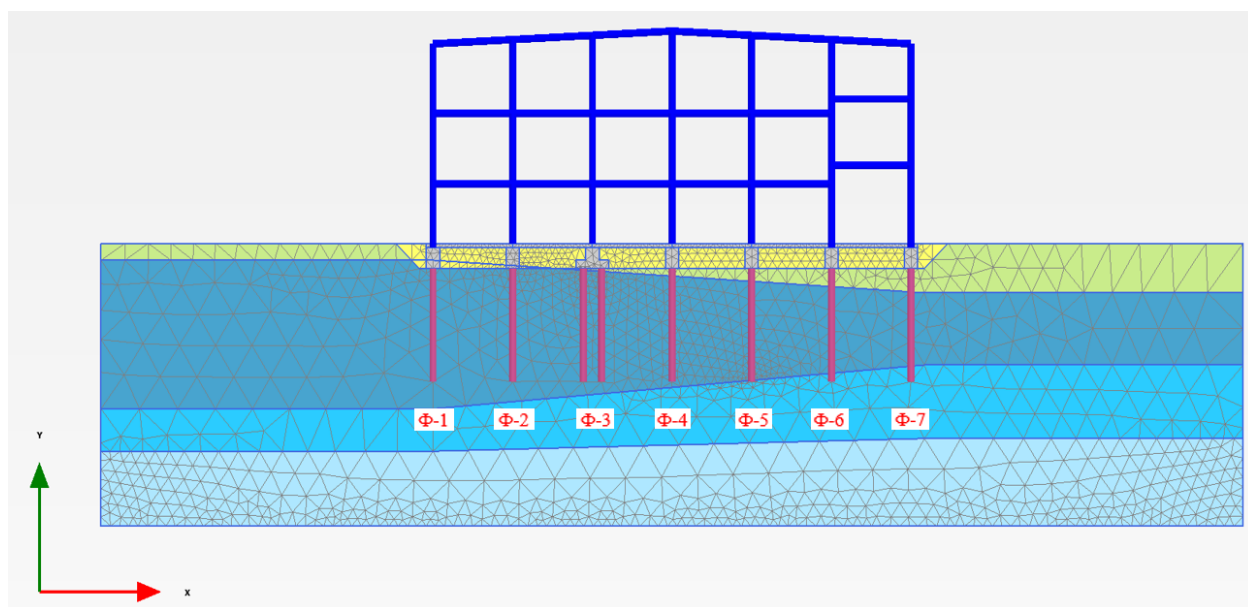


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель здания очистных сооружений шахтных вод

Расчет производился исходя из условия, что начальные значения температур грунтового массива, а в частности многолетнемерзлых грунтов, будут меняться с течением времени в следствии изменения теплообмена на поверхности. Изменение теплообмена на поверхности – следствие эксплуатации отапливаемого здания очистных сооружений шахтных вод.

Нестационарный расчет поможет проанализировать характер изменения температур мерзлого грунта, увидеть степень его оттаивания и оценить влияние теплового режима здания на состояние грунтов в течении всего срока эксплуатации. Изменение температуры поверхности грунта было принято в соответствии с данными ИГИ и на основании климатических данных о климате и погоде (представлено на рисунке 6).

При моделировании данной задачи были использованы граничные условия 1-го рода, представленные на рисунке 5. Граничные условия принимались и корректировались на основании данных инженерно-геологических изысканий.

В связи с отсутствием данных инженерных изысканий по глубине, для построения расчетной модели принимались последние слои из расчетных разрезов.

Расчет велся в 3 этапа:

1. Начальная фаза – формирование граничных условий температурного режима на момент начала строительства.
2. Строительство здания – изменение граничных условий температурного режима вследствие возведения здания.
3. Эксплуатация – расчет влияния температурного режима здания и сезонного оттаивания-промораживания ММГ на состояние мерзлых грунтов до состояния стабилизации.

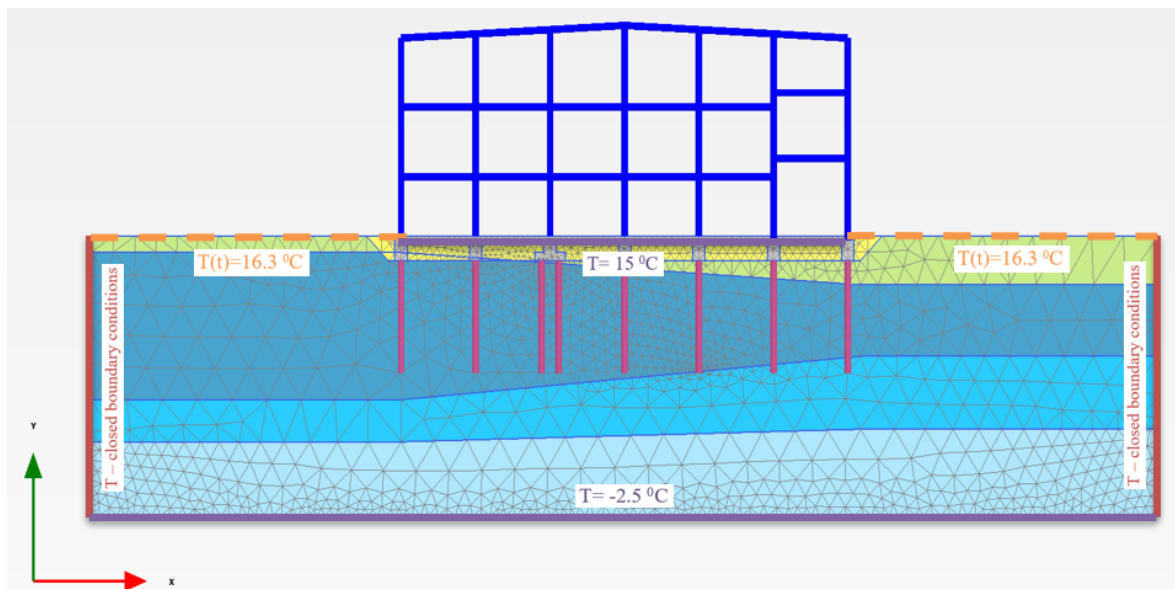


Рисунок 5 – Граничные условия температурного поля расчетной схемы

Для данного расчета необходимо пересчитать значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности из нормативных,

определяемых в соответствии с СП в значения сплошного материала твердой компоненты грунта, воспользовавшись теоретическими формулами и физическими свойствами грунта:

$$C_p = (1 - n)\rho_s C_s + nS\rho_w \left[C_w + L_0 \frac{df_u}{dT} \right] + n(1 - S)\rho_v C_v \quad - \quad \text{удельная}$$

теплоемкость грунта;

$$C_s = \frac{C_p - nS\rho_w \left[C_w + L_0 \frac{df_u}{dT} \right] - n(1 - S)\rho_v C_v}{(1 - n)\rho_s} \quad - \quad \text{удельная теплоемкость частиц}$$

грунта;

$$\lambda_{th} = (1 - n)\lambda_s + nS[w_u \lambda_w + (1 - w_u)\lambda_i] + (1 - n)\lambda_v \quad - \quad \text{к-т}$$

теплопроводности грунта;

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{th} - nS[w_u \lambda_w + (1 - w_u)\lambda_i] + (1 - n)\lambda_v}{1 - n} \quad - \quad \text{к-т теплопроводности частиц}$$

грунта.

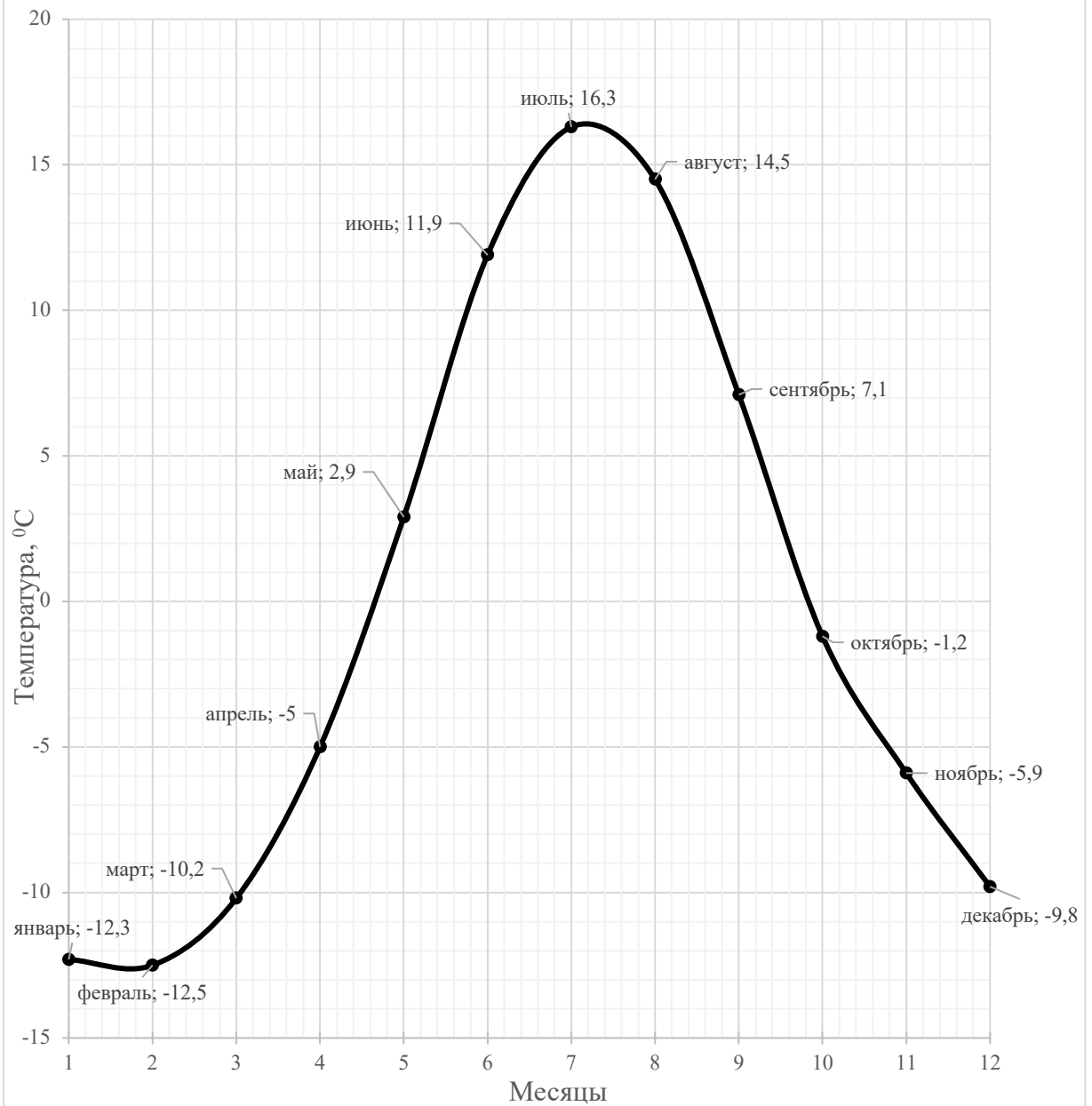
В таблице 2 представлены результаты расчета удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности для твердой компоненты грунта.

Таблица 2

№ ИГЭ	Описание	λ_s	c_s
1	Насыпной щебенистый грунт незасоленный, талый, малой степени водонасыщения	0,0018771	1540,37
1м	Насыпной щебенистый грунт незасоленный, твердомерзлый, слабльдистый, при оттаивании средней степени водонасыщения	0,0024108	1689,22

2м	Песчаник очень низкой прочности (дресвяный грунт с песчаным заполнителем), твердомерзлый, слабльдистый, при оттаивании средней степени водонасыщения	0,0027125	2021,06
X	Песок обратной засыпки	0,0028448	1621,53

График годового изменения температуры поверхности земли г.Нерюнгри



***Рисунок 6 – График годового изменения температуры поверхности
земли г. Нерюнгри***

Расчет деформаций основания выполнен с учетом нагрузок нормальной эксплуатации. Для расчета по деформациям были приняты нормативные значения нагрузок на фундаменты согласно исходным данным.

Результаты расчета чаши оттаивания

Расчет начальных температурных условий проводился на основании данных по термометрическим изысканиям в скважинах. Белой линией на картинках является граница мерзлого-талого грунта со значением температуры 0°C . На рисунка 7-12 представлены изополя распределения температур в грунтовом массиве с течением времени.

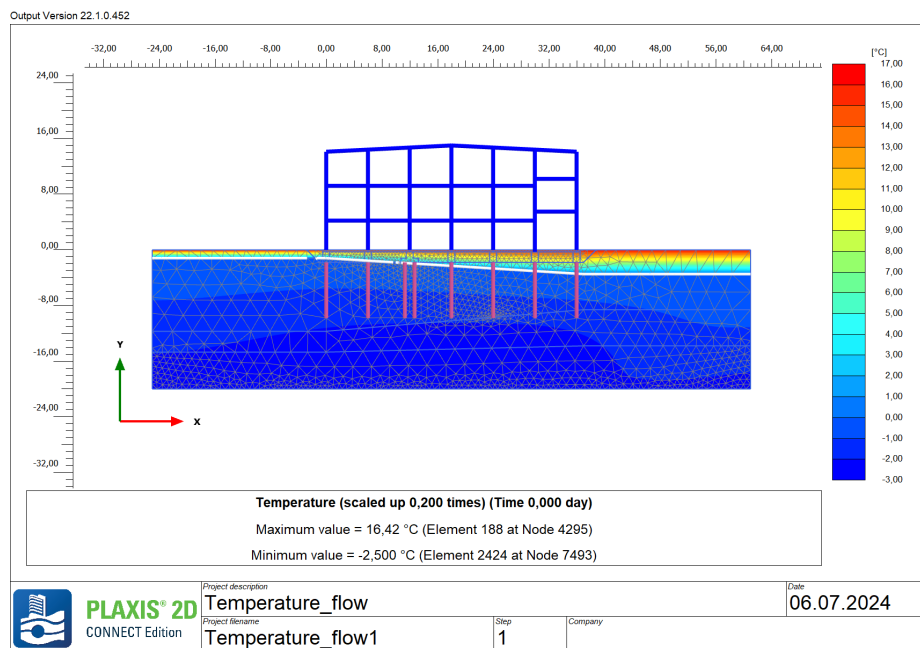


Рисунок 7 – Температура грунтового массива на момент начала строительства

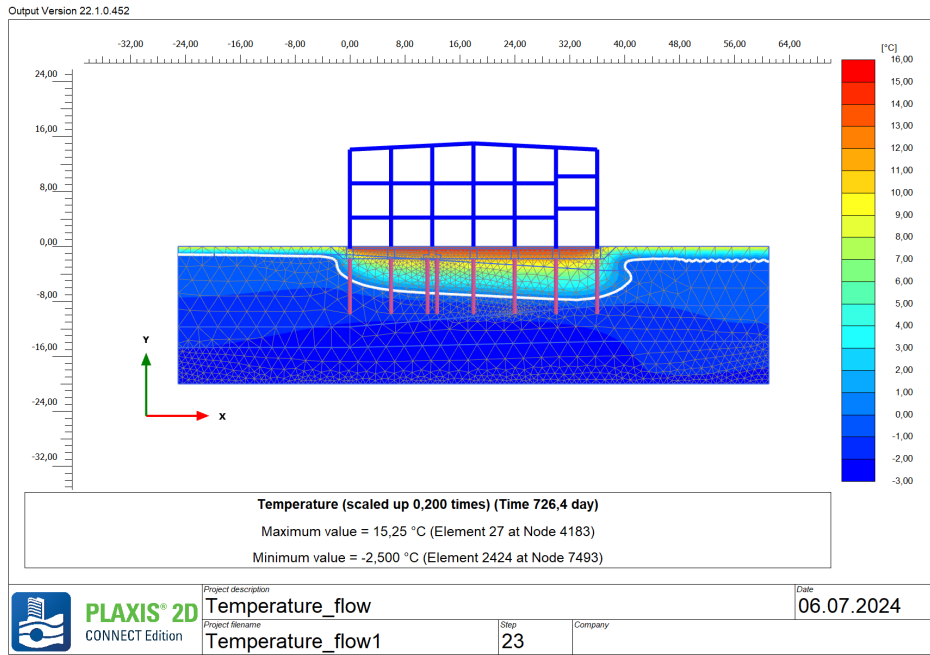


Рисунок 8 – Температура грунтового массива спустя 2 года эксплуатации

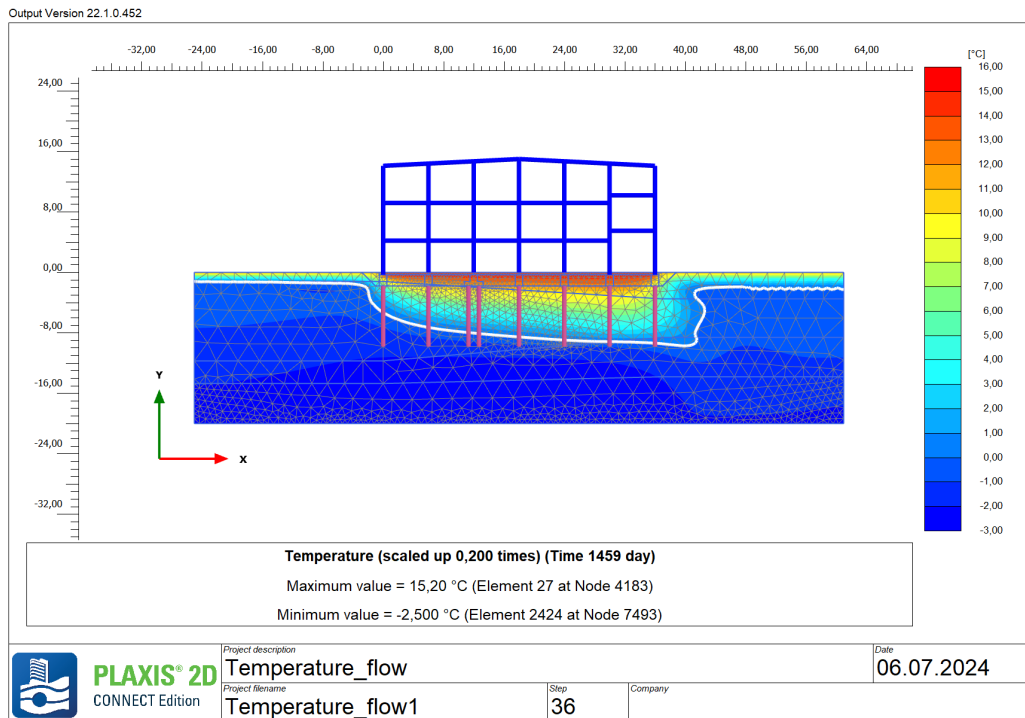


Рисунок 9 – Температура грунтового массива спустя 4 года эксплуатации

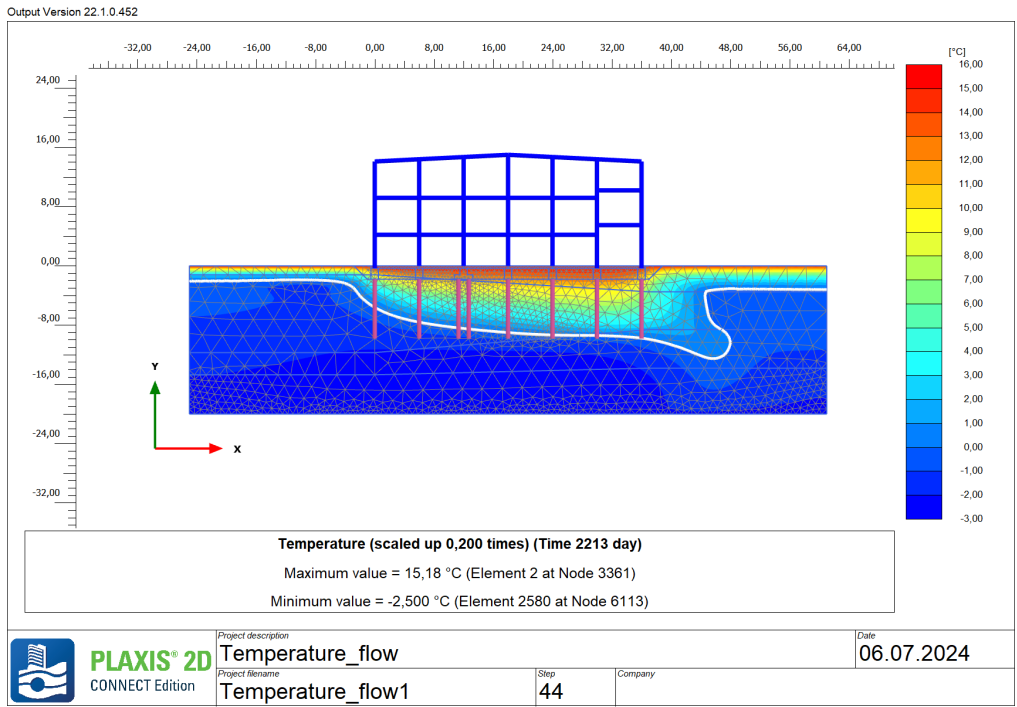


Рисунок 10 – Температура грунтового массива спустя 6 лет эксплуатации

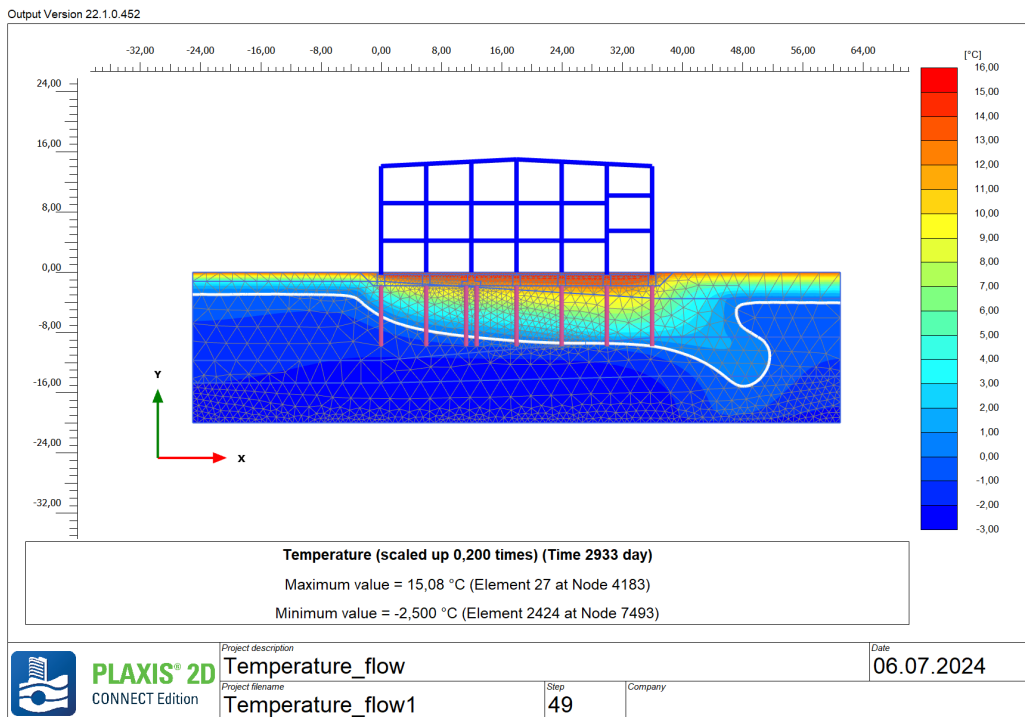


Рисунок 11 – Температура грунтового массива спустя 8 лет эксплуатации

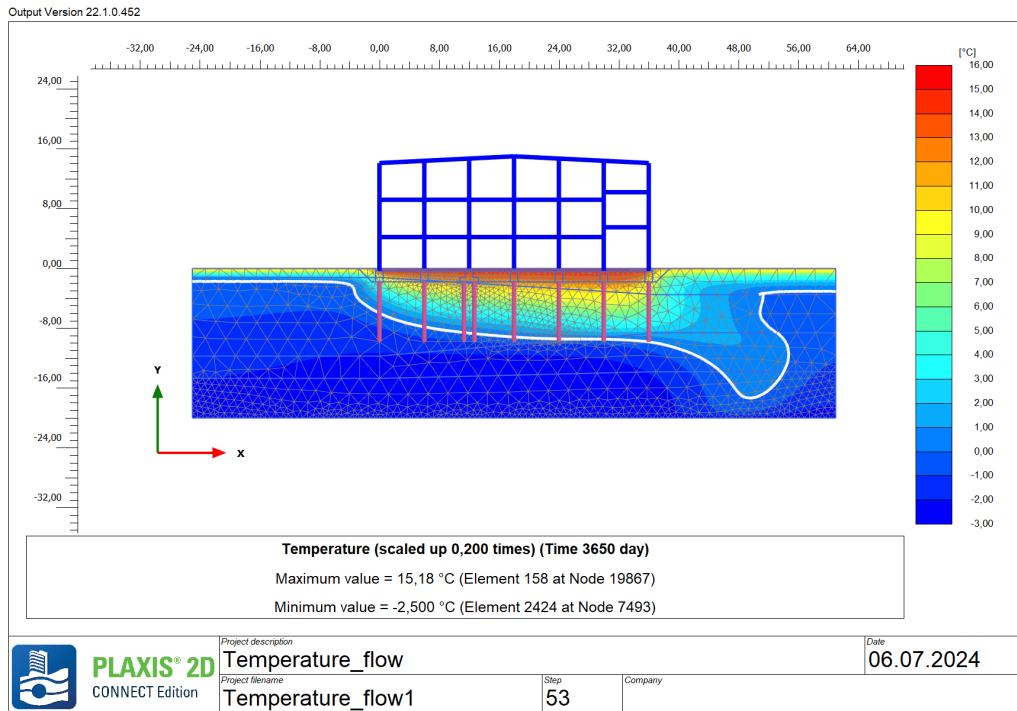


Рисунок 12 – Температура грунтового массива спустя 10 лет эксплуатации

Исходя из результатов расчета был получен график развития глубины оттаивания в данном расчетном сечении с течением времени (представлен на рисунке 13).

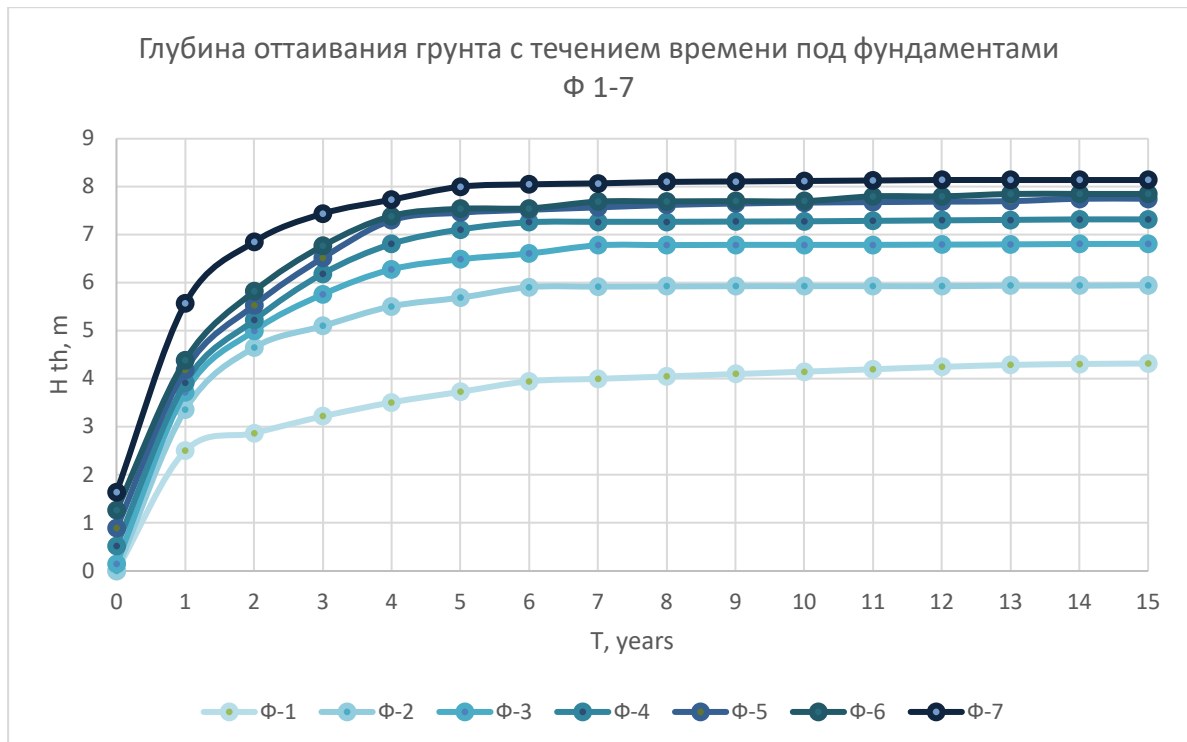


Рисунок 13 – График зависимости глубины оттаивания под фундаментами от времени

Согласно полученным результатам максимальная глубина оттаивания мерзлого грунта от поверхности земли составляет 9,8 м. Можно сделать вывод, что стабилизация температурного режима массива грунта под зданием произойдет примерно через 6 лет после начала строительства. Следовательно, развитие осадок фундаментов будет происходить именно в этот период эксплуатации здания.

Результат расчета осадки фундаментов здания

Осадка оттаивающего грунта в процессе эксплуатации сооружения основания была рассчитана на основании результатов расчета в предыдущем пункте, по методике, приведенной в п.7.3.6 СП 25.13330.2020 по формуле:

$$s = s_{th} + s_p,$$

где s_{th} - составляющая осадки фундамента, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта;

s_p - составляющая осадки основания, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения.

$$s_{th} = \sum_{i=1}^n (A_{th,i} + m_{th,i} \sigma_{zg,i}) h_i,$$

где n – число выделенных при расчете слоев грунта;

$A_{th,i}$ и $m_{th,i}$ – коэффициенты оттаивания и сжимаемости соответственно, принимаемые по экспериментальным данным;

$\sigma_{zg,i}$ - вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя, кПа;

h_i - толщина i -го слоя оттаивающего грунта, м.

$$s_p = p_0 b k_h \sum_{i=1}^n m_{th,i} k_{\mu,i} (k_i - k_{i-1}),$$

где p_0 - дополнительное вертикальное давление на основание под подошвой фундамента, кПа;

b - ширина подошвы фундамента, м;

k_h - коэффициент, определяемый в зависимости от отношения z/b , где z - расстояние от подошвы фундамента до нижней границы зоны оттаивания или кровли непросадочного при оттаивании грунта;

k_i и k_{i-1} - коэффициенты, определяемые в зависимости от отношений a/b , z_i/b , z_{i-1}/b , где z_i и z_{i-1} – расстояние от подошвы фундамента соответственно до подошвы и кровли i -го слоя грунта, м.

Согласно результатам расчета осадок фундаментов здания очистных сооружений максимальная осадка фундамента на момент стабилизации температурного режима грунтов в расчетном сечении составила $S_u = 0,94$ м. Максимальная разность осадок составляет $\frac{\Delta S}{L} = 0,041$.

Ниже представлено сопоставление расчетных значений осадок и разности осадок с нормативными значениями согласно:

$$S_u = 0,94 \text{ м} \geq S_{u \text{ max}} = 0,15 \text{ м}$$

Расчетное значение осадки превышает предельно допустимое.

$$\frac{\Delta S}{L} = 0,041 \text{ м} \geq \frac{\Delta S}{L} = 0,004$$

Расчетное значение разности осадок превышает предельно допустимое.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что использование многолетнемерзлых грунтов основания по II принципу в оттаянном или оттаивающем состоянии при возведении данного сооружения использовать нельзя, так это приводит к сверхнормативным значениям осадок и их неравномерности.

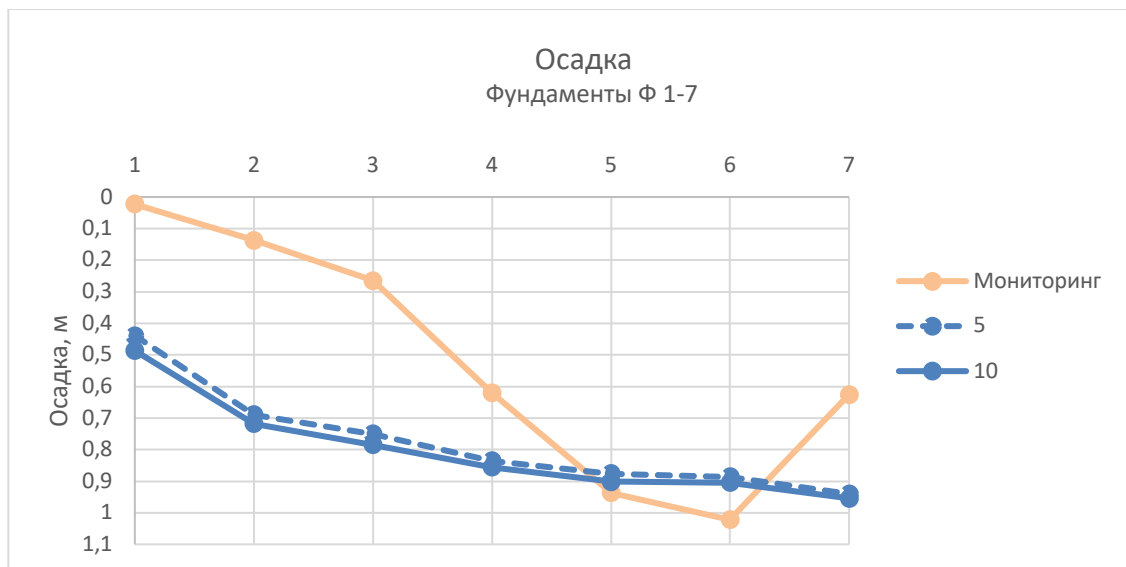


Рисунок 14 – Сопоставление осадок полученных численно спустя 5 и 10 лет с начала эксплуатации, с результатами мониторинга

На рисунке 14 можно наблюдать хорошую сходимость максимальных значений осадок с данными мониторинга, но характер деформаций основания в данном расчетном сечении сильно отличается. Фундаменты Ф1, Ф2, Ф3, Ф4, Ф7 показали сходимость результатов в среднем до 40 %.

Необходимо отметить, что для уже построенного сооружения были применены мероприятия для предотвращения дальнейших деформаций основания: использованы устройства систем термостабилизации грунтов для сохранения их мерзлого состояния – СОУ; цементация грунтов основания с целью повышения его несущей способности. Также, было замечено нарушение нормальной эксплуатации: утечка производственных вод под фундаменты. Все эти факторы оказали огромное влияние на развитие деформаций основания, и именно они, а также неравномерность свойств грунтов и недостаточный объем работ по изысканиям, являются причиной несхождения результатов численного моделирования и мониторинга.

Заключение

Согласно результатам численного нестационарного расчета максимальная глубина оттаивания мерзлого грунта на срок эксплуатации до момента стабилизации температурного состояния грунтового массива составила – 8 м от подошвы фундамента, а соответствующая ей максимальная осадка – 0,94 м. Были сопоставлены результаты численного расчета с результатами натурных наблюдений за осадками сооружения. Сходимость результатов по максимальным значениям составила порядка 90 %.

В результате расчета было установлено, что использование многолетнемерзлых грунтов основания в оттаянном или оттаивающем состоянии (принцип II) не допускается из-за больших осадок, сопровождающих оттаивание грунтов.

При строительстве и эксплуатации данного здания явно нарушились естественные условия теплообмена на поверхности и в грунте. Изменение геокриологических условий, развитие термоэрозионных процессов и термокарста привело к ненормативным значениям осадок здания, а также к их неравномерности. Причиной этого является образование дополнительных пор при оттаивании воды в массиве грунта и дальнейшего его уплотнение под действием собственного веса почвы и нагрузки от сооружения. Согласно исходным данным можно сделать вывод, что ошибки, которые привели к неравномерным деформациям основания, были допущены на стадии проектирования. При расчете деформаций оснований не был учтен температурный режим здания, а мероприятий по сохранению состояния многолетнемерзлого грунта оказалось недостаточно.

Библиографический список

1. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов - Москва: URSS, Либрокон, 2009.-445 с.
2. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // С.46-59
3. Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Современный подход к температурным и деформационным расчетам оснований объектов криолитозоны// ГЕОТЕХНИКА. – 2022. – № 3. – С. 34–43.
4. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Усов Д.А. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна// Строительство и архитектура. – 2021. – № 3. – С. 104–111.
5. Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Промерзание и оттаивание грунтов – Санкт-Петербург, Институт строительного проектирования "Геореконструкция", 2014. – 248 с.