

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный
институт
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

подпись инициалы, фамилия

«_____» _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Теплотехнические аспекты подземных этажей и фундаментов в условиях
промерзания грунта
Тема

код и наименование направления

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель _____ С.С. Добросмыслов
подпись, дата, должность, ученая степень, инициалы, фамилия

Выпускник: _____ И. А. Сорокин
подпись, дата

Рецензент _____
подпись, дата, должность, ученая степень, инициалы, фамилия

Красноярск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Строительство фундаментов в условиях вечной мерзлоты	5
1.1 Климатические и геологические характеристика Крайнего Севера	5
1.1.1 Климатические условия	5
1.1.2 Мерзлотно-геологические условия	9
1.1.3 Эксплуатационные характеристики мерзлых грунтов	10
1.1.4. Эксплуатационные характеристики мерзлых грунтов	12
1.2 Виды фундаментов, используемые в условиях многолетнемерзлых грунтов	21
1.2.1 Основные положения проектирования оснований и фундаментов	21
1.2.2 Вентилируемые подполья с естественной или побудительной вентиляцией	27
1.2.3 Вентилируемые фундаменты, трубы и каналы	29
1.2.4 Характеристика фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов	36
1.3 Подземные здания и сооружения	39
Выводы	46
Глава 2 Постановка задачи и методы решения процесса растепления грунта в условиях вечной мерзлоты	47
Выводы	54
Глава 3 Исследование влияния свайного фундамента на растепления грунта	55
Выводы	68
Заключение	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71

Введение.

Значительная часть территории нашей страны находится в северных широтах с резко-континентальным холодным климатом. Зона Севера занимает около 70% территории России [1], однако проживает в ней всего 5% населения страны. Экономика России все больше зависит от развития северных территорий - основных поставщиков углеводородного сырья. Область вечной мерзлоты можно назвать стратегическим тылом России, топливно-энергетической базой и валютным цехом [2]. Здесь добывается 72% всей нефти и газового конденсата, 93% естественного газа, никелевые и железные руды, практически все алмазы; заготавливается 37% деловой древесины, производятся основная часть цветных, редких металлов, золота и многие другие важные виды продукции, обеспечивающие в совокупности до 60% экспорта страны [3]. В настоящее время основная часть новых месторождений нефти и газа разрабатывается на многолетней мерзлоте [4]. Многолетней (вечной) мерзлотой называют верхнюю часть земной коры, температура которой не поднимается выше 0 °С. В зоне многолетней мерзлоты грунтовые воды находятся в виде льда. Ее глубина иногда превышает тысячу метров [5]. Освоение месторождений в таких условиях приводит к значительному повышению капитальных затрат, связанных с необходимостью строительства новых зданий и сооружений, которые должны отвечать не только требованиям нормативной документации, но и комфортным условиям работы и проживания. Проектирование и эксплуатация объектов в местах распространения многолетнемерзлых грунтов является сложной инженерной задачей. В этом вопросе одной из наиболее значимых проблем является растепление грунта. Растепление - это процесс, при котором породе передано количество тепла, достаточное не только для ее нагрева от естественной отрицательной температуры до 0 °С, но и для перехода содержащегося в породе льда-цемента в жидкое состояние. При фазовом переходе подземного льда в воду поглощается тепло и существенно изменяются механические, физико-химические, теплофизические, электрические свойства водной компоненты и самого грунта. Вследствие этих изменений происходят перестройка структуры

грунта и резкое снижение прочностных и деформационных характеристик [6]. В результате растепления грунта под зданием образуется, так называемая, чаша оттаивания. Грунт при этом теряет свою монолитность, начинается неравномерная осадка здания, происходит деформация фундаментов, несущих и ограждающих конструкций. Итог - полное или частичное разрушение здания. В Красноярском крае проблема растепления грунта актуальна для таких северных городов как Дудинка, Норильск, Игарка. Для исследования был выбран г.Норильск - крупный центр цветной металлургии с населением 179 554 чел. Это самый северный город мира с численностью населения более 150 000 человек [7], что делает его уникальным городом за полярным кругом, для которого вопрос строительства и эксплуатации зданий особенно важен и актуален.

Цель данной диссертационной работы - Исследование процесса растепления грунта в процессе эксплуатации зданий на свайном фундаменте..

В рамках поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- 1) Исследовать изменение процесса теплообмена в грунте при использовании свайного фундамента в условиях вечной мерзлоты.
- 2) Исследовать влияние теплофизических характеристик грунта на теплообмен при использовании свайного фундамента;
- 3) Исследовать процесс растепления грунта в окрестностях свайного фундамента, определить конус растепления;
- 4) Исследовать зависимость несущей способности грунта от температуры наружного воздуха.

1 Строительство фундаментов в условиях вечной мерзлоты.

1.1 Климатические и геологические характеристика Крайнего Севера

1.1.1 Климатические условия

Северные районы характеризуются специфическими физико-географическими особенностями, игнорирование которых при проектировании приводит к деформациям и разрушению возведенных зданий.

Основным признаком, определяющим границы районов Крайнего Севера, является распространение многолетнемерзлых грунтов. По этому признаку в северную зону Российской Федерации входят Республика Саха (Якутия), Магаданская область, значительная часть Красноярского края, Иркутской, Камчатской и Тюменской областей, Хабаровского края и в меньшей мере – Архангельской, Амурской, Читинской областей и Бурят-Монгольской области. Площадь распространения многолетнемерзлых грунтов составляет около 60 % территории Российской Федерации.

Второй отличительной особенностью северной зоны является чередование периодов полярной ночи и полярного дня. По этому признаку к ней относятся также Мурманская область.



Рисунок 1 – Карта распространения многолетнемерзлых грунтов на территории Российской Федерации

Для районов Севера характерен климат с продолжительной зимой (до 10 и более месяцев), устойчивыми, достигающими 70 °С, морозами, которые

сопровожаются ветрами большой скорости (до 55 м/с), метелями, пургой и снегозаносами.

Климат на Севере в большой степени зависит от воздействия воздушных и морских течений. В прибрежных районах, где сказывается действие североатлантических течений, климат более мягкий, морской. В средней части материка климат имеет резко континентальный характер [8].

Среднегодовая температура воздуха над всей территорией, занятой многолетнемерзлыми грунтами, имеет отрицательное значение. Зимой наиболее низкая температура устанавливается в зоне «полюса холода» - в Верхоянской впадине и Оймяконской котловине, где скапливаются массы холодного воздуха, температура которого понижается иногда до $-70...-72$ °С. Средняя температура января в этих районах достигает -50 °С [9].

В западной части Арктики зимой наиболее часто наблюдается среднесуточная температура от 0 до -15 °С и достигает до -30 °С, в районах Чукотского моря от -15 до -35 °С. В центральном полярном бассейне абсолютный минимум температуры -44 °С. Оттепели в течение зимы наблюдаются редко, преимущественно в западном секторе Арктики. В центральных районах продолжительность периода с температурой ниже 0 °С составляет от 180 до 240 дней.

Летом температура воздуха распределяется в зависимости от широты: наиболее низкая температура устанавливается на арктическом побережье и наиболее высокая – у южных границ распространения многолетнемерзлых грунтов. Исключением являются побережья Берингова и Охотского морей, где летом удерживается низкая температура, чем на тех же широтах в континентальных районах. Южные районы распространения многолетнемерзлых грунтов характеризуются теплым сухим летом с наиболее часто повторяющейся среднесуточной температурой от 15 до 20 °С, иногда достигающей днем 30-35 °С.

На северном побережье Охотского моря в основном преобладает сырая прохладная погода со среднесуточной температурой 10-15 °С и ветрами муссонного характера. В центральном полярном бассейне на островах

температура воздуха летом колеблется около 0 °С и почти никогда не поднимается выше 10 °С. Наиболее сильные суточные колебания температуры отмечаются в центральных районах [10].

Период положительных среднемесячных температур на островах полярного бассейна равен 1,5 месяца, на арктическом побережье – 2-3 месяца, в континентальных районах – 4-4,5 месяца, на побережье Охотского моря – 5 месяцев [11].

За Полярным кругом в определенные периоды года устанавливаются полярный день и полярная ночь. Их продолжительность зависит от широты: она увеличивается по направлению к северу и в высоких широтах достигает 4-4,5 месяца. Различают так называемые «гражданские сумерки», когда солнце находится ниже горизонта не более чем на 7°, и «астрономические сумерки», когда солнце снижается над горизонтом более 7° и меньше 16°. Некоторые удлинения сумеречного времени в Арктике вызывает почти постоянная в этих районах низкая облачность, сильно понижающая видимость [12].

Из-за разнообразия природно-климатических условий в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, связанного с широким диапазоном изменения температур и влажности воздуха, ветровых воздействий, ландшафта и других факторов территорию залегания многолетнемерзлых грунтов подразделили на зоны по общим климатическим факторам (рис. 2). Отдельно для каждой зоны разрабатывается приемы планировки населенных пунктов, типологические требования к зданиям и сооружениям, нормативы и т.д.. В таблице 1 приводится физико-географическая характеристика подрайонов.

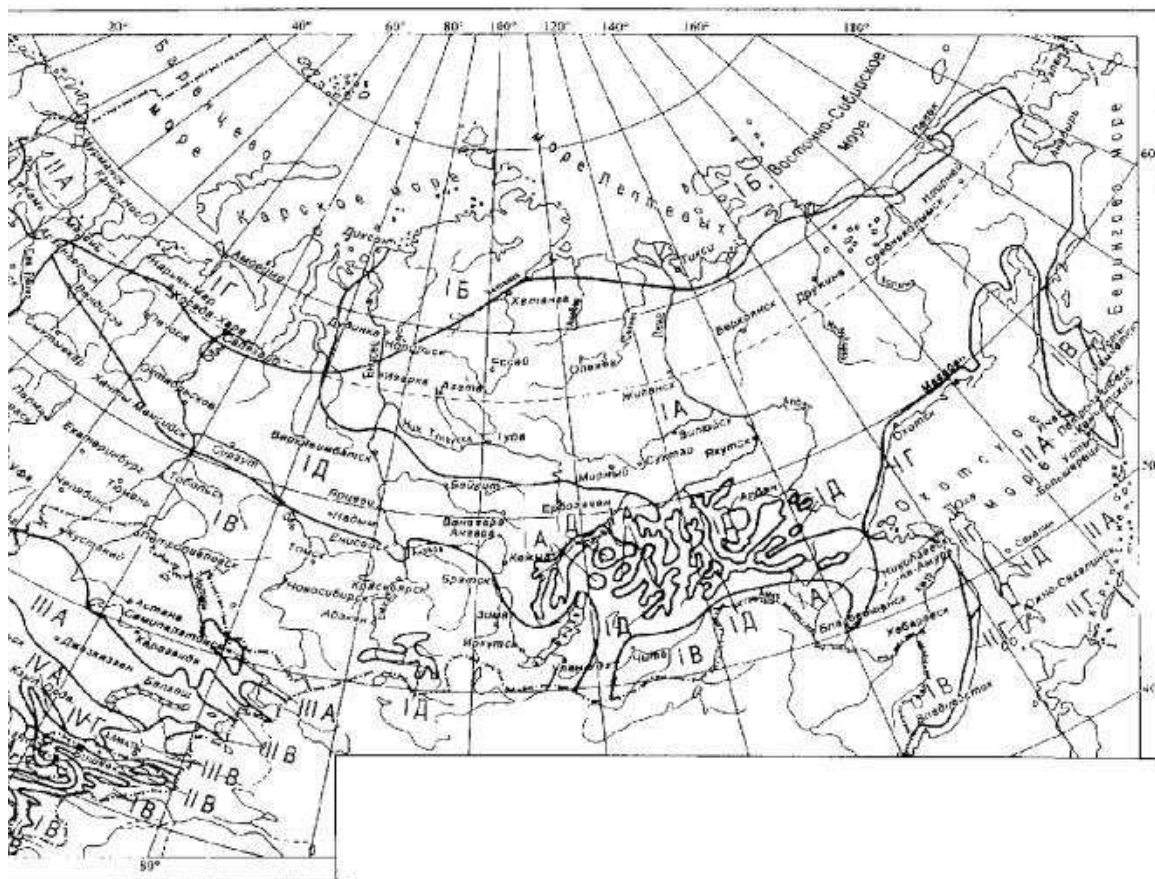


Рисунок – 2 Схематическая карта районирования территории Российской федерации для строительства

В соответствии с СП 131.13330.2012 северная климатическая зона была разделена на три подзоны:

- I – климатические подрайоны 1Б и 1Г;
- II – климатические подрайон 1А;
- III – климатический подрайон 1Д.

Таблица – 1 Физико-географическая характеристика климатических подрайонов первой климатической зоны

Климатический район	Среднемесячная температура, °С		Среднемесячная влажность, %	Средняя скорость ветра за три месяца, м/с
	в январе	в июле		
1А	< -32	4-19	-	-
1Б	от -28 до -32	0-13	более 75	5 и более
1В	от -14 до -28	12-21	-	-
1Г	от -14 до -28	0-14	более 75	5 и более
1Д	от -28 до -32	10-21	-	-

1.1.2 Мерзлотно-геологические условия

Одним из важнейших факторов, определяющих инженерно-геологические условия в северных и восточных районах России, является широкое распространение в них многолетнемерзлых грунтов.

Следует различать многолетнемерзлые и сезонномерзлые грунты. Сезонномерзлый грунт находится в мерзлом состоянии лишь периодически в течение холодного периода года. В мерзлом состоянии он имеет отрицательную температуру, содержит лед и характеризуется криогенными структурными связями. В теплое время грунт оттаивает. Это явление называется сезонным промерзанием.

Глубина сезонного промерзания грунтов зависит от климатических особенностей района, состава пород, мощности снегового покрова и от других факторов. Величина промерзания грунта колеблется от долей метра до 3—4 м [13].

Согласно ГОСТ 25100—95 к многолетнемерзлым относятся грунты, которые в условиях природного залегания находятся в мерзлом состоянии в течение трех лет и более. Зона развития многолетнемерзлых грунтов называется криолитозоной или зоной многолетней мерзлоты.

Зона многолетней мерзлоты занимает 64 % всей площади России и 25% суши земного шара. Кроме России многолетнемерзлые грунты распространены на Аляске, в Гренландии, на севере Кавказа, в высокогорных районах Центральной Азии и в других местах.

Многолетнемерзлые грунты в нашей стране подвержены отчетливо выраженной широтной зональности: 1) сплошное распространение на территории Крайнего Севера; 2) несплошное (прерывистое) распространение в районах южнее этой зоны, включая островное — в районах еще далее к югу, вплоть до границ с Монголией и Китаем. Температура многолетнемерзлых грунтов в этих зонах колеблется от 0 до -10°C.

Происхождение вечной мерзлоты связывают с оледенением Земли в четвертичный период. По мнению многих ученых, само существование вечной мерзлоты не является вечным, поскольку при глобальном потеплении климата она может исчезнуть полностью[14].

Специфичность многолетнемерзлых грунтов заключается в том, что в них постоянно содержится лед. При повышении температуры (выше 0°C) мерзлый грунт оттаивает, и его прочность резко снижается, качественно изменяются и другие свойства, особенно в пылевато-глинистых грунтах. Под зданиями образуются своеобразные «чаши» протаивания.

Многолетнемерзлые грунты, как ни один из других специфических грунтов, отличаются высокой чувствительностью к изменению температурного режима. В этих условиях коренным образом изменяются гидрогеологические особенности территории, возникают опасные криогенные (мерзлотные) процессы — термокарст, морозное пучение, наледи и др.

1.1.3 Особенности строения и состава многолетнемерзлых грунтов.

В вертикальном разрезе толщи многолетнемерзлых грунтов различают три слоя: 1) деятельный слой; 2) собственно многолетняя мерзлота и 3) подмерзлотный слой (талые грунты с положительной температурой).

Деятельный слой — самая верхняя часть толщи многолетней мерзлоты, подверженная сезонному оттаиванию (летом) и промерзанию (зимой). Мощность деятельного слоя зависит от географического положения местности, состава пород, экспозиции склона и т. д. и колеблется от 0,2—0,5 м (тундровые зоны и зоны арктических пустынь) до 3—4 м. Наибольшая мощность отмечается в песчаных и крупнообломочных грунтах, наименьшая — в органоминеральных. В деятельном слое даже в зимнее время могут находиться талики, т. е. оттаявшие (талые) участки горных пород.

Определение мощности деятельного слоя, его состава и состояния, а также расположения в нем талого грунта имеет большое практическое значение. В связи с этим в геологическом разрезе выделяют два типа мерзлоты:

- I тип — сливающая мерзлота, при которой деятельный слой при замерзании непосредственно переходит в многолетнюю мерзлоту,
- II тип — несливающая мерзлота, когда при замерзании между ними остается слой талого грунта.

Многолетняя мерзлота — толща грунтов с постоянной отрицательной температурой имеет мощность от нескольких метров до нескольких сотен метров. Максимальная мощность зарегистрирована за Полярным кругом в верховьях р. Мархи в Сибири — 1450 м. Под долинами крупных сибирских рек мерзлота может совсем отсутствовать, что связано с выделением ими огромного количества тепла. В зоне несплошного (прерывистого) распространения мощность многолетнемерзлых грунтов обычно не превышает 30—60 м, а в зоне островного распространения снижается до 10—15 м.

По физическому состоянию и составу среди многолетнемерзлых грунтов выделяются три вида [15]:

1) твердомерзлые — в которых дисперсный грунт прочно сцементирован льдом, характеризуется хрупким разрушением и незначительной сжимаемостью под внешней нагрузкой, коэффициент их сжимаемости меньше $0,1 \text{ кПа}^{-1}$. К твердомерзлым относятся песчаные и глинистые грунты, если их температура

ниже: 0,0 – для крупнообломочных; -0,3 – для песков крупных и средней крупности; 0,6 – для супесей; -1,0 – для суглинков и -1,5 – для глины.

2) пластичномерзлые — в них кроме льда-цемента содержится незамерзшая вода, благодаря которой они обладают вязкостью и повышенной сжимаемостью под внешней нагрузкой. К пластичномерзлым грунтам относятся песчаные и глинистые грунты со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой более 0,8, если их температура находится в пределах от 0 °С до значений для твердомерзлых грунтов;

3) сыпучемерзлые — маловлажные песчаные и крупнообломочные грунты с отрицательной температурой, но не сцементированные льдом, а потому сохраняющие рыхлость.

Наличие льда в грунтах существенно изменяет не только их строение, но и почти все физико-механические свойства. Лед может находиться в многолетнемерзлых грунтах не только в виде льда-цемента, заполняющего поры, но и в виде различных включений, линз, жил, прослоев, иногда в виде мощных толщ — до 20 м. Отношение объема льда всех видов, содержащегося в мерзлом грунте, к его объему называют суммарной льдистостью.

При оттаивании многолетнемерзлые грунты резко снижают свою прочность и способны давать значительные тепловые осадки (просадки), нередко достигающие 10—15% от мощности оттаявшей толщи. Подобные значительные осадки неизбежно будут приводить к серьезным деформациям и даже разрушениям различных сооружений, возведенных без учета специфических особенностей многолетнемерзлых грунтов.

1.1.5. Эксплуатационные характеристики мерзлых грунтов

Физические свойства.

Физические свойства, характеризующие мерзлый грунт как систему частиц, определяются группами характеристик, отражающими:

– наличие в грунте воды в жидкой фазе (весовая и суммарная влажность, показатели консистенции, количество незамерзшей воды);

– наличие в грунте воды в твердой фазе (льдистость, льдонасыщенность, относительная лдистость);

– вес и объем пор грунта (удельный вес, удельный вес скелета, пористость, коэффициент пористости);

– состав твердой фазы (гранулометрический и минералогический).

Здесь приводятся характеристики мерзлых грунтов, являющиеся дополнительными по сравнению с обычными немерзлыми грунтами.

Суммарная влажность W_c – отношение веса всех видов воды, содержащихся в мерзлом грунте, к весу скелета грунта, выраженное в долях единицы[16]:

$$W_c = W_b + W_r = W_b + (W_{ц} + W_{н}), \quad (1)$$

где W_b – влажность за счет ледяных включений, т. е. линз и прослоек льда, определяется по опытным замерам прослоек льда;

W_r – влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями;

$W_{ц}$ – влажность за счет цементирующего минеральные частицы порового льда;

$W_{н}$ – влажность за счет незамерзшей воды.

При замерзании грунта поровая влага перераспределяется и может быть представлена в виде трех частей[17]: одна – образует отдельные скопления в виде кристаллов, линз и прослоек льда; другая – замерзает в порах, цементирует частицы между собой; третья – остается в порах в виде незамерзшей воды. Количество последней зависит от температуры, состава и засоленности мерзлого грунта, оно сильно меняется в глинах в интервале температур от 0 до -10 °С, в суглинках от 0 до -5 °С, в супесях от 0 до $-3,0$ и в песках от 0 до $-0,5$ °С. При понижении температуры часть незамерзшей воды переходит в ледцемент и наоборот. Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах обуславливает их несущую способность, упругость, вязкость и пластичность (рис 3 и рис 4).

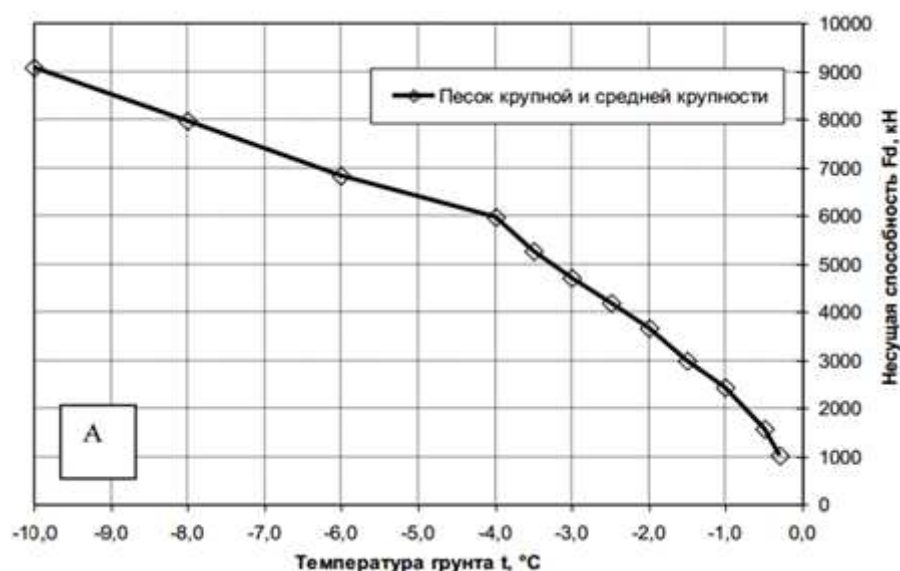


Рисунок 3 – Зависимость несущей способности висячей сваи от температуры песка крупной и средней крупности.

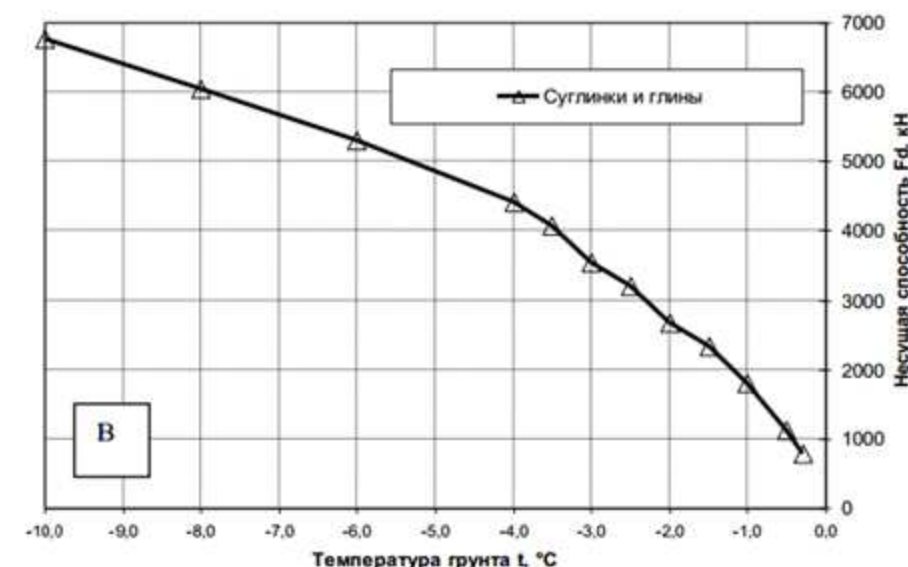


Рисунок 4 – Зависимость несущей способности висячей сваи от температуры суглинков и глины

Относительная льдистость – отношение веса льда к весу воды в твердой и жидкой фазах в мерзлом грунте. Согласно СП 25.13330.2012 льдистость мерзлого грунта подразделяется: на суммарную льдистость ; льдистость грунта за счет ледяных включений и льдистость грунта за счет порового льда. Рассматривается также степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой (степень влажности).

Наличие и расположение льда в мерзлом грунте определяет его криогенную текстуру[18]. Переход засоленных грунтов, которые имеют место в районах вечной мерзлоты, из пластичномерзлого в твердомерзлое состояние происходит при более низких температурах, чем аналогичных незасоленных грунтов. Согласно СП 25.13330.2012 грунт характеризуется по степени засоленности и концентрации порового раствора в засоленном грунте.

Засоленные мерзлые грунты, кроме того, отличаются пониженной прочностью и малыми значениями сопротивлений сдвигу по поверхности смерзания с фундаментами.

Механические свойства

Прочность мерзлых грунтов определяется связями между агрегатами и отдельными их частицами. Различают несколько видов внутренних связей в мерзлом грунте (молекулярные, льдо-цементные, структурно-текстурные), однако основным связующим является лед[19].

Как известно, любая, даже крайне незначительная, нагрузка на лед вызывает пластично-вязкое его течение. В соответствии с определением многолетнемерзлый грунт всегда содержит известное количество льда. Таким образом, проявление реологических свойств мерзлых грунтов (течение их во времени под нагрузкой) является основным элементом в понимании, определении и рассмотрении механических свойств грунтов.

Ползучесть мерзлых грунтов подразделяют на затухающую (с постоянным уменьшением скорости необратимых деформаций до нуля) и незатухающую (при напряжениях больше некоторого предела, названного пределом длительной прочности), характеризуемую возникновением необратимых структурных деформаций. Различают три стадии незатухающей ползучести[20]:

- неустановившейся ползучести, при которой скорость деформации стремится к некоторой постоянной величине;
- установившейся ползучести с постоянной скоростью деформации, которая может продолжаться иногда значительное время: величина этой скорости характеризуется коэффициентом вязкости, который сам по себе непостоянен и

зависит от времени действия нагрузки и величины отрицательной температуры грунта;

– прогрессирующего течения с разуплотнением мерзлого грунта, нарушением его структуры, в конечном счете разрушением основания.

В отличие от льда мерзлые грунты имеют пределы длительной прочности.

Из рассмотрения основ реологии мерзлых грунтов вытекает положение о нестабильности их механических свойств и невозможности анализа последних без учета фактора времени.

Следует отметить, что быстрое действие внешних нагрузок (при разработке мерзлых грунтов) характеризуется величиной мгновенной прочности мерзлых грунтов, длительное – пределом длительной прочности. По данным С. С. Вялова, величина предельно длительной прочности грунта в 5–15 раз меньше мгновенной и наступает, особенно в связных грунтах (глинистых), через достаточно длительное время[21].

Сопротивление мерзлых грунтов сжатию и растяжению зависит от температуры и влажности. С понижением отрицательной температуры значения напряжений возрастают, на их величину оказывает влияние также состав грунта, его льдистость – влажность, текстура и пр. Предельно-длительное сопротивление мерзлых грунтов сжатию в 5–10 раз меньше временного их сопротивления. При этом чем больше ступень нагрузки, тем медленнее происходит затухание деформаций[22].

Предельно-длительное сопротивление растяжению мерзлых грунтов значительно (в 2–6 раз) меньше их сопротивлений сжатию, поскольку при растяжении уменьшается число контактов между минеральными частицами грунта, а при сжатии оно увеличивается.

Сопротивление мерзлых грунтов сдвигу определяется главным образом температурой грунта, величиной внешнего давления и временем действия нагрузки, и оно различно для грунтов разного состава и состояния.

Условием прочности любого материала в данной точке, как известно, является достаточная сопротивляемость его сдвигу в этой точке. Поэтому

сопротивление сдвигу мерзлых грунтов является такой их механической характеристикой, без знания которой не представляется возможным рассчитать ни предельное сопротивление грунтов в основаниях сооружений, ни прочность различного рода ограждающих конструкций, воспринимающих активное давление грунта (например, при проходке котлованов под фундаменты и шахт методом искусственного замораживания грунтов в таликах), ни устойчивость массивов мерзлых грунтов при действии сдвигающих нагрузок.

Многолетние опыты показывают, что сопротивление сдвигу мерзлых грунтов зависит от ряда факторов и является функцией не менее чем трех переменных: отрицательной температуры грунта; величины внешнего давления; времени действия нагрузки.

Как показали исследования [23], предельное (разрушающее) сопротивление мерзлых грунтов плоскостному сдвигу от нормального давления обусловлено не только силами сцепления, но и внутренним трением и при не очень больших давлениях (до 1,0 - - 1,5 МПа) может быть описано уравнением первой степени от нормального давления с переменными, зависящими от величины отрицательной температуры – θ °С и времени действия нагрузки t , т. :

$$\tau_{пр} = C_{\theta,t} + \operatorname{tg} \varphi_{\theta,t} * P, \quad (2)$$

Величина сцепления $C_{\theta,t}$ в общем сопротивлении сдвигу мерзлых грунтов составляет значительную часть, для глинистых грунтов колеблется в пределах 60–94 %. Результаты определения предельного сопротивления сдвигу мерзлых грунтов при различной температуре [24] показали: чем ниже температура мерзлого грунта, тем больше его сопротивляемость сдвигу за счет величины сцепления, с МПа, и угла внутреннего трения φ° . Так, например, для мерзлой глины ($W_c = 33$ %) при $\theta = -1$ °С $\varphi = 14$ °, а при $\theta = -2$ °С $\varphi = 22$ °. При температуре близкой к 0 °С угол внутреннего трения мерзлых грунтов практически равен углу внутреннего трения грунтов немерзлых, сцепление же

мерзлых грунтов имеет значительно большую величину по сравнению со сцеплением грунтов немерзлых.

Существенное значение для оценки сопротивления мерзлых грунтов сдвигу имеет время действия сдвигающей нагрузки в связи с огромным влиянием на сопротивление сдвигу релаксации напряжений, обуславливающей текучесть мерзлых грунтов под нагрузкой и снижение их прочности [25].

Весьма большое значение при расчетах заделки фундаментов в вечномерзлые грунты при морозном пучении грунтов деятельного слоя имеют данные о прочности смерзания грунтов, оцениваемые сопротивлением сдвигу грунтов по поверхности их смерзания с материалом фундаментов.

Прочность смерзания грунтов $R_{сд}$ – сопротивление сдвигу грунтов по поверхности их смерзания с материалом свайных фундаментов является основой при определении их несущей способности по грунту основания.

Различают предельно-длительную устойчивую (используемую для расчетов на выпучивание) и временную прочности смерзания, определяемые в результате мгновенного действия нагрузки и используемые для расчетов сооружений при динамических нагрузках.

Временная прочность смерзания особенно сильно возрастает с понижением температуры в области фазовых превращений воды, когда большая часть поровой воды превращается в лед (для песков и супесей от 0 до -1 °С, для глин – от 0,5 до -5 °С). При низких температурах она может достигать большой величины ($3 \cdot 10^6$ Н/м²). Величина предельно-длительной прочности смерзания в 5–10 раз меньше временной прочности смерзания.

Сжимаемость мерзлых грунтов проявляется в зависимости от времени действия, величины и характера приложенной нагрузки. Грунты разного состава, температуры и влажности имеют различную сжимаемость [26].

Мерзлые грунты с низкой температурой характеризуются незначительной величиной деформации сжатия и относятся к категории малосжимаемых (твердомерзлые).

При высокой, близкой к нулю, температуре мерзлые грунты могут даже при малых нагрузках значительно уплотняться, не переходя в талое состояние. Величина сжатия достигает 1,5–4,0 см на 1 м сжимаемой толщины. Такие грунты относятся к категории сжимаемых, и осадки их рассчитываются общепринятыми в механике грунтов методами.

Величине сжимаемости грунтов соответствуют и виды их деформаций (мгновенные, длительные разрушения). Для мгновенных в большей степени свойственны упругие деформации, характеризуемые модулем нормальной (продольной) упругости (модуль Юнга E , МПа) и коэффициентом поперечной упругости (коэффициент Пуассона μ). Для деформаций уплотнения показателями являются приведенный коэффициент относительной сжимаемости мерзлого грунта α_0 и модуль его общей деформации E_0 .

Общая величина сжатия мерзлых грунтов составляется из остаточных (структурного уплотнения и пластического течения) и упругих (собственно упругих и адсорбционно-обратимых) деформаций, последние могут достигать 60 % от величины общей деформации и больше.

При длительном действии нагрузки упругие деформации проявляются главным образом у твердомерзлых грунтов с низкой температурой. Грунты с температурой, близкой к 0 °С, как правило, упругих свойств не проявляют и накапливают только остаточную деформацию[27].

Теплофизические свойства

Показатели теплофизических свойств необходимы для характеристики теплофизических процессов в мерзлых грунтах, особенно при их промерзании – протаивании. Теплофизические свойства грунтов основания, обладающих разнородными характеристиками, могут быть определены по осредненным характеристикам отдельных слоев. В практических расчетах наиболее распространены показатели теплоемкости и теплопроводности талых и мерзлых грунтов.

Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_a (в талом состоянии C_{th}) – количество тепла, необходимое для изменения температуры 1 см^3 грунта на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ в $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

Значения объемной теплоемкости в основном определяются влажностью и удельным весом и практически не зависят от состава грунта, так как удельная теплоемкость минерального скелета различных грунтов изменяется незначительно (от 0,17 до 0,2) [28].

В теплотехнических расчетах встречаются также понятия:

- аддитивной теплоемкости (количество тепла, необходимое для изменения температуры 1 г мерзлого грунта на $1 \text{ }^\circ\text{C}$);
- эффективной теплоемкости (теплоемкость, включающая теплоту фазовых превращений воды – замерзания или оттаивания);
- скрытой теплоты плавления льда, содержащегося в единице объема мерзлого грунта.

При теплотехнических расчетах используются коэффициенты теплопроводности мерзлого грунта и талого грунта, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ – количество тепла в Дж , проходящее в 1 с через площадь 1 см^2 слоя грунта толщиной 1 см при разности температуры его поверхности $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Величина коэффициента теплопроводности так же, как и теплоемкость, зависит от плотности, влажности, состава и в меньшей степени – от температуры грунта.

Коэффициент температуропроводности α характеризует скорости выравнивания температуры в различных точках грунта. Чем больше его значение для грунта, тем быстрее последний будет нагреваться или охлаждаться.

Строительство на многолетнемерзлых грунтах регламентируется специальными нормами и правилами (СП 25.13330.2012). При проектировании различных зданий и сооружений учитывают не только их конструктивные и технологические особенности, но и характер теплового и механического взаимодействия с мерзлой толщей грунтов. Очень важен прогноз возможных изменений мерзлотных условий как в ходе строительства, так и при эксплуатации

зданий и сооружений. Все эти данные получают на основе специальных инженерно-геокриологических работ, в состав которых входят инженерно-геологические, мерзлотные и гидрогеологические исследования.

1.2 Виды фундаментов, используемые в условиях многолетнемерзлых грунтов

1.2.1 Основные положения проектирования оснований и фундаментов

При строительстве на многолетнемерзлых грунтах в зависимости от конструктивных и технологических особенностей зданий и сооружений, инженерно-геокриологических условий и возможности целенаправленного изменения свойств грунтов основания применяется один из следующих принципов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений[29-32].

Принцип I - многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения. Следует применять, если грунты основания можно сохранить в мерзлом состоянии при экономически целесообразных затратах на мероприятия, обеспечивающие сохранение такого состояния. На участках с твердомерзлыми грунтами, а также при повышенной сейсмичности района следует принимать, как правило, использование многолетнемерзлых грунтов по принципу I.

Принцип II - многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения сооружения или с допущением их оттаивания в период эксплуатации сооружения). Следует применять при наличии в основании скальных или других малосжимаемых грунтов, деформация которых при оттаивании не превышают предельно допустимых значений для проектируемого сооружения, при несплошном распространении многолетнемерзлых грунтов, а также в тех случаях, когда по техническим и конструктивным особенностям сооружения и инженерно-геокриологическим

условиям участка при сохранении мерзлого состояния грунтов основания не обеспечивается требуемый уровень надежности строительства.

Выбор принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений, а также способов и средств, необходимых для обеспечения принятого в проекте температурного режима грунтов, следует производить на основании сравнительных технико-экономических расчетов.

В пределах застраиваемой территории (промышленный узел, поселок, городской микрорайон и т.д.) надлежит предусматривать, как правило, один принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований. Это требование следует учитывать также при проектировании новых и реконструкции существующих зданий и сооружений на застроенной территории, размещении мобильных (временных) зданий и прокладке инженерно-технических сетей.

Применение разных принципов использования многолетнемерзлых грунтов в пределах застраиваемой территории допускается на обособленных по рельефу и другим природным условиям участках, а в необходимых случаях - на природно-необособленных участках, если предусмотрены и подтверждены расчетом специальные меры по обеспечению расчетного теплового режима грунтов в основании соседних зданий, возведенных (или возводимых) по принципу I (резервирование зон безопасности, устройство мерзлотных и противодиффузионных завес и т.п.).

Линейные сооружения допускается проектировать с применением на отдельных участках трассы разных принципов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований. При этом следует предусматривать меры по приспособлению их конструкций к неравномерным деформациям основания в местах перехода от одного участка к другому, а при прокладке их в пределах застраиваемой территории следует соблюдать требования, предусмотренные ранее.

При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований сооружений по принципу I для сохранения мерзлого состояния грунтов

основания и обеспечения их расчетного теплового режима в проектах оснований и фундаментов необходимо предусматривать: устройство вентилируемых подполий или холодных первых этажей зданий, укладку в основании сооружения вентилируемых труб, каналов или применение вентилируемых фундаментов, установку сезоннодействующих охлаждающих устройств жидкостного или парожидкостного типов - СОУ, а также осуществление других мероприятий (теплозащитные экраны и др.) по устранению или уменьшению теплового воздействия сооружения на мерзлые грунты основания. Выбор одного или сочетания нескольких мероприятий должен производиться на основании расчетов: прогнозного (на весь период эксплуатации) теплотехнического, устойчивости и несущей способности с учетом конструктивных и технологических особенностей сооружения, опыта местного строительства и экономической целесообразности.

При I принципе сохранения грунтов в мерзлом состоянии обеспечивается устройством различных охлаждающих мероприятий:

- устройство проветриваемого (холодного) подполья;
- устройство холодных первых этажей;
- укладка в основании и сооружения охлаждающих труб, каналов или применение вентилируемых фундаментов;
- установка сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ);
- другие мероприятия по устранению или уменьшению теплового воздействия сооружения на мерзлые грунты основания.

При проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых с использованием многолетнемерзлых грунтов по принципу II, следует предусматривать мероприятия по уменьшению деформаций основания (6.4.2) или мероприятия по приспособлению конструкций сооружения к восприятию неравномерных деформаций основания, назначаемые по результатам расчета основания по деформациям. Выбор одного из указанных мероприятий или их сочетания производится на основании технико-экономического расчета. При этом мероприятия по уменьшению деформаций

основания следует предусматривать в любом случае, если расчетные осадки сооружения превышают значения, допустимые по архитектурным и технологическим требованиям, а для сооружений, возводимых по типовым проектам, - также установленные для них предельные значения деформаций по условиям прочности и устойчивости конструкций. Мероприятия по приспособлению конструкций сооружения к неравномерным деформациям оттаивающего основания следует назначать по результатам расчета совместной работы основания и сооружения[33-36].

Для уменьшения деформаций основания в зависимости от конкретных условий строительства следует предусматривать:

- предварительное (до возведения сооружения) искусственное оттаивание и уплотнение грунтов основания;
- замену льдистых грунтов основания талым или непросадочным при оттаивании песчаным или крупнообломочным грунтом;
- ограничение глубины оттаивания мерзлых грунтов основания, в том числе со стабилизацией верхней поверхности многолетнемерзлого грунта в процессе эксплуатации сооружения;
- увеличение глубины заложения фундаментов, в том числе с прорезкой льдистых грунтов и опиранием фундаментов на скальные или другие малосжимаемые при оттаивании грунты.

Глубину предварительного оттаивания или замены льдистых грунтов основания на малосжимаемые при оттаивании грунты следует устанавливать по результатам расчета основания по деформациям

Контуры зоны оттаивания или замены грунтов основания в плане должны выходить за контуры сооружения не менее чем на половину глубины предварительного оттаивания грунта.

Допускается принимать меньшую площадь предварительного оттаивания или замены грунтов в плане, а также производить локальное предварительное оттаивание грунтов под фундаментами (вместо сплошного оттаивания под всей площадью сооружения), если это обосновано расчетом основания по

деформациям и устойчивости. Оттаивание грунтов оснований можно производить способами электрооттаивания, пароттаивания или за счет других источников тепла. При этом должны быть предусмотрены меры по обеспечению установленной проектом степени уплотнения оттаянного грунта[37].

Для ограничения глубины оттаивания грунтов в основании сооружения следует предусматривать устройство теплоизолирующих подсыпок и экранов, увеличение сопротивления теплопередаче полов первых этажей и другие мероприятия по уменьшению теплового влияния сооружения на грунты основания, а также стабилизацию верхней поверхности многолетнемерзлого грунта (в том числе при несливающимся сезоннопромерзающем слое) ниже глубины заложения подошвы фундаментов путем регулирования температуры воздуха в подпольях или технических этажах здания[38].

Приспособление конструкций сооружений к неравномерным деформациям основания должно обеспечиваться:

а) увеличением прочности и пространственной жесткости здания, достигаемой устройством поэтажных, связанных с перекрытиями железобетонных и армокирпичных поясов, усилением армирования конструкций, замоноличиванием сборных элементов перекрытия, усилением цокольно-фундаментной части, равномерным расположением сквозных поперечных стен, а также разрезкой протяженных зданий на отдельные отсеки длиной до полуторной ширины здания;

б) увеличением податливости и гибкости сооружения путем разрезки его конструкций деформационными швами, устройством шарнирных сопряжений отдельных конструкций с учетом возможности их выравнивания и рихтовки технологического оборудования.

Допускается предусматривать комбинацию указанных мероприятий применительно к особенностям проектируемого сооружения. При этом, бескаркасные жилые и общественные здания следует, как правило, проектировать по жесткой конструктивной схеме; для промышленных сооружений могут применяться гибкие и комбинированные конструктивные

схемы. Цокольно-фундаментную часть зданий в типовых проектах следует разрабатывать в нескольких вариантах, рассчитанных по прочности на разные пределы допустимых деформаций основания.

При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований по принципу II следует, как правило, применять:

а) для сооружений с жесткой конструктивной схемой, возводимых на оттаивающих грунтах, - усиленные армопоясами ленточные фундаменты, в том числе в виде жестких перекрестных лент, воспринимающих и перераспределяющих усилия, вызванные неравномерной осадкой оттаивающего основания, а в необходимых случаях - плитные фундаменты; на предварительно оттаянных и уплотненных грунтах допускается применять столбчатые, ленточные и другие виды фундаментов на естественном основании, а также свайные фундаменты, если это обусловлено грунтовыми условиями[39];

б) для сооружений с гибкой конструктивной схемой - столбчатые и отдельно стоящие фундаменты под колонны, гибкие ленточные фундаменты, а в необходимых случаях также свайные фундаменты.

В случаях, когда в основании сооружений залегают скальные или другие малосжимаемые при оттаивании грунты, следует применять столбчатые фундаменты, свайные фундаменты из свай-стоек, в том числе из составных и буронабивных свай.

Сваи следует погружать, как правило, буроопускным способом в скважины, диаметр которых не менее чем на 15 см превышает наибольшие размеры поперечного сечения сваи, с заполнением свободного пространства цементно-песчаным или другим раствором по проекту. Заделку свай-стоек в скальные грунты надлежит производить в соответствии с требованиями СП 24.13330.

1.2.2 Вентилируемые подполья с естественной или побудительной вентиляцией.

Вентилируемое подполье является основным видом охлаждающего устройства гражданских и промышленных зданий, возводимых на вечномерзлых грунтах. Его главное достоинство – надежность работы, недостаток – большие капитальные затраты на устройство подполья и технические сложности в случае передачи на полы первого этажа промышленных зданий значительных нагрузок от транспорта и оборудования. Температурный режим вентилируемого подполья характеризуется среднегодовой температурой воздуха в подполье $T_{с,а}$, устанавливаемой расчетом в зависимости от предусмотренного проектом значения среднегодовой температуры вечномерзлого грунта на его верхней поверхности T_0 , теплового режима сооружения и режима вентилирования подполья[40].

Вентилируемые подполья с естественной или побудительной вентиляцией следует применять для сохранения мерзлого состояния грунтов в основаниях жилых и промышленных зданий и сооружений, в том числе сооружений с повышенными тепловыделениями. Требуемый тепловой режим вентилируемого подполья устанавливается теплотехническим расчетом согласно нормативной документации.

Подполья в соответствии с теплотехническим расчетом и условиями снегозаносимости допускается устраивать открытыми, с вентилируемыми или закрытыми продухами в цоколе здания; при необходимости у продухов следует устраивать вытяжные или приточные трубы, располагая воздухозаборные отверстия выше наибольшего уровня снегового покрова. Закрытые подполья, а также холодные первые этажи зданий рекомендуется устраивать при ширине зданий до 15 м и среднегодовых температурах грунта ниже минус 2 °С[41].

Высота подполья должна приниматься по условиям обеспечения его вентилирования, но не менее 1,2 м от поверхности грунта в подполье до низа выступающих конструкций перекрытия; при размещении в подполье коммуникаций - по условиям свободного к ним доступа, но не менее 1,4 м. Под

отдельными участками сооружения шириной до 6 м при отсутствии в них коммуникаций и фундаментов высоту подполья допускается уменьшать до 0,6 м.

Поверхность грунта в подполье должна быть спланирована с уклонами в сторону наружных отмосток или водосборов, обеспечивающих беспрепятственный отвод воды от сооружения, и иметь, как правило, твердое покрытие.

Инженерные тепловыделяющие коммуникации, размещаемые в вентилируемом подполье, должны быть теплоизолированы.

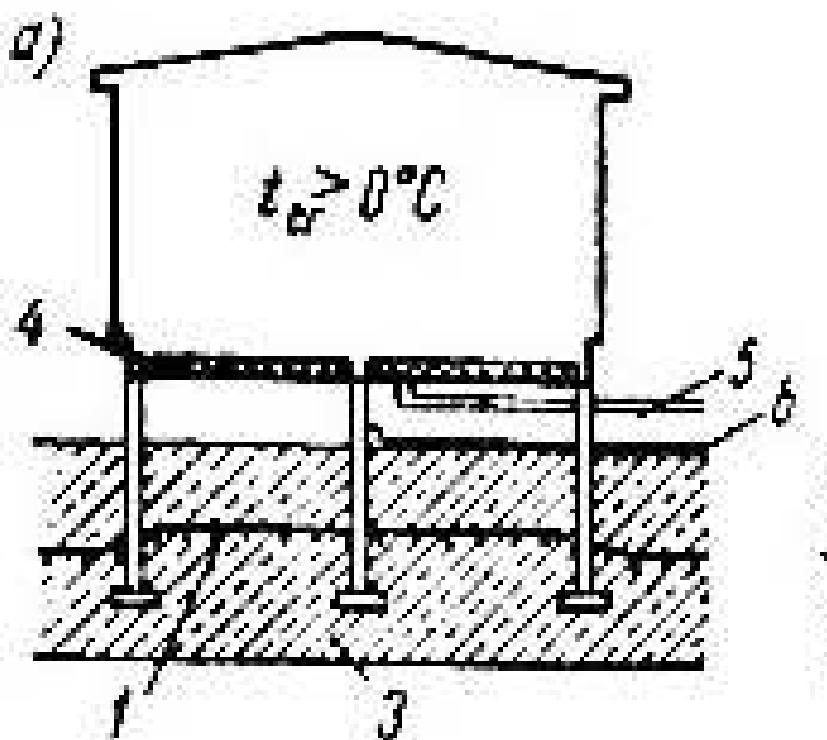


Рисунок 5 – Схема устройства вентилируемого подполья. 1 - верхняя граница вечномерзлых грунтов; 2 - насыпной или замененный грунт; 3 - просадочный грунт; 4 - термоизоляция; 5 - трубопровод; 6 - лоток под трубопроводом для отвода аварийной воды;

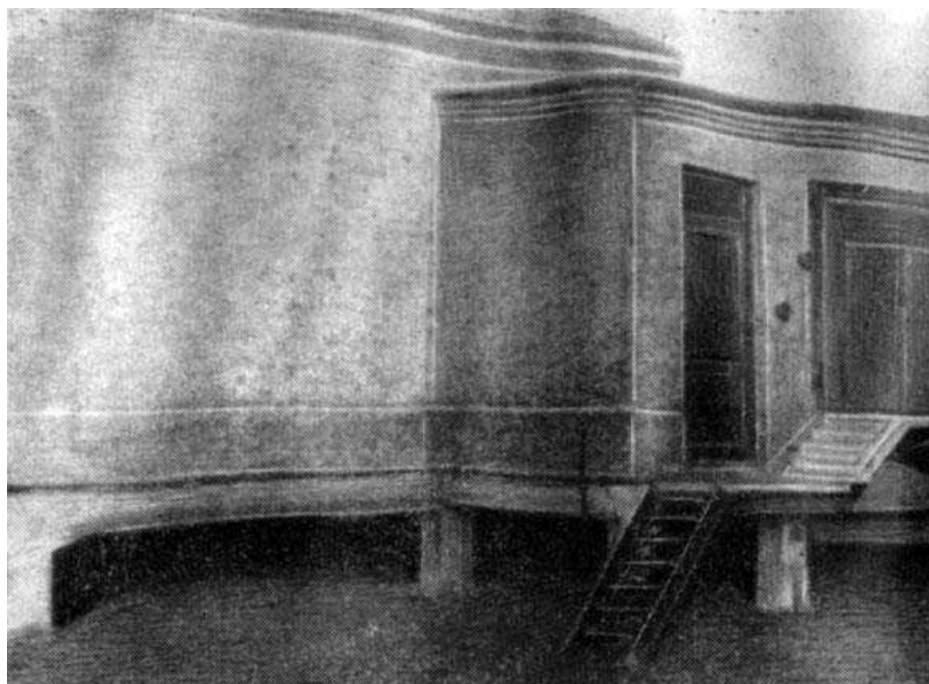


Рисунок 6 – Здание трансформаторной подстанции в г. Воркуте (подполье круглогодично проветриваемое)

1.2.3 Вентелируемые фундаменты, трубы и каналы.

Вентилируемые трубы или каналы, а также вентилируемые фундаменты можно устраивать с естественной или побудительной вентиляцией и их следует преимущественно применять для сохранения мерзлого состояния грунтов в основании сооружений с полами по грунту, при устройстве малозаглубленных или поверхностных фундаментов на подсыпках, а также мобильных зданий и зданий в комплектно-блочном исполнении[42-44].

Вентилируемые трубы, каналы и вентилируемые фундаменты следует укладывать выше уровня подземных вод, как правило, в пределах подсыпки из непучинистого грунта с уклонами в сторону объединительных коллекторов. Для уменьшения теплопритока в грунт и высоты подсыпки под полами сооружения следует предусматривать укладку тепло- и гидроизоляции.



Рисунок 7 – Вентилируемый фундамент

1.2.3 Сезоннодействующие охлаждающие устройства

Сезоннодействующие охлаждающие устройства следует применять для сохранения мерзлого состояния грунтов оснований, для повышения несущей способности опор линейных сооружений в пластично-мерзлых грунтах, а также для создания ледогрунтовых завес, восстановления нарушенного при эксплуатации сооружения теплового режима грунтов в его основании и в других целях.

Для сокращения сроков строительства и повышения расчетных нагрузок на фундаменты следует предусматривать предварительное (до возведения сооружения) охлаждение высокотемпературных и пластично-мерзлых грунтов (путем очистки поверхности от снега, с помощью СОУ и т.д.) при последующем поддержании расчетного температурного режима грунтов за счет постоянно действующих охлаждающих устройств[45].

В последнее время строительство зданий и сооружений в районах распространения ММГ ведется, как правило, с использованием СОУ, позволяющих в зимний период заморозить талые и понизить температуру пластичномерзлых грунтов. Накоплен большой опыт их изготовления, транспортировки, монтажа.

В результате многолетних исследований НПО «ФСА» разработало и производит четыре основных вида сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ): горизонтальные и вертикальные естественнодействующие трубчатые системы (соответственно, ГЕТ и ВЕТ), индивидуальные СОУ термостабилизаторы и глубинные СОУ.

Принцип действия термостабилизирующих устройств основан на переносе естественного холода к основанию фундамента, благодаря чему в вечной мерзлоте поддерживается неизменная температура, грунт не растепляется от теплового воздействия зданий или в результате сложных процессов, происходящих в подземных слоях. При этом устройства не требуют затрат электроэнергии. Они могут быть вертикальные, наклонные, слабонаклонные, горизонтальные. В качестве хладоносителя используются: аммиак и двуокись углерода[46].

Технические решения НПО «ФСА» широко используются почти на всех нефтегазовых объектах страны, расположенных в северных широтах. Они с успехом внедрены на месторождениях более 350 нефтегазовых объектов ведущих компаний России - ОАО «Газпром» (в Уренгое, Надыме, Ямбурге, Югорске, полуострове Ямал), ОАО «НК «ЛУКОЙЛ» и ОАО «НК «Роснефть», ОАО «АК «Транснефть», алмазодобывающее предприятие АК «Алроса», золотодобывающее предприятие ОАО «Полиметалл», городские администрации таких северных городов, как, например, Новый Уренгой, Салехард, Надым, Лабытнанги, Мирный.

Установка термостабилизирующих систем позволяет вдвое сократить бюджет строительства нулевого цикла на мерзлом грунте.

Экономическая эффективность применения систем температурной стабилизации грунтов составляет от 20% до 50% стоимости нулевого цикла по сравнению с использованием проветриваемых подполий. Высокие темпы и масштабы северных строек потребовали от НПО «ФСА» активного наращивания производственных мощностей. Только за 2012-2013 годы удалось вдвое увеличить объемы выпускаемой продукции - до 10000 индивидуальных

термостабилизаторов и 100 термостабилизирующих систем ВЕТ и ГЕТ в месяц. На сегодняшний день производственная база научно-производственного объединения не имеет мировых аналогов по: совершенству технологии, объемам выпускаемой продукции, КПД и мощности единичных систем термостабилизации, достижению необходимого низкотемпературного поля в грунте.

Инновационные технические решения, предлагаемые НПО «ФСА», год от года становятся все более востребованными; предприятие активно расширяет географию деятельности. В настоящее время термостабилизирующие системы НПО «ФСА» поддерживают в мерзлом состоянии в общей сложности 28 миллионов кубометров грунта на площади 2,8 миллиона квадратных метров, охватывая пространство от Нарьян-Мара до Чукотки. И это, с учетом масштабных планов нефтегазовых компаний по освоению месторождений Крайнего Севера и Чукотки, только начало.

Существуют трудности обеспечения надежности оснований и фундаментов зданий, особенно для областей вблизи границы территориального распространения криолитозоны, со значительной частью, сложенной пластичномерзлыми грунтами. В этих областях геолого–географические условия криолитозоны характеризуются наличием мерзлых пород островного и прерывистого характера как по глубине, так и в плане. Зачастую, часть здания, может быть расположена на пластичномерзлых грунтах сливающегося типа, часть на сплошных таликах, часть на ММГ с погружением верхней границы на глубину до 10–15м. При этом пластичномерзлые грунты могут иметь небольшую мощность 15–20м. Это определило задачу коллективу НПО «ФСА» по совершенствованию существующих и разработке новых систем термостабилизации с целью обеспечения более глубокого охлаждающего эффекта с расширением границ вечной мерзлоты и понижением температуры грунта при необратимом изменении энергетического баланса грунтовой поверхности[47].

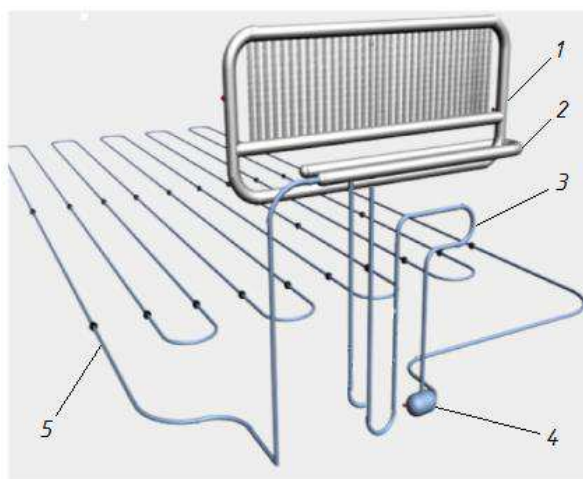


Рисунок 8 – Опытная схема системы ГЕТ.1-конденсаторный блок; 2-ускоритель циркуляции; 3-гидрозатвор; 4-грязевик; 5-испаритель.

Коллективом компании НПО «ФСА» на основе собственных научных исследований и проведенных натурных экспериментальных работ разработаны «Технические решения по проектированию оснований и фундаментов объектов гражданского назначения на вечномёрзлых грунтах с применением систем температурной стабилизации грунтов (ТСГ) (хладагент систем – углекислота)».

Данные технические решения направлены на разработку проектных решений, обеспечивающих рациональное использование и удобство в эксплуатации зданий и сооружений жилищно-гражданского назначения, расположенных в районах распространения ММГ. При их создании учитывался 20-ти летний опыт проектирования, строительства и эксплуатации оснований с системами температурной стабилизации грунтов оснований (хладагент охлаждающих систем – аммиак) на объектах промышленного назначения.

Горизонтальные естественнодействующие трубчатые системы замораживания грунтов основания «ГЕТ» впервые были применены на объектах промышленного назначения Уренгойского месторождения, в качестве теплоносителя использовали аммиак. Массовое внедрение систем «ГЕТ» и «ВЕТ» пришлось на обустройство Харасавэйского, Сандибинского, Южно-Русского, Самбургского, Верхнечонского, Ванкорского, Бованенковского, Ныдинского и Южно-Хыльчуйского месторождений.

Горизонтальная естественно действующая трубчатая (тип - ГЕТ)

Система представляет собой герметично выполненное теплопередающее устройство, не требующее затрат электроэнергии, автоматически действующее в зимнее время за счет силы тяжести и положительной разницы температур между грунтом и наружным воздухом.

Система «ГЕТ» состоит из двух основных элементов:

- охлаждающих и соединительных труб диаметром 33,7мм, размещенных в основании здания, служащих для циркуляции теплоносителя и замораживания грунта;
- конденсаторного блока, расположенного над поверхностью грунта, соединенного с испарительной частью и предназначенного для конденсации паров теплоносителя и перекачки его по системе за счет естественной конвекции и силы тяжести.

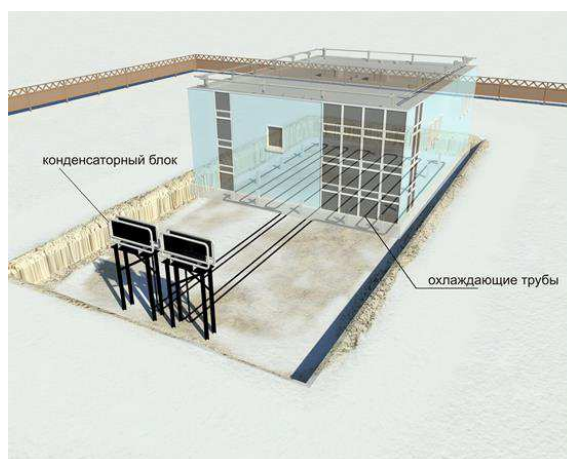


Рисунок 9 – Система ГЕТ в основании сооружения.

Вертикальная естественнодействующая трубчатая (тип - ВЕТ)

Система «ВЕТ» состоит из: вертикальных охлаждающих труб (ТОВ); соединительных труб; конденсаторного блока и гидрозатвора.

Размещенная в основании здания, система ВЕТ способна охлаждать грунт на глубину до 12-15м.

Система «ВЕТ» предназначена для замораживания грунтов оснований и сооружений, расположенных на ММГ несливающегося типа.

Ширина зданий – до 100м. Разработана специально для решения задачи быстрого замораживания основания грунта под фундаментом на начальном этапе строительства и эксплуатации объекта, когда необходимо обеспечить сразу проектную несущую способность основания.

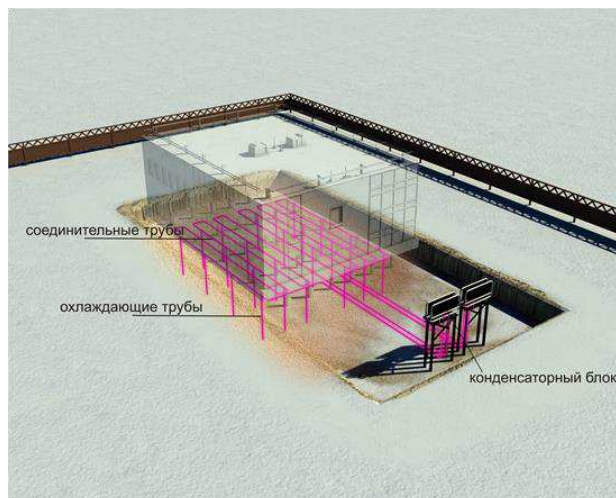


Рисунок 10 – Система ВЕТ в основании сооружения

Предлагаемые технические решения позволяют реализовать конструкции фундаментов без проветриваемых подполий: на ММГ сливающегося типа с системой ГЕТ и на ММГ несливающегося типа с комплексной системой ГЕТ-ВЕТ.

Расстояние от зданий гражданского назначения до надземных частей (конденсаторного блока, ускорителя циркуляции, гидрозатвора) должно составлять не менее 12м и размещаться на участках свободных от инженерных коммуникаций.

Для сохранения надземной части систем от механических повреждений, актов вандализма необходимо предусматривать металлическое ограждение жалюзийного типа.

Надёжность систем температурной стабилизации ГЕТ - ВЕТ обеспечивается конструкцией охлаждающего основания. Каждый участок имеет две системы охлаждения, работающие параллельно. Шаг укладки труб рассчитывается с условием сохранения мерзлого состояния основания при отказе в работе одной системы.

Экономическая эффективность применения систем температурной стабилизации грунтов составляет от 20 % до 50 % стоимости нулевого цикла по сравнению с использованием проветриваемых подполий, что обусловлено совершенством технологии, объемами выпускаемой продукции, КПД и мощностью единичных систем термостабилизации, достижением необходимого низкотемпературного поля в грунте. За счет инновационных технических решений ФСА поддерживается в мерзлом состоянии в общей сложности 28 миллионов кубометров грунта на площади 2,8 миллиона квадратных метров, охватывая пространство от Нарьян-Мара до Чукотки с учетом изменении энергетического баланса грунтовой поверхности.

1.2.4 Характеристика фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов

При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований по принципу I могут применяться свайные, столбчатые и другие типы фундаментов, в том числе фундаменты на искусственных (насыпных и намывных) основаниях. Выбор типа фундамента и способа устройства основания устанавливается проектом в зависимости от инженерно-геокриологических условий строительства, конструктивных особенностей сооружения и технико-экономической целесообразности.

Конструкции фундаментов должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к материалу фундаментов по прочности в соответствии с требованиями СП 24.13330, СП 28.13330, СП 35.13330, а элементы фундаментов, находящиеся в пределах слоя сезонного промерзания и оттаивания грунта и выше - также требованиям по морозостойкости, водонепроницаемости и устойчивости к воздействию агрессивных сред в соответствии с требованиями СП 28.13330 и СП 35.13330. Металлические и деревянные конструкции фундаментов в слое сезонного промерзания и оттаивания грунта должны быть защищены от коррозии и гниения.

При устройстве свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах допускается применять виды и конструкции свай, предусмотренные СП 24.13330, в том числе буронабивные, сваи-оболочки, а также составные (комбинированные) сваи из разных материалов[48].

По условиям применимости и способам погружения в многолетнемерзлый грунт сваи подразделяются на:

а) буроопускные - сваи сплошные и полые, свободно погружаемые в скважины, диаметр которых превышает (не менее чем на 5 см) размер их наибольшего поперечного сечения, с заполнением свободного пространства раствором цементно-песчаным, глинисто-песчаным, известково-песчаным или другого состава по проекту, принимаемым по условиям обеспечения заданной прочности смерзания сваи с грунтом; допускаются к применению в любых грунтах при средней температуре грунта по длине сваи минус 0,5 °С и ниже, полезную нагрузку на буроопускную сваю можно передавать только после полного замерзания раствора;

б) опускные - сваи сплошные и полые, свободно (или с пригрузом) погружаемые в оттаянный грунт в зоне диаметром до двух наибольших поперечных размеров сваи; допускаются к применению в твердомерзлых грунтах песчаных и глинистых, содержащих не более 15% крупнообломочных включений при средней температуре грунта по длине сваи не выше минус 1,5°С;

в) бурозабивные (забивные) - сваи сплошные и полые, рассчитанные на восприятие ударных нагрузок и погружаемые забивкой в лидерные скважины (без лидерных скважин), диаметр которых меньше наибольшего поперечного сечения сваи; допускаются к применению в пластично-мерзлых грунтах с содержанием крупнообломочных включений до 10% на основании пробных погружений свай на данной площадке;

г) бурообсадные - полые сваи и сваи-оболочки, погружаемые в грунт путем его разбуривания в забое через полость сваи с периодическим осаживанием погружаемой сваи; применяются при устройстве свайных

фундаментов в сложных инженерно-геокриологических условиях и при наличии межмерзлотных подземных вод.

Допускается применять другие способы погружения свай в многолетнемерзлые грунты, если это не приводит к недопустимому повышению температуры грунтов основания, что должно быть подтверждено экспериментальными данными и теплотехническим расчетом.

При проектировании сооружений на искусственных основаниях (насыпях или подсыпках) следует предусматривать устройство фундаментов мелкого заложения (столбчатые, ленточные, плитные, с вентилируемыми каналами и др.). Фундаменты следует закладывать в пределах высоты подсыпки, определяемой теплотехническим расчетом с учетом дополнительных мероприятий по сохранению мерзлого состояния грунтов оснований.

Подсыпку следует устраивать из непучинистого песчаного или крупнообломочного грунта, укладываемого после промерзания сезоннооттаивающего слоя; допускается для устройства подсыпок применять шлаки или другие отходы производства, если их осадки под нагрузками от сооружений не больше расчетных, и если они не подвержены морозному пучению и разрушению, растворению и размоканию.

1.3 Подземные здания и сооружения.

Актуальность подземного строительства становится все более очевидной для многих сфер экономики. Подтверждением этому стал и высокий интерес к теме III Международного конгресса «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий», проходившего 19–21 октября в ВК «Ленэкспо» (Санкт-Петербург). С докладом «Преимущества объектов подземного строительства с точки зрения энергоэффективности: опыт и перспективы» выступил генеральный директор СРО НП «Объединение строителей подземных сооружений, промышленных и гражданских объектов» (НП «Объединение подземных строителей») С. Н. Алпатов.

Подземное строительство помогает решать многие градостроительные проблемы, поэтому его роль, как одного из важнейших факторов урбанизации, трудно переоценить. Человечество накопило огромный опыт почти полутора вековой эксплуатации метрополитенов, тысячелетний опыт размещения подземных жилищ, хранилищ, а также храмов (Римская империя, Древний Восток и др.).

В настоящее время, в эпоху индустриализации и урбанизации, существует более 100 видов подземных сооружений, которые могут располагаться на самых различных глубинах — от 4 до 4 тыс. м, но преобладает глубина до 20 м. Тем не менее, все в больших масштабах проявляется тенденция к строительству подземных сооружений на более глубоких уровнях в несколько ярусов.

Подземные сооружения по сравнению с наземными характеризуются следующими экологическими преимуществами: в пределах города могут размещаться практически повсеместно, минимально воздействуя на природный ландшафт и окружающую среду; не нарушают сложившуюся структуру городской застройки; сберегают энергоресурсы при эксплуатации; отличаются повышенной виброустойчивостью и акустической изоляцией; надежно защищены от прямого воздействия климатических факторов; достаточно хорошо

защищены от воздействия сейсмозрывных волн и проникающей радиации, что обеспечивает их неуязвимость от средств массового поражения.

При переносе транспортных магистралей, вокзалов, хранилищ и других сооружений освобождаются подземные территории, за счет использования которых можно значительно увеличить наземную площадь зеленых насаждений, разбить новые парки, улучшить микроклимат существующей застройки.

Несмотря на более высокую стоимость возведения подземных сооружений по сравнению с наземными, в ряде случаев наблюдается экономия от их строительства, что обуславливается, в первую очередь, сэкономленной стоимостью отчуждаемых земель, а также экономией энергоресурсов.

Эффективность подземного строительства подтверждают успешные мировые проекты. Например, огромный подземный центр в канадском Монреале, являющийся местом паломничества туристов. Сюда многие жители спускаются на лифте прямо из своих домов, не выходя на улицу. И попадают в целый подземный город с галереей магазинов, настолько разнообразных, что в них можно купить буквально все: от ошейника для собаки до бытовой техники и бриллиантового кольца. Кроме того, под землей располагается множество кинотеатров, кафе, ресторанов, банков, а также других объектов развлекательной и деловой инфраструктуры. Протяженность улиц этого подземного города (ничем, кроме отсутствия солнечного света и неба над головой, не отличающегося от обычного торгового квартала), составляет около 30 км.

А вот в подземном городе под японским мегаполисом Осака, попав туда впервые, легко можно заблудиться. Подземные улицы здесь не прямые, а в виде лабиринта. Переулки, магазины в подвальных этажах универмагов и офисных зданий и новые торговые центры образуют сложную сеть подземных улиц. Похожая концепция реализована в лондонском деловом районе Canary Warth, где многие здания соединяются подземными галереями, занятыми торговлей. Так же эффективно подземное пространство используется в Токио, Лас-Вегасе, Париже и других крупных мировых городах.

Подземные проекты, являясь пока не таким уж частым явлением, притягивают внимание. Например, строительство в Шанхае первой в мире подземной гостиницы стало настоящей сенсацией. Согласно проекту, уникальный отель уйдет в глубину на 21 этаж.

Мировой опыт ведения подземных работ и дальнейшей эксплуатации подземных сооружений в среде мегаполиса показывает, что современными приоритетами в этой области городского хозяйства становятся стимулы к экономии и повышению эффективности процессов, в частности ресурсосбережение и энергоэффективность. Например, второй по высоте небоскреб в мире — тайваньский «Тайбэй 101», имеющий пять подземных уровней с офисами, магазинами, ресторанами и т. д., — получил Платиновый сертификат международной системы LEED, оценивающей энергоэффективность и экологичность зданий и сооружений. По результатам проведенных энерго-сберегающих мероприятий общая ежегодная экономия энергии составила 30%, а ежегодные расходы на коммунальные услуги снизились на 700 тыс. долларов. При этом реализация ресурсосберегающих мероприятий еще на стадии проектирования и строительства подземных сооружений, по оценкам экспертов, может дать еще больший положительный эффект.

Эффективность использования подземного пространства и окупаемость капитальных вложений в подземное строительство (по сравнению с наземным) достигается за счет экономии и рационального использования городской территории, сокращения эксплуатационных расходов и экономии топливно-энергетических ресурсов (на отопление или охлаждение воздуха, особенно для складов и холодильников) и уменьшения протяженности инженерных коммуникаций.

У подземных сооружений есть ряд важных характеристик, которые выгодно их отличают от объектов, расположенных на земной поверхности: особый микроклимат, изолированность от разного рода поверхностных воздействий (шум, погодные условия, вибрации, радиоактивность и т. д.), способность удерживать тепловую и другие виды энергии, минимальное воздействие на

окружающую среду (которое, по сравнению с объектами на поверхности, к тому же легче контролировать). Подземные сооружения часто не требуют существенных затрат на внешнюю отделку и эксплуатацию и имеют значительно большие (200–500 лет) сроки эксплуатации, чем здания и сооружения на поверхности. Подземные сооружения обладают рядом технических преимуществ перед традиционными наземными постройками, в частности значительным сокращением расходов строительных и изоляционных материалов, снижением энергетических затрат, увеличением продолжительности эксплуатации, повышением защищенности от внешних воздействий и др.

Наиболее рациональным считается размещение в подземном пространстве сооружений складского назначения, а также некоторых производственных, энергетических и инженерно-транспортных объектов и лечебных учреждений.

Благодаря Ж. Фурье стало известно, что особые термические свойства подземных сооружений — термостатированный микроклимат — возникают по причине существования определенной глубины внутри грунтового массива, температура на которой сохраняется примерно постоянной, несмотря даже на наличие конечного значения теплопроводности слоя. Физически распределение температур в толще грунта представляет собой нестационарный процесс, обусловленный суточными и годовыми колебаниями температуры поверхности земли и, соответственно, периодическим подводом и отводом тепла от ее поверхности. Поэтому в зависимости от теплофизических характеристик грунта определяют глубины, на которых указанные колебания незначительны по сравнению с изменением температуры на поверхности.

Одним из наиболее экономичных решений является подземное размещение складов и холодильников. Так, при подземном расположении стоимость строительства складских зданий в 4 раза ниже, а затраты при эксплуатации в 10,6 раза меньше, чем при наземном размещении. Стоимость строительства холодильников при подземном размещении ниже в 3,3 раза, а эксплуатационные расходы — в 11,6 раза, чем при наземном расположении. Эти данные получены при сопоставлении подобных крупных холодильников, построенных в Канзас-

Сити (США) и Сан-Паулу (Бразилия). При оценке затрат энергии оба холодильника были отключены, что вызвало повышение температуры в наземном холодильнике на 0,6 °С в час, а в подземном — на 0,6 °С в день. Гораздо лучшая теплоизоляция и теплоемкость среды позволяют не только экономить электроэнергию, но и подключать подземные холодильники к электросети, минуя пик потребления электроэнергии, и снижать мощность подземных холодильных установок.

Отдельные примеры строительства производственных зданий показывают, что подземное пространство выгодно для размещения технологий, чувствительных к вибрациям и шуму. Так, в США под землей были размещены основные производственные мощности прецизионного приборостроительного завода (Канзас-Сити). При этом исчезла необходимость изоляции чувствительных машин от вибрации и устройства тяжелых фундаментов для ряда машин (так как вокруг здания бесконечно большая масса грунта, обеспечивающая состояние инерции покоя); возросла долговечность машин, снизились затраты на поддержание постоянных температуры и влажности, отпала необходимость в уходе за фасадными поверхностями, сократилась вероятность пожаров и затраты на пожарную охрану, исчезли отрицательные влияния погодных явлений; до 63% снизились расходы на отопление и до 90% — на охлаждение, причем кондиционеры стало возможным включать не в часы пик расходования электроэнергии. В итоге эксплуатационные расходы снизились с 50–70 тыс. долларов в год (при наземном размещении завода) до 3,2 тыс. в год (под землей), страхование на 1000 долларов основных средств снизилось почти в 30 раз.

Опыт строительства производственных зданий в Швеции, Норвегии, Франции подтверждает возможность экономичного размещения под землей в суровых климатических условиях (при повышенном энергопотреблении на отопление) или при необходимости кондиционирования воздуха. Так, в Норвегии при проектировании крупного телефонного узла сравнивали варианты его подземного и наземного расположения. Так как стоимость 1 кв. м подземного здания — 3 100 крон, а наземного — 2 400 крон, то определяющими оказались

экономия в 55% электроэнергии и отсутствие свободной площади для наземного здания в центре. Объект был построен под землей, причем к нему пристроены подземный плавательный бассейн и сооружение гражданской обороны общей площадью 40 тыс. кв. м.

Пока, если не учитывать стоимости земли, потенциальная экономия энергии в течение срока эксплуатации здания является определяющим фактором при выборе варианта его размещения. При сопоставлении стоимости строительства и эксплуатации жилого дома в течение 12 лет службы при заглубленном и наземном размещении выявлено, что, начиная с седьмого года эксплуатации, вследствие экономии около 60% энергии окупаются первоначальные повышенные расходы.

В целом ресурсосбережение при освоении подземного пространства мегаполисов может включать в себя как снижение материалоемкости строительства с активным сокращением потерь в производственном процессе, так и увеличение темпов и объемов работ путем применения достижений новейшей техники и технологии.

Современные направления развития строительного комплекса в подземном пространстве мегаполисов позволили участникам данного рынка сосредоточить свои усилия на обеспечении соответствия строительных работ требованиям ресурсосбережения, энергоэффективности, экологической безопасности и комфорта проживания в условиях городской среды. И, прежде всего, наибольшим стимулирующим эффектом повышения уровня ресурсосбережения и энергоэффективности городского подземного строительства обладает система мотивации, предусматривающая применение в качестве теоретического и практического инструментария таких элементов, как повышение доходности реализуемых проектов за счет сокращения производственных издержек, специализированная нормативно-законодательная база в этой отрасли, целенаправленные льготы и преференции инвесторам-застройщикам, улучшение состояния окружающей среды[49].

По данным компании Penny Lane Realty, в 2010 г. объем инвестиций девелоперских компаний в энергоэффективное строительство недвижимости в

Москве по сравнению с 2009 г. вырос на 25%. При этом 95% такой недвижимости приходится на офисные и многофункциональные центры, имеющие в своем составе значительную долю подземных площадей.

В целом должна быть сформирована качественная мотивационная система ресурсосбережения и энергоэффективности, предусматривающая и достаточно широкий спектр стимулирующих мер государственной поддержки обеспечения рассматриваемых процессов, включающая содействие в осуществлении инвестиционной деятельности в области экологически безопасного и экономически эффективного городского подземного строительства, а также пропаганду использования принципов бережного отношения ко всем используемым ресурсам.

Для ускорения темпов комплексного освоения подземного пространства российских городов и привлечения к вопросам создания подземной инфраструктуры городов представителей органов государственной власти всех уровней и потенциальных инвесторов Комитет по освоению подземного пространства НОСТРОЙ совместно с саморегулируемой организацией НП «Объединение подземных строителей» и рядом других организаций выступили с инициативой проведения в 2012 г. в Санкт-Петербурге международного форума под названием «Комплексное освоение подземного пространства мегаполисов как одно из важнейших направлений государственного управления развитием территорий». Поддержку выразили Министерство регионального развития РФ и национальные объединения: НОСТРОЙ (строителей), НОП (проектировщиков), НОИЗ (изыскателей).

Данный форум по своему формату и наполнению уникален для России, так как здесь акцентируется внимание не на технических аспектах подземного строительства, а на принципах градостроительного планирования. Основными темами форума станут стратегическое городское планирование, рациональное развитие подземной инфраструктуры и эффективные механизмы создания благоприятного инвестиционного климата и привлекательной для населения городской среды. На лучших примерах зарубежного строительства, которые

основаны на просчитанных, экономически обоснованных и хорошо продуманных проектах, организаторы и участники убедительно докажут, что без развития подземной инфраструктуры невозможно решить наиболее острые проблемы современных городов: транспортные, экологические и социальные.

Выводы:

1. В процессе эксплуатации зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты происходит растепление грунта.
2. Для повышения долговечности зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты необходимо решить задачу по снижению растепления грунта.
3. Существует множество технических решений позволяющих снизить влияние фундамента зданий на температурные поля в грунте.

Глава 2 Постановка задачи и методы решения процесса растепления грунта в условиях вечной мерзлоты.

С материальной точки зрения процесс растепления грунта можно описать уравнением теплопроводности, которое описывает распределение температуры в заданной области пространства и ее изменение во времени. Явление теплопроводности твердых тел состоит в передаче энергии в форме теплоты в неравномерно нагретом теле (без теплового излучения). При этом температура тела $T = f(x, y, z, t)$, изменяется в различных точках тела, где x, y, z – координаты точки, t — время. Вид функции f устанавливается при помощи решения дифференциального уравнения теплопроводности, которое для однородного изотропного тела имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3,a)$$

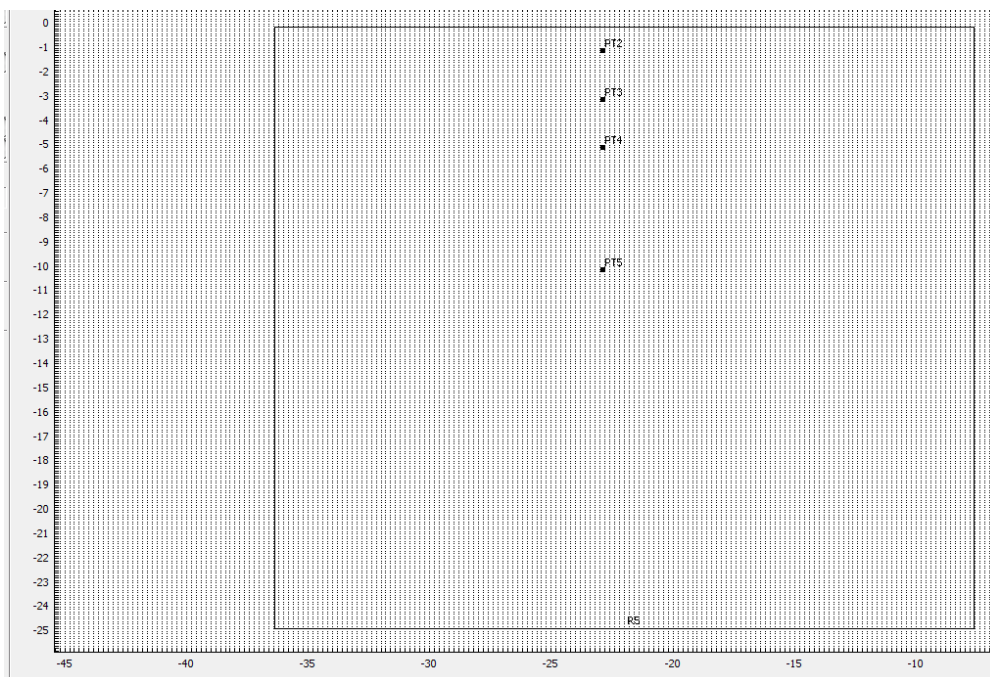
где T - температура, К; $\partial x, \partial y, \partial z$ - декартовы координаты точек; λ - коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м ×К); c - удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг×К); ρ - плотность материала, кг/м³.

Для решения уравнения теплопроводности необходимо задать условия однозначности:

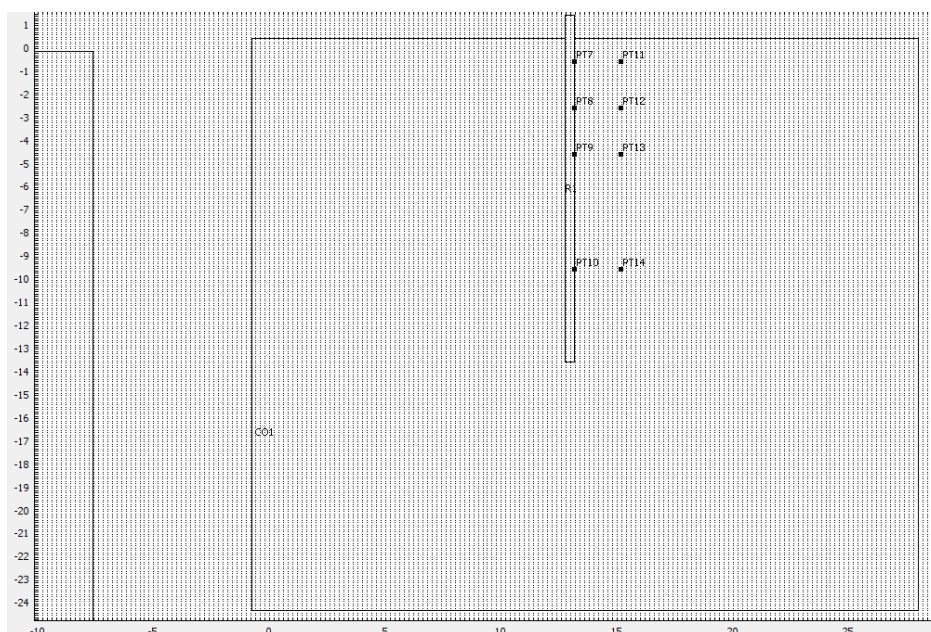
- 1) временные (начальные) условия, характеризующие распределение температур в изучаемом теле в начальный момент времени;
- 2) геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в которых протекает процесс;

- 3) физические условия, характеризующие физические свойства используемых материалов (коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоёмкость);
- 4) граничные условия, характеризующие взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой.

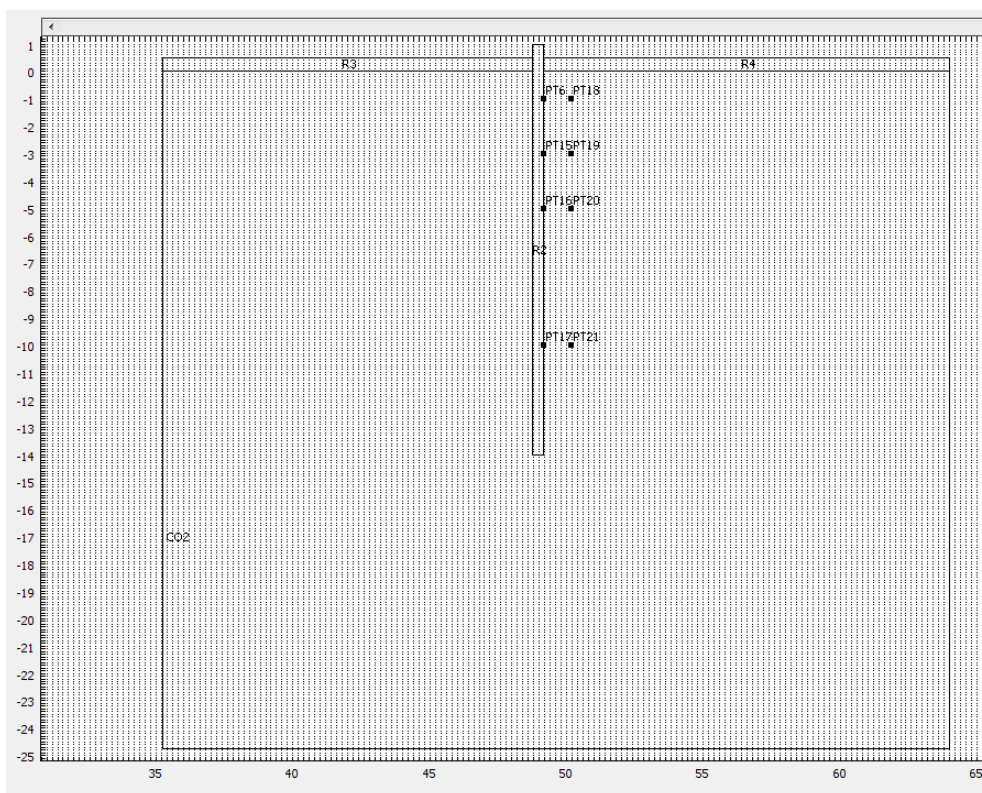
Геометрические размеры расчетной области приведены на рисунке 11.



a)



б)



в)

Рисунок 11 – геометрические размеры расчетной области: грунт(а); грунт и свая(б); грунт, свая и утеплитель(в).

Температуру грунта на поверхности земли принимаем согласно СП131.13330.2012 для г. Дудинка. Нижнюю границу грунта принимаем глубине 10 м, т.к. согласно имеющимся экспериментальным данным, ниже данной границы температура грунта практически постоянна и составляет -3°C . Рассчитываемый период 1 календарный год. Распределение температуры грунта по месяцам на различной глубине представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Температура грунта в Норильске на различной глубине.

Дата	Температура грунта, $^{\circ}\text{C}$, на глубине	
	0,00 м	25 м
январь	-28,20	-10
февраль	-27,30	-10
март	-21,90	-10

апрель	-15,30	-10
май	-5,60	-10
июнь	+5,80	-10
июль	+13,70	-10
август	+10,90	-10
сентябрь	+3,80	-10
октябрь	-8,50	-10
ноябрь	-20,60	-10
декабрь	-24,90	-10

В таблицу 3 приведены теплофизические свойства грунта.

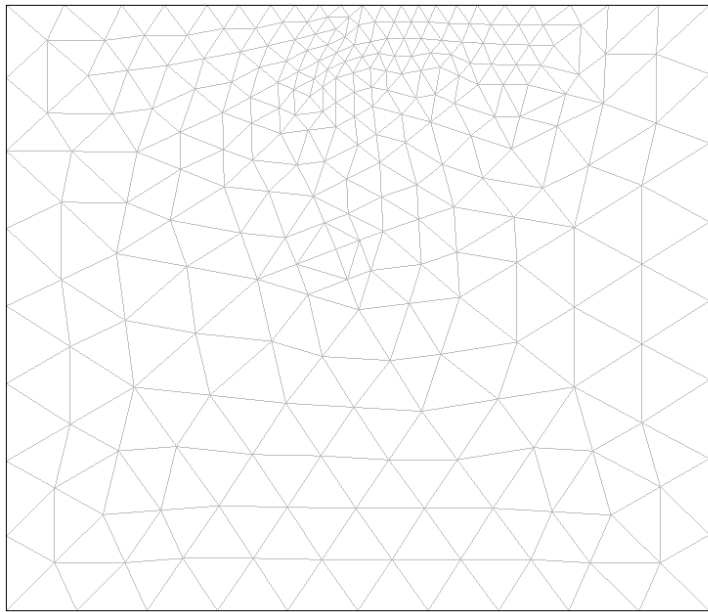
Таблица 3 – Теплофизические свойства грунта

Грунты							
талый				мерзлый			
плотность (сухого грунта) $\rho_{ст}, \text{т/м}^3$	суммарная влажность $W_{tot}, \text{доли единицы}$	теплопроводность, $\lambda_{th}, \text{Вт/(м}\times\text{ч}\times\text{°C)}$	теплоемкость $C_{th}, \text{Дж/(м}^3\text{х}^\circ\text{C)}$ $10^{-6} \text{ [ккал/(м}^3\text{х}^\circ\text{C)]}$	плотность (сухого грунта) $\rho_{ст}, \text{т/м}^3$	суммарная влажность $W_{tot}, \text{доли единицы}$	теплопроводность, $\lambda_{th}, \text{Вт/(м}\times\text{ч}\times\text{°C)}$	теплоемкость $C_{th}, \text{Дж/(м}^3\text{х}^\circ\text{C)}$ $10^{-6} \text{ [ккал/(м}^3\text{х}^\circ\text{C)]}$
-	-	-	-	1,7	0,03	0,56 (0,51)	1,35 (320)
1,8	0,02	0,47 (0,41)	1,40 (330)	-	-	-	-
2,2	0,03	1,13 (0,98)	2,30 (550)	2,2	0,03	1,14 (0,98)	2,05 (490)
-	-	-	-	1,6	0,06	0,52 (0,44)	1,35 (320)
1,9	0,08	1,13 (0,98)	2,15(510)	1,9	0,07	0,92 (0,79)	2,20 (525)
2,1	0,08	1,18 (1,02)	2,50 (595)	2,1	0,08	1,26 (1,08)	2,25 (535)
2,2	0,07	1,87 (1,61)	2,50 (595)	2,2	0,07	1,09 (0,94)	1,80 (420)
1,6	0,12	0,63 (0,54)	2,05 (490)	1,6	0,11	0,54 (0,49)	1,80 (420)
1,8	0,12	0,85 (0,73)	2,30 (550)	1,8	0,12	0,78 (0,67)	2,20 (525)
2,2	0,12	1,55 (1,33)	3,00 (715)	2,2	0,13	0,84 (0,72)	2,75 (655)
1,6	0,13	0,68 (0,58)	2,15 (510)	1,6	0,13	0,76 (0,66)	1,75 (420)
1,8	0,13	1,02 (0,87)	2,30 (550)	1,8	0,13	1,12 (0,97)	2,35 (560)
2,0	0,13	1,31 (1,12)	3,05 (725)	2,0	0,13	1,37 (1,14)	2,55 (610)
1,6	0,19	1,09 (0,93)	2,80 (665)	1,6	0,19	1,09 (0,94)	2,25 (535)
1,8	0,19	1,31 (1,13)	3,00 (715)	1,8	0,19	1,20 (1,03)	2,30 (550)
1,9	0,19	1,82 (1,39)	3,20 (760)	1,9	0,19	1,35 (1,16)	2,70 (645)
1,6	0,23	1,21 (1,04)	3,15 (750)	1,6	0,24	1,05 (0,91)	2,30 (550)
1,8	0,24	1,56 (1,35)	3,35 (795)	1,8	0,24	1,20 (1,03)	2,35 (560)

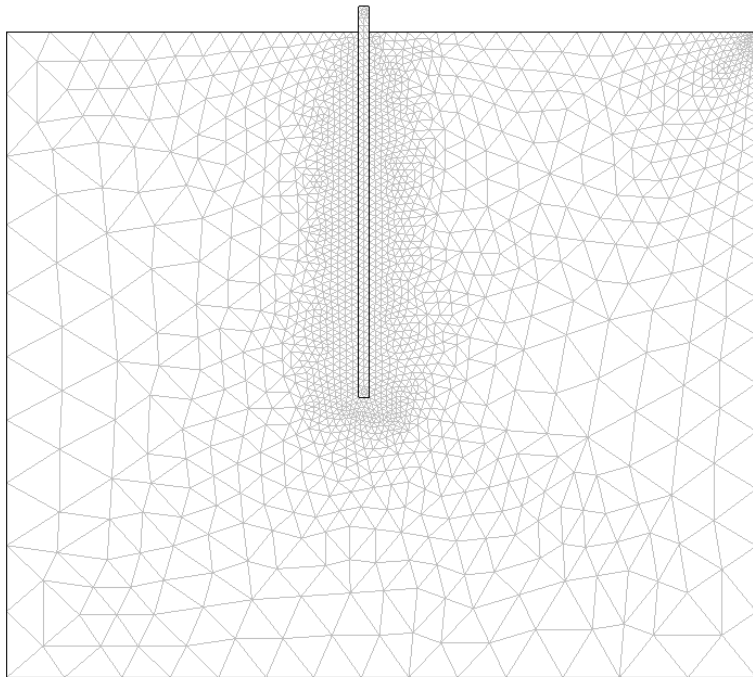
Для решения уравнения теплопроводности используем программное обеспечение COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов. С этим программным пакетом вы можете расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке MATLAB. Данное пособие рассматривает основы работы с программой только через графический интерфейс.

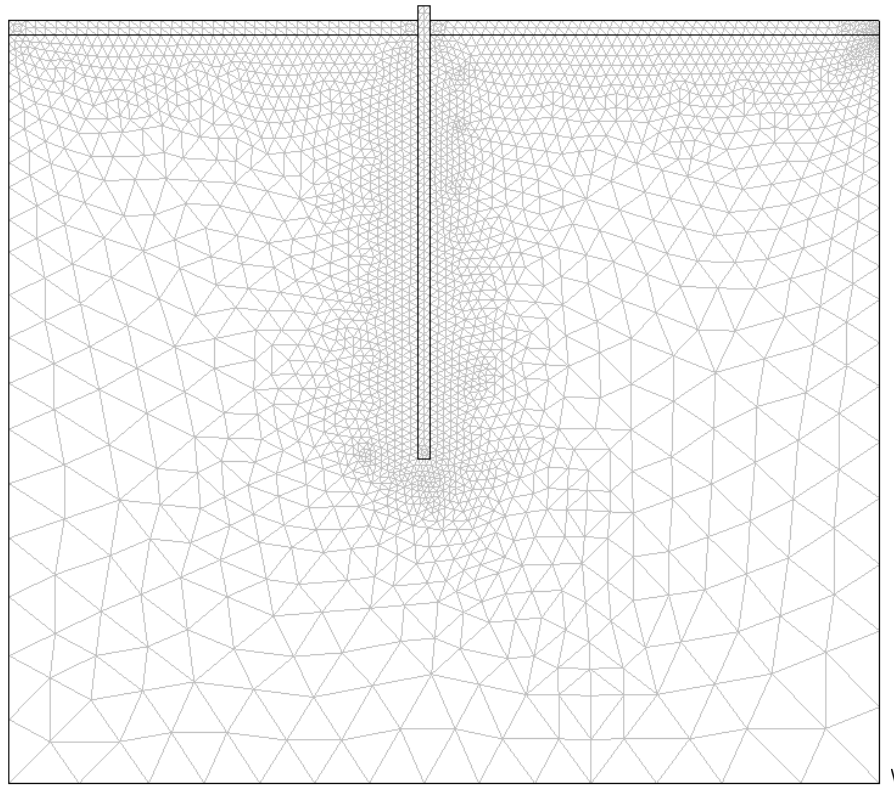
Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечноэлементный анализ вместе с сеткой учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики, таких как: акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, соплат и многих других. Расчетная сетка приведена на рисунке 12.



A)



б)



в)

Рисунок 12 – Расчетная сетка: грунт(а); грунт и свая(б); грунт, свая и утеплитель(в).

Несущая способность грунта определяться согласно[50]:

$$P = \frac{m}{k_n} (RF + R_{cm}F_{cm}), \quad (4)$$

m – коэффициент условия работы; k_n – коэффициент надежности; R – несущая способность грунта, кгс/см²; R_{cm} – сопротивление грунта кгс/см²; F – площадь контакта, м².

На рисунке 13 приведены зависимости несущей способности грунта и его сопротивления от температуры.

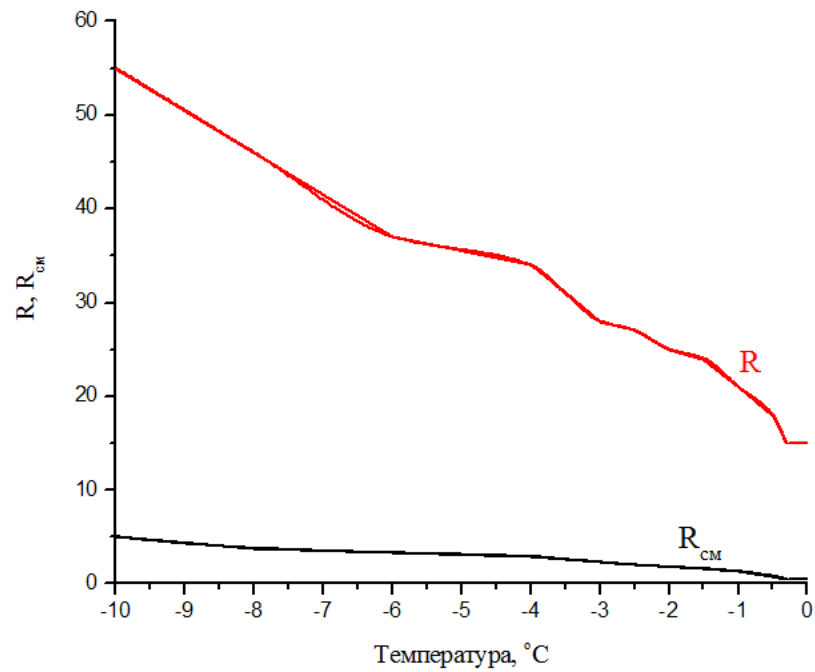


Рисунок 13 – температурные зависимости несущей способности грунта и его сопротивления.

Выводы:

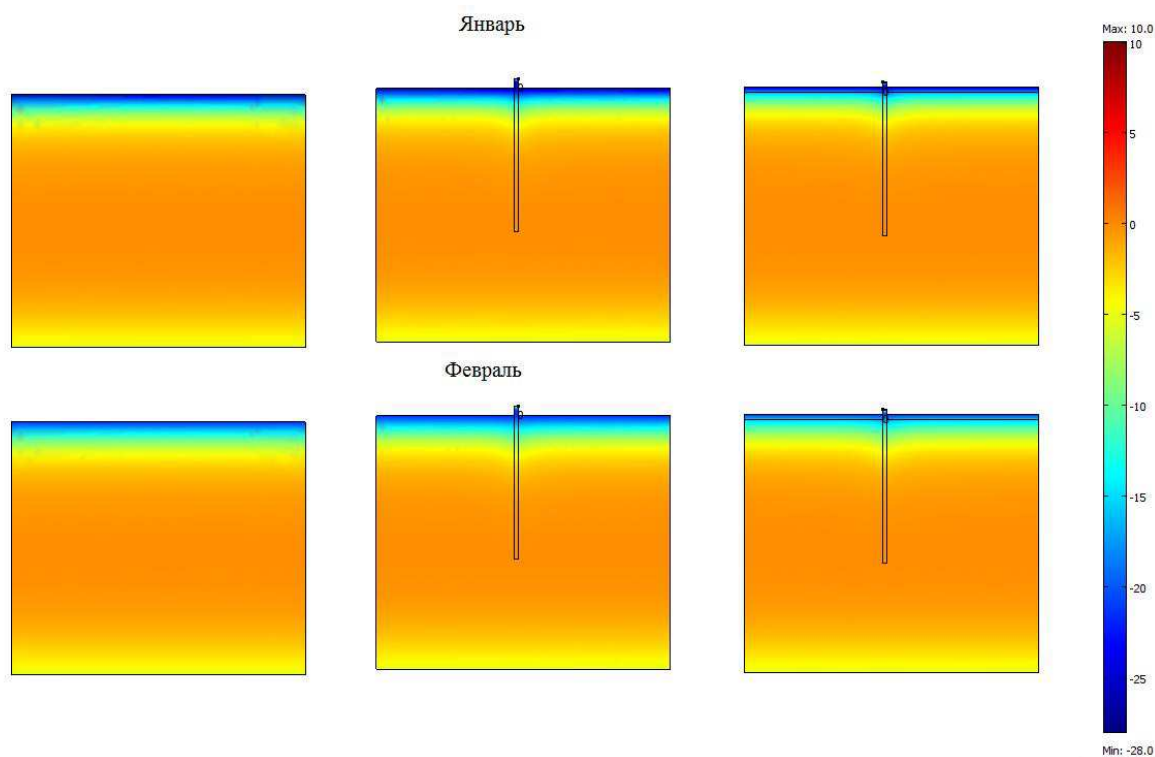
1. Решив уравнение теплопроводности возможно определить изменение температурных полей в течении года.
2. Основываясь на решении уравнения теплопроводности и температурной зависимости несущей способности грунта и его сопротивления можно определить изменение несущей способности грунта за годовой период эксплуатации здания.
3. Решать задачу растепления грунта и изменения его несущей способности оптимально в пакете программ COMSOL Multiphysics.

Глава 3 Исследование влияния свайного фундамента на растепления грунта.

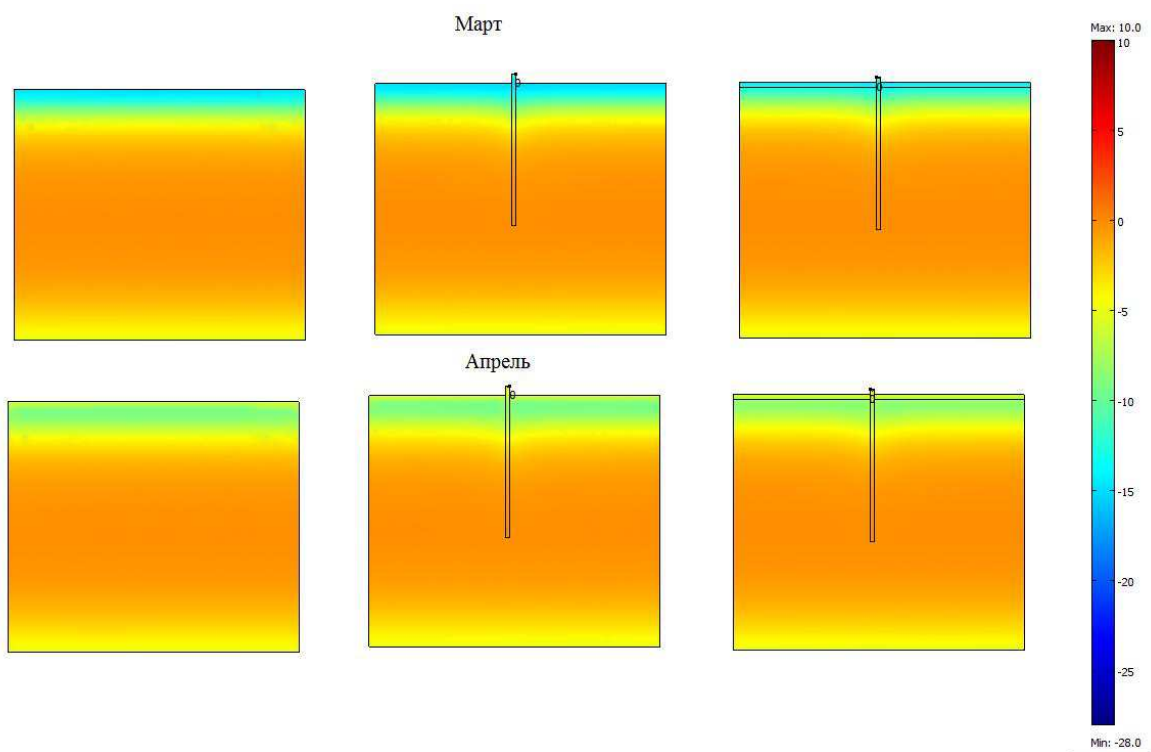
Основным параметром влияющим на теплофизические свойства грунта является влажность, вследствие высокой теплоемкости воды ($4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\times\text{К})$) и высокой теплоты кристаллизации ($3,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$). Повышение влажности увеличивает тепловую инерцию системы. Для оценки температурных профилей рассмотрим крайние значения, представленные в таблице 3.

Решим уравнение теплопроводности для годового цикла изменения температур, для граничных условия (таб. 2 и таб.3) и геометрических размеров (рис.11). Температурные поля для грунта плотности $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$ и влажности 8% представлен на рисунке 14.

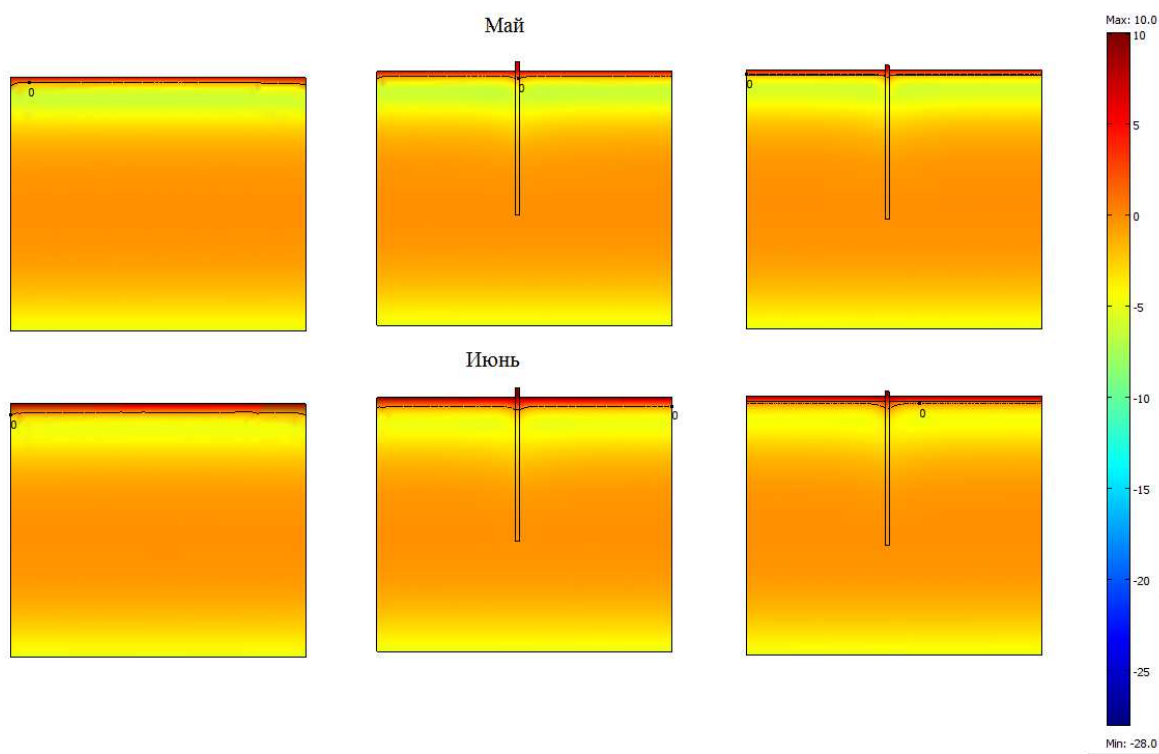
Температурные поля для грунта плотности $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ и влажности 24% представлен на рисунке 15.



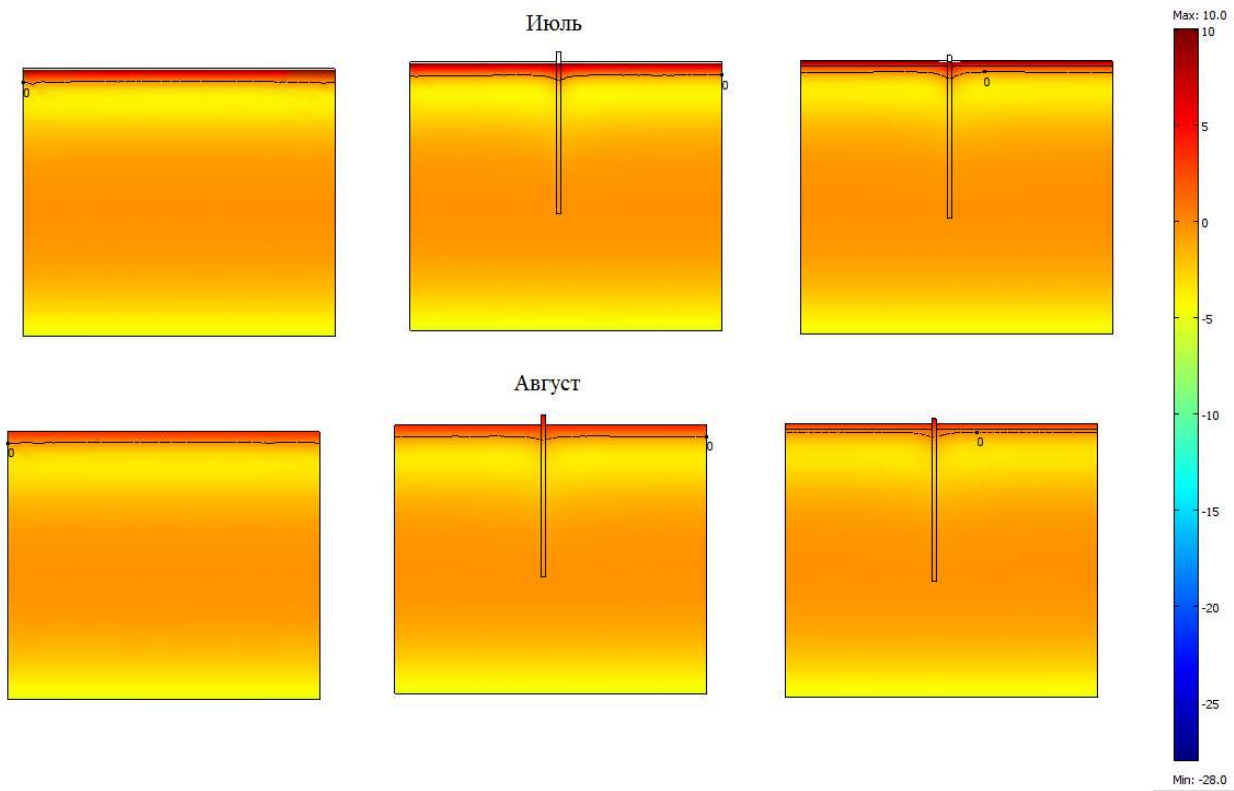
a)



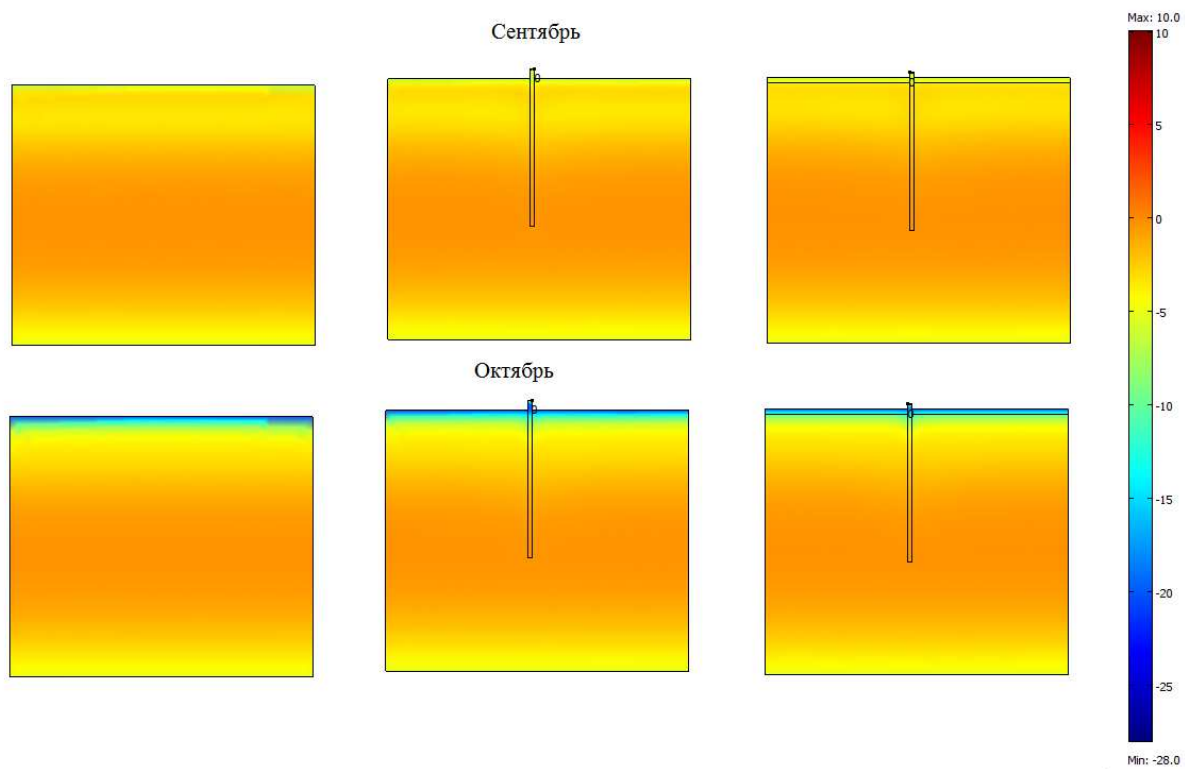
б)



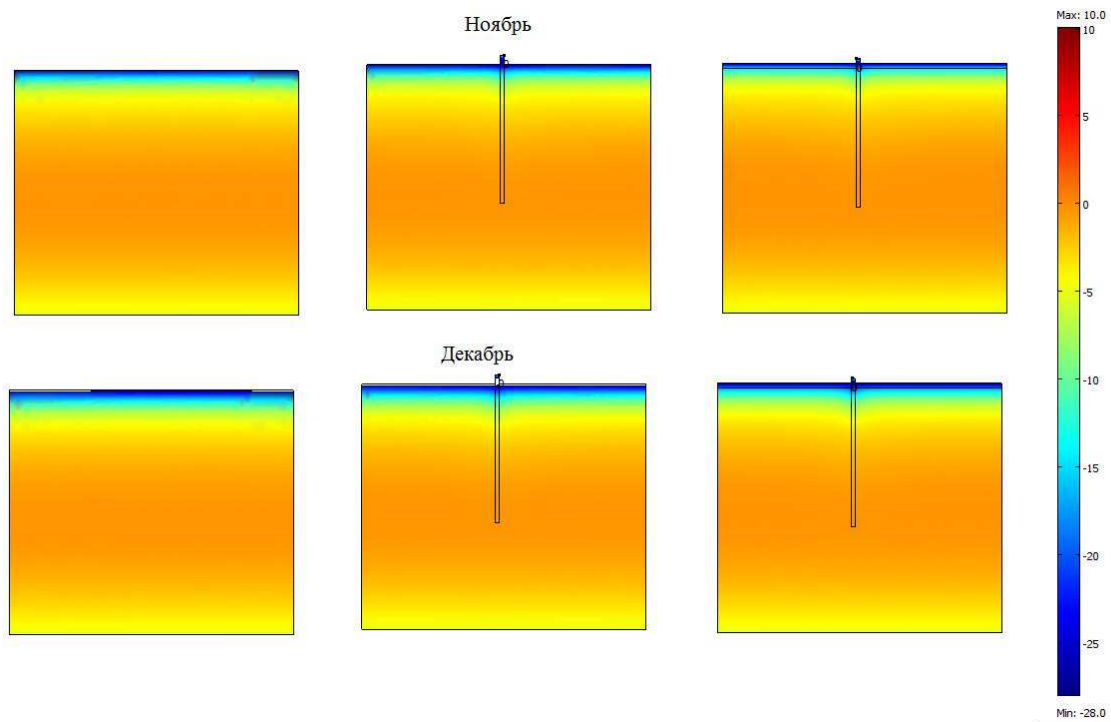
в)



Г)

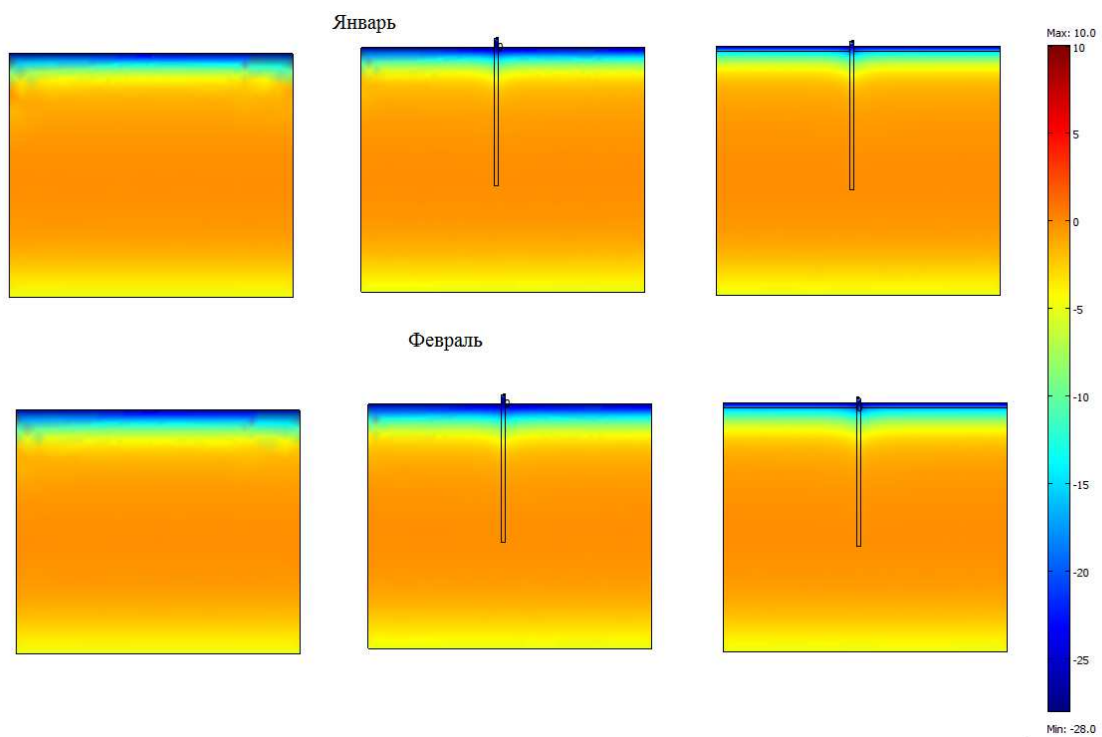


Д)

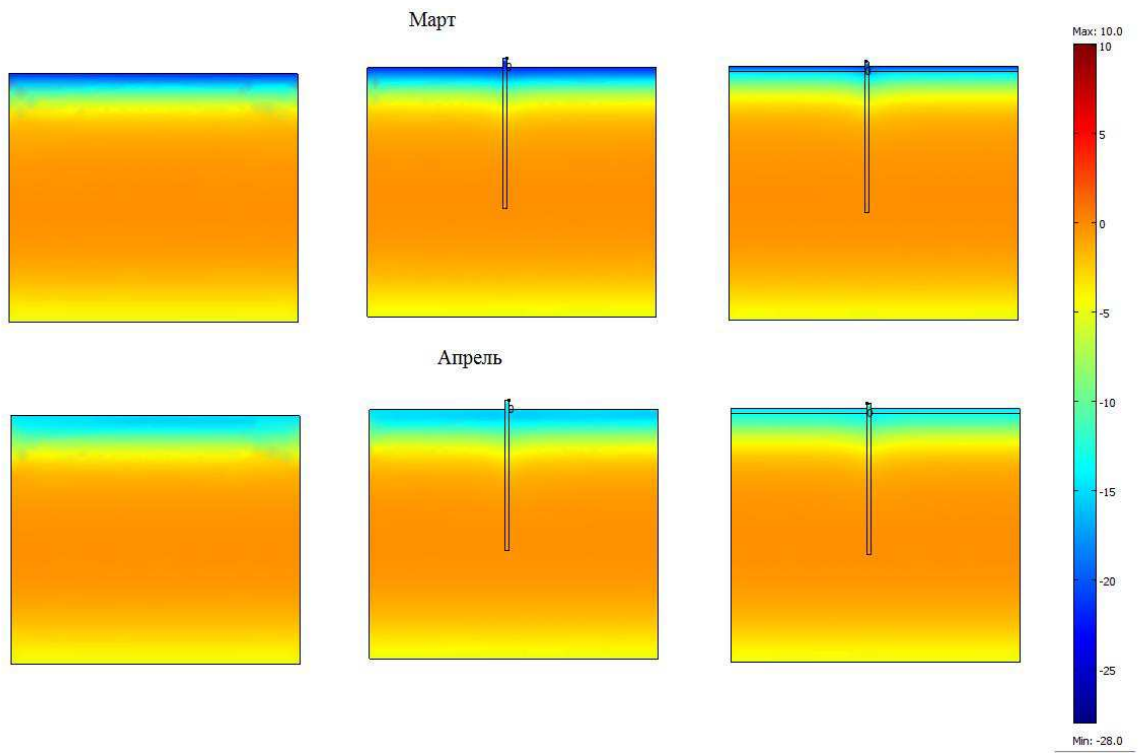


е)

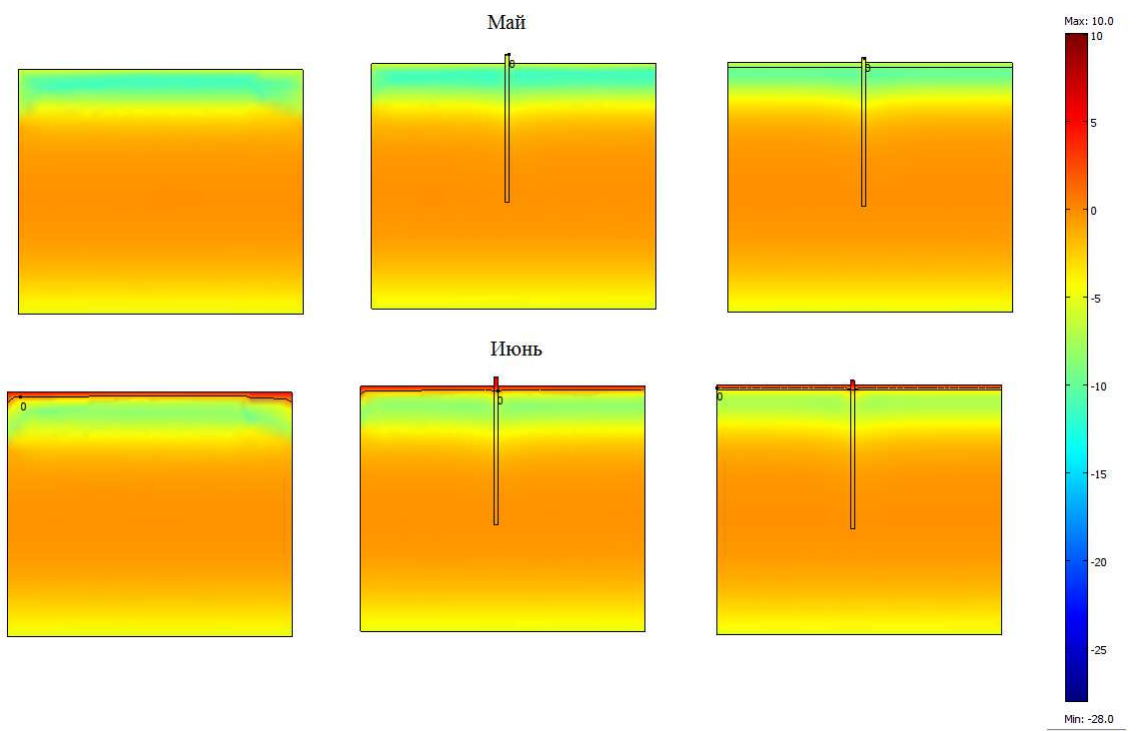
Рисунок 13 – Температурные поля для грунта плотности 1900 кг/м^3 и влажности 8%: январь и февраль(а), март и апрель(б), май и июнь(в), июль и август(г), сентябрь и октябрь(д), ноябрь и декабрь(е).



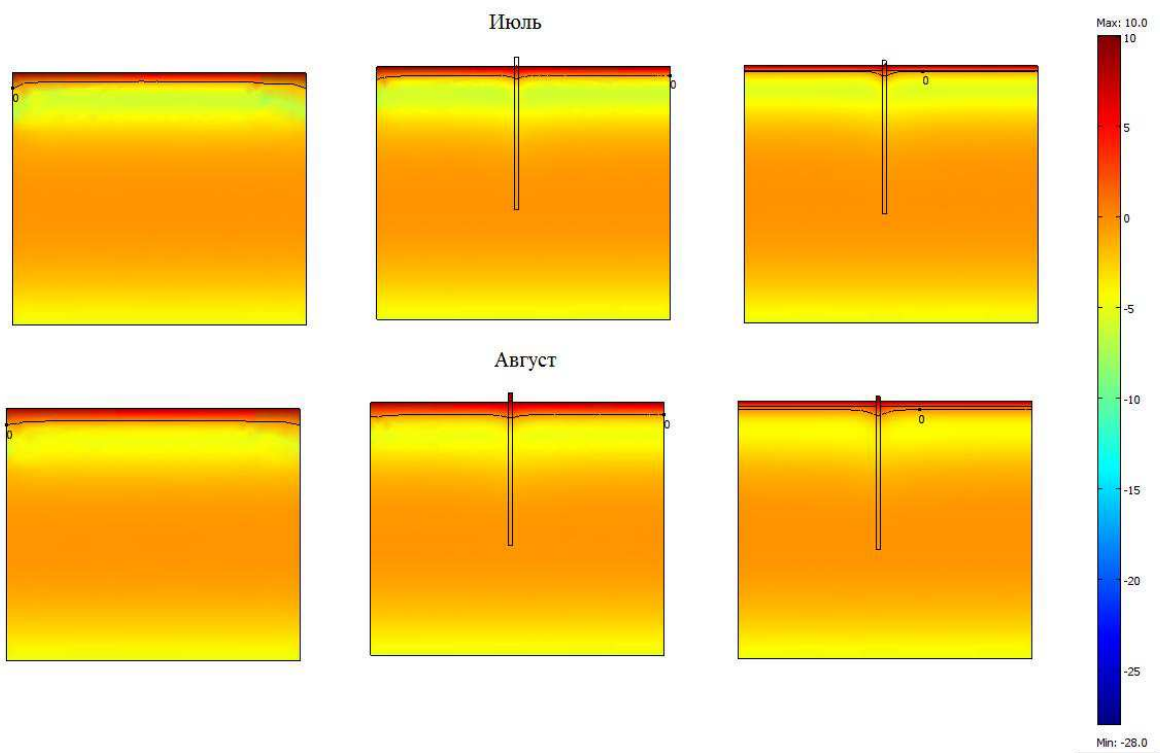
а)



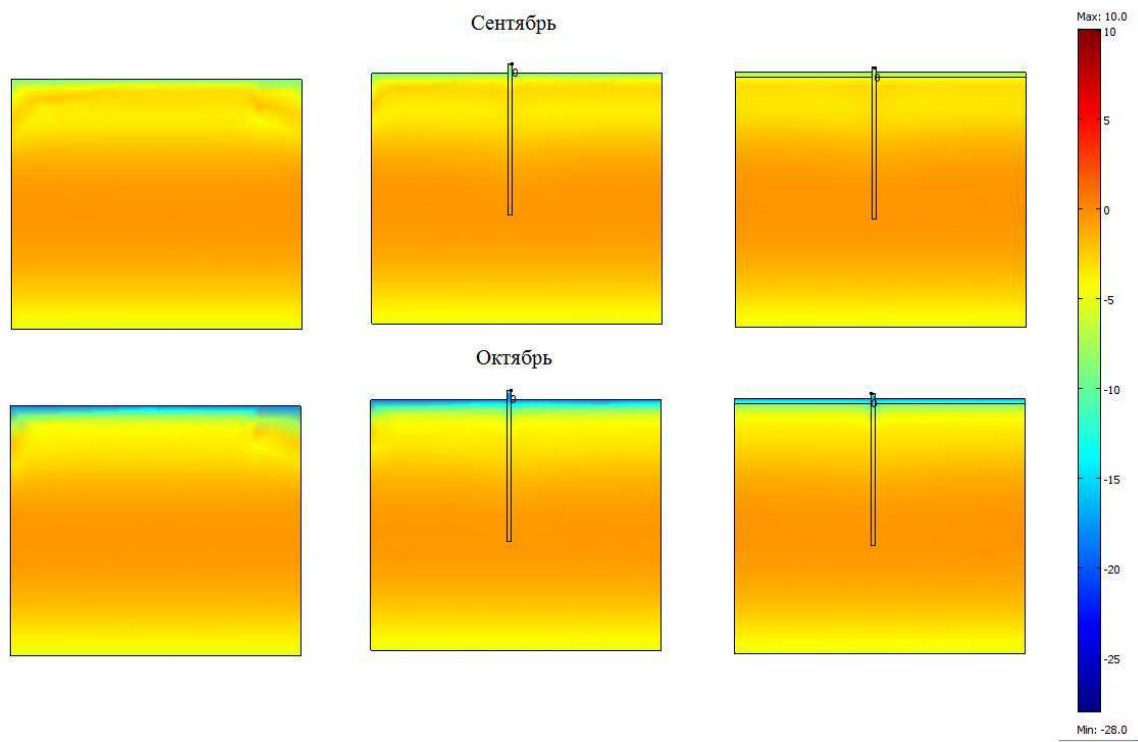
б)



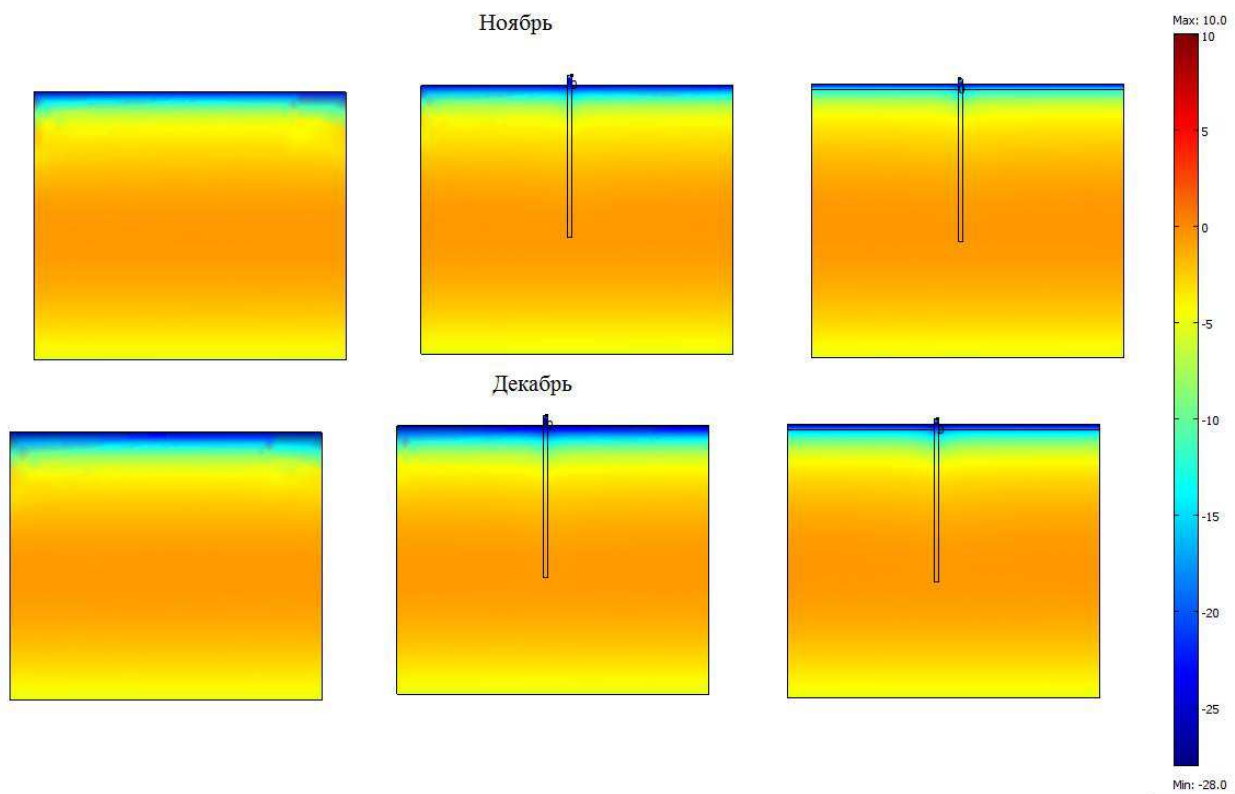
в)



Г)



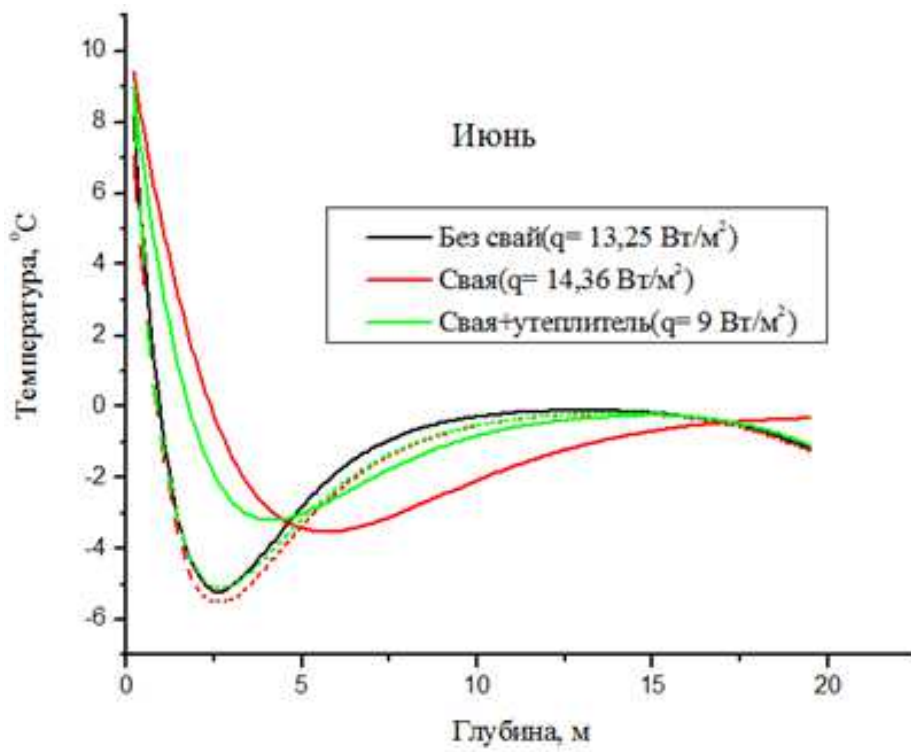
Д)



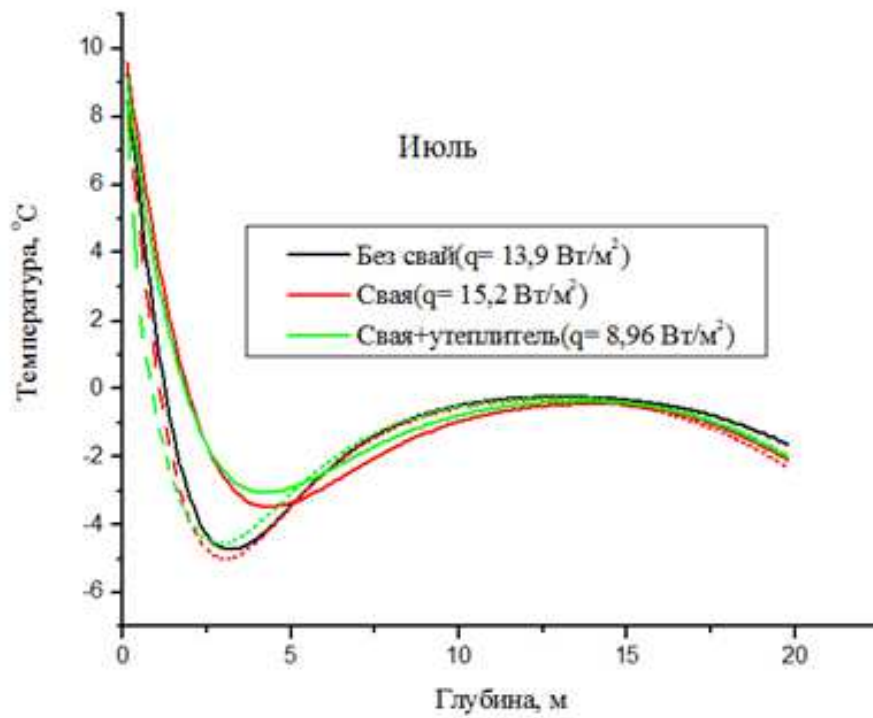
е)

Рисунок 14 – Температурные поля для грунта плотности 1800 кг/м^3 и влажности 24%: январь и февраль(а), март и апрель(б), май и июнь(в), июль и август(г), сентябрь и октябрь(д), ноябрь и декабрь(е).

Как следует из рисунков 13 и 14 повышение влажности приводит к увеличению тепловой инерции системы. На первом этапе растепления май, июнь и июль температура запаздывает по сравнению с внешними условиями. В августе и сентябре влияние вечномерзлого грунта начинает преобладать. Наличие свайного фундамента, ввиду высокого коэффициента теплопроводности железобетона по сравнению с грунтом, приводит к образованию избыточного теплового потока. В свою очередь избыточный тепловой поток приводит к образованию конуса растепления. Для оценки влияния конуса растепления на тепловые поля рассмотрим значение температурный профиль на свай и на расстоянии 1 м от свай. Температурный профиль для июня и июля представлен на рисунке 15 для грунта плотности 1900 кг/м^3 и влажности 8%.



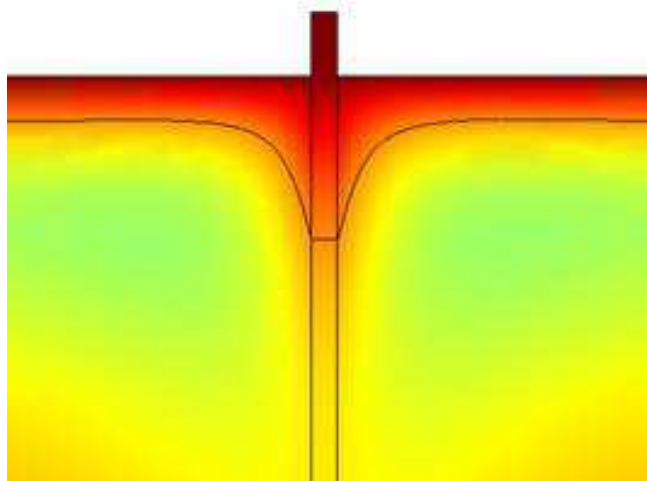
а)



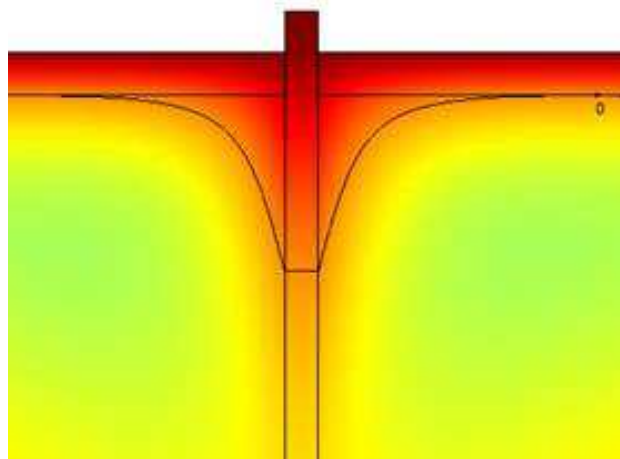
б)

Рисунок 15 – Температурные профиль для грунта плотности 1900 кг/м^3 и влажности 8%: июнь(а), июль(б).

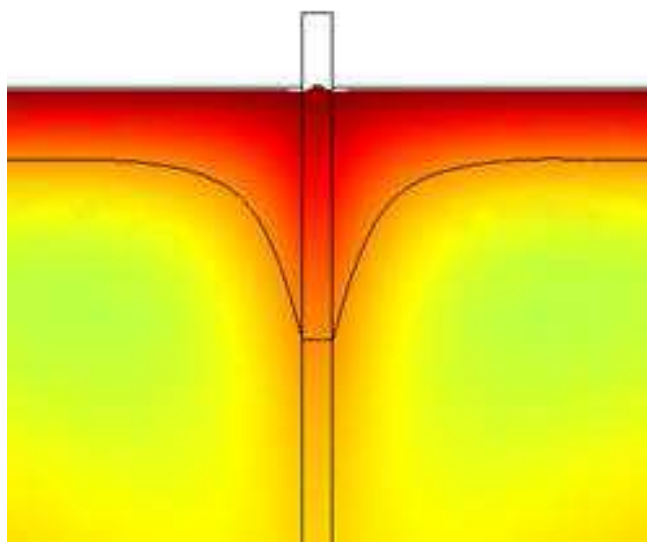
Площадь конуса растепления характеризует влияние свайного фундамента на температурные поля. Снизить данное влияние возможно путем использования дополнительного утеплителя. На рисунке 16 представлен конус растепления для июня, июля, августа и сентября.



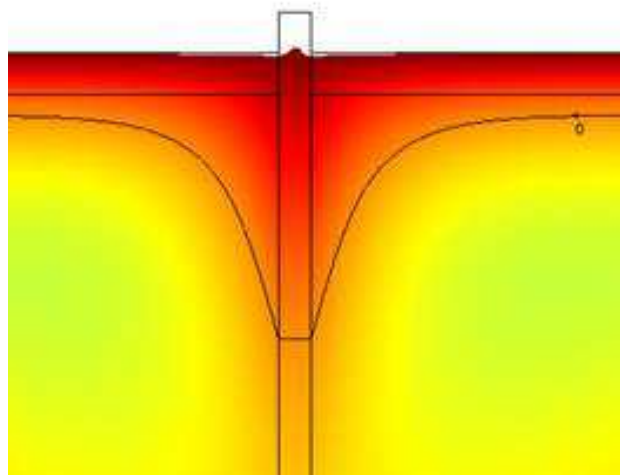
а)



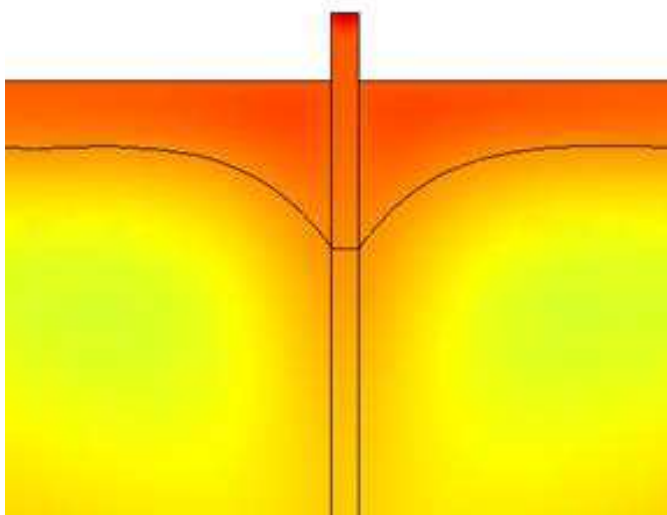
б)



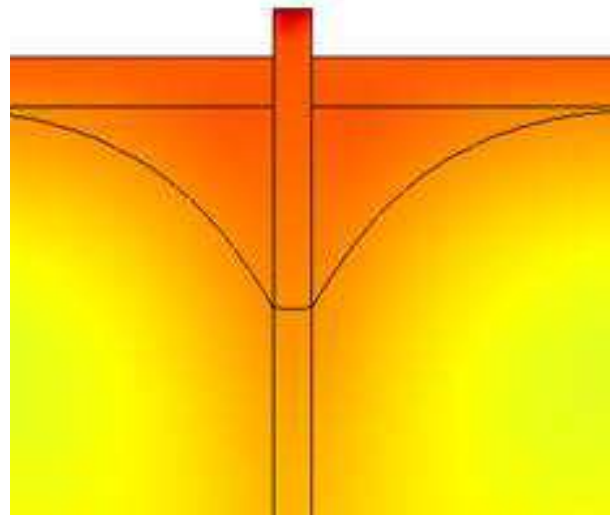
в)



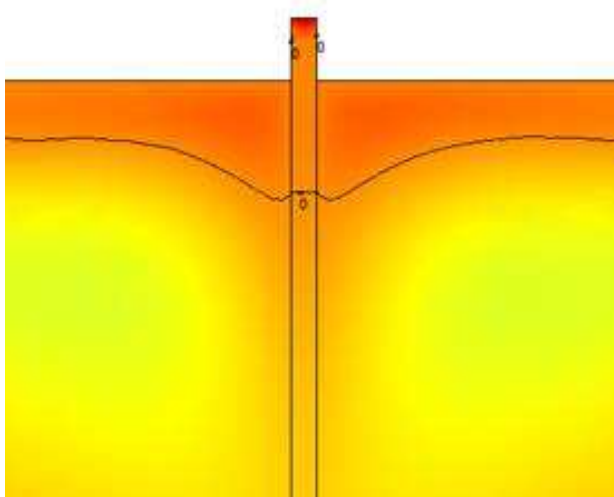
г)



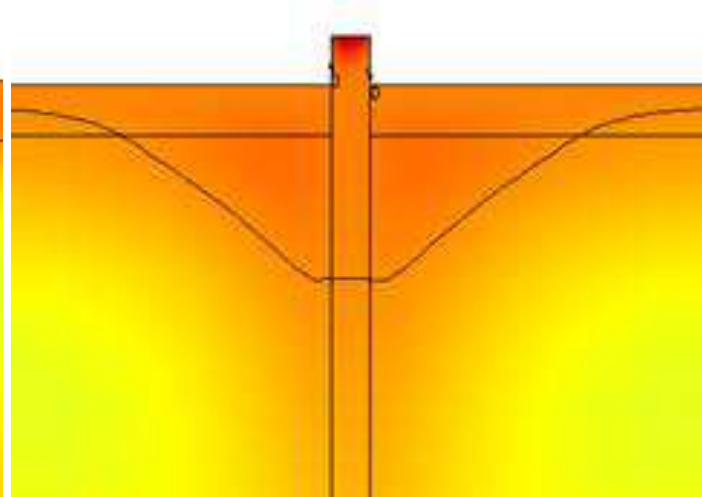
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 16 – Конус растепления для грунта плотности 1900 кг/м^3 и влажности 8%: июнь со сваей(а), июнь грунт со сваей и утеплением(б), июль со сваей(в), июль грунт со сваей и утеплением(г), август со сваей(д), август грунт со сваей и утеплением(е), сентябрь со сваей(ж), сентябрь грунт со сваей и утеплением(ж).

Как следует из рисунка 5 отношение площадей для конуса растепления для грунта со сваей и грунта с утеплителем и сваей для июня, июля, августа и сентября составляет 4,4; 1,8; 1,5 ; 5.

Температурный профиль для июня и июля представлен на рисунке 17 для грунта плотности 1800 кг/м^3 и влажности 24%.

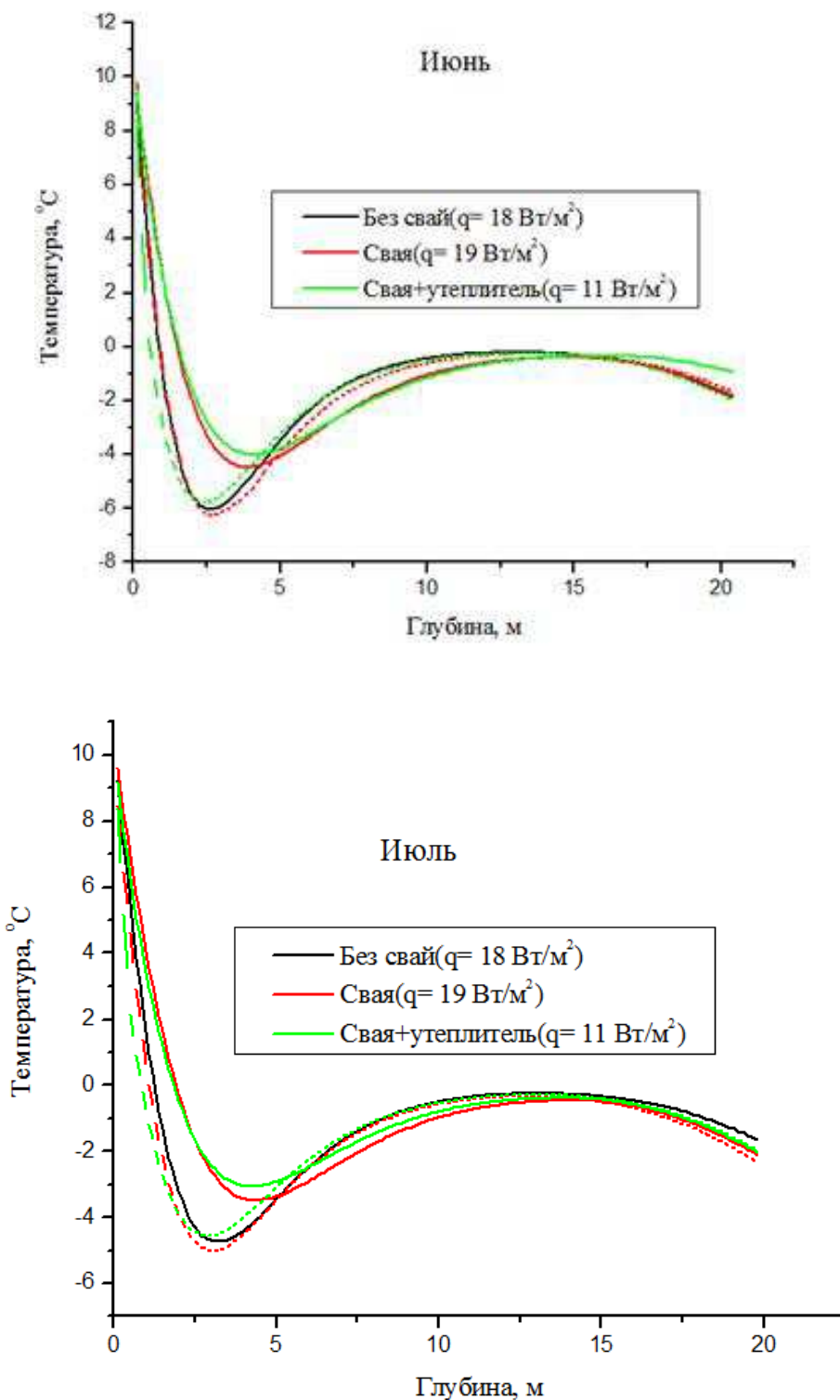
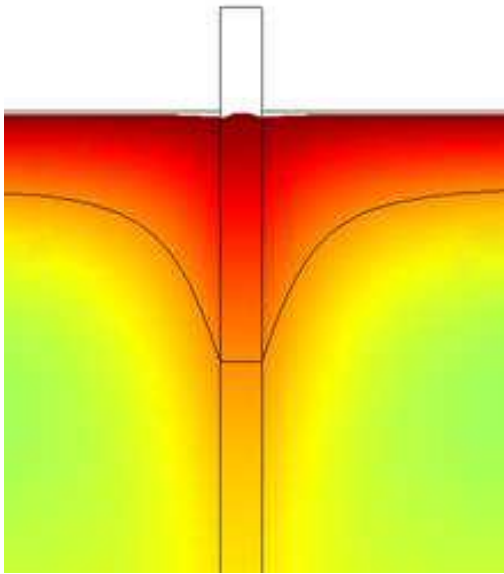
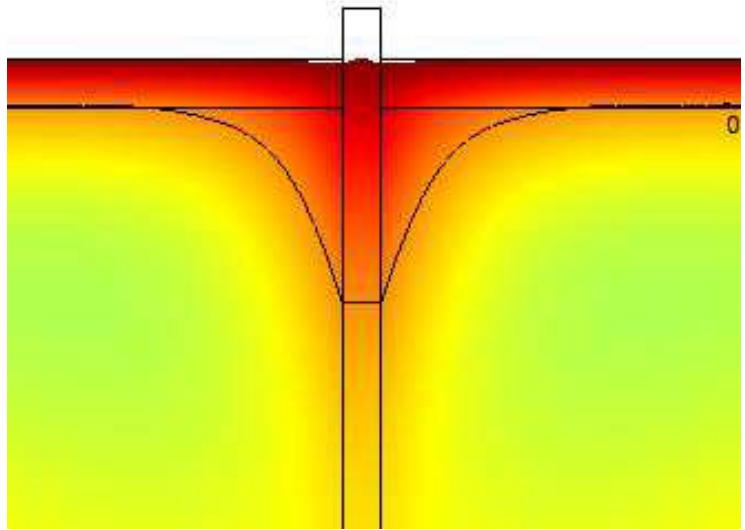


Рисунок 17 – Температурные профиль для грунта плотности 1800 кг/м^3 и влажности 24%: июнь(а), июль(б).

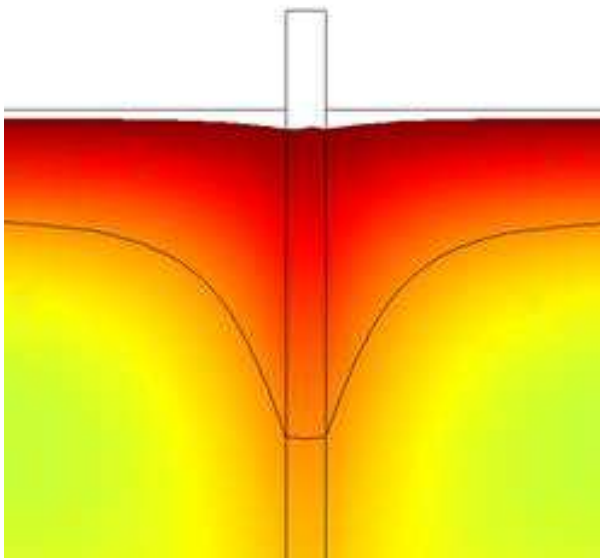
На рисунке 18 представлен конус растепления для июня, июля, августа и сентября.



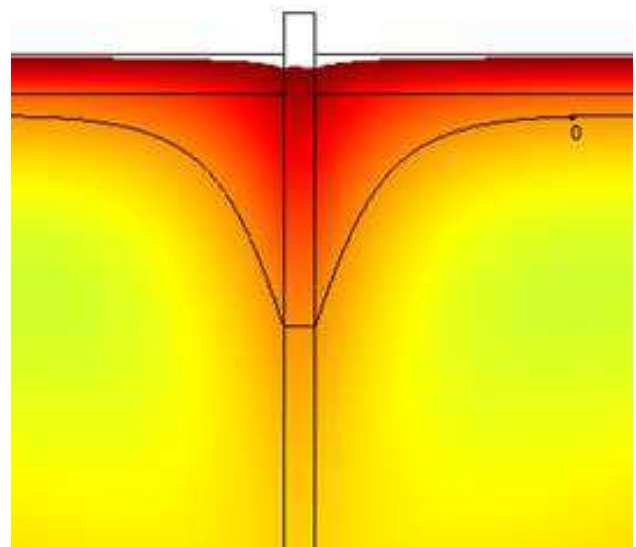
а)



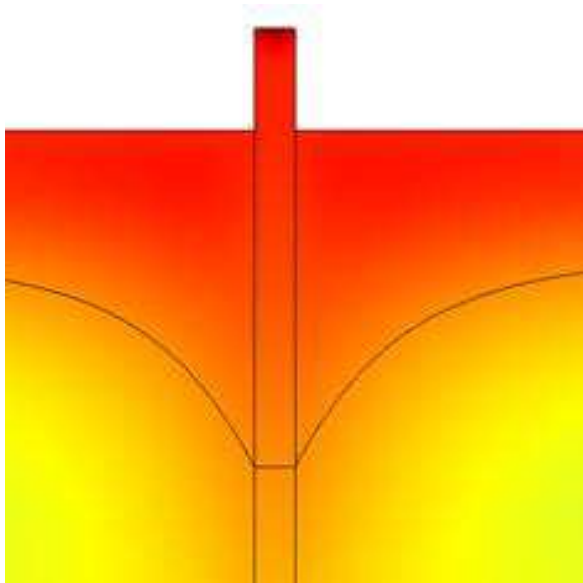
б)



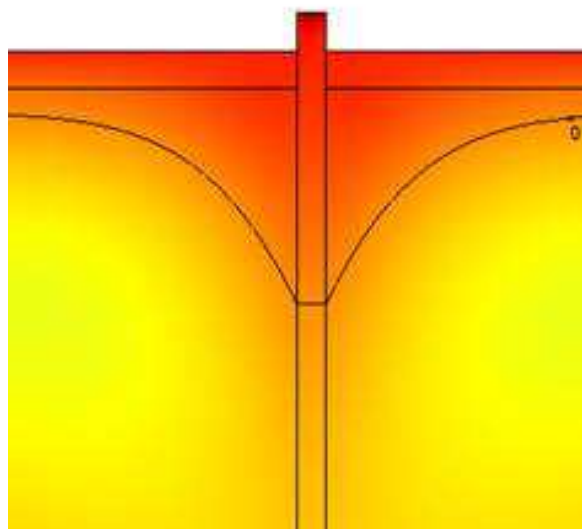
в)



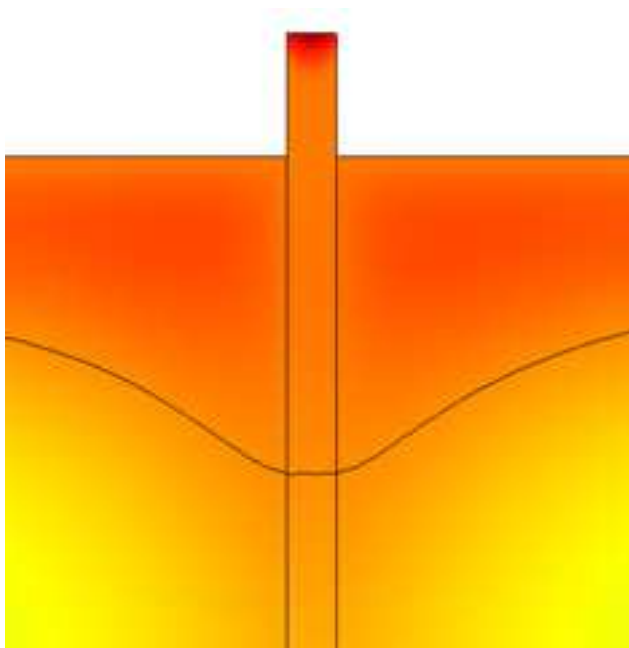
г)



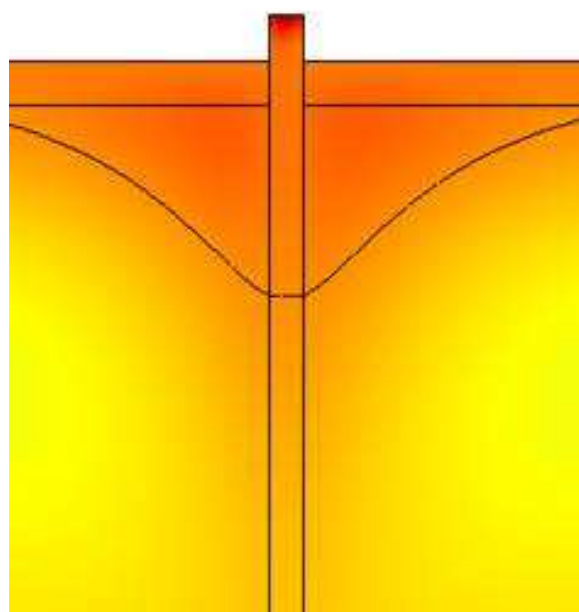
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 18 – Конус растепления для грунта плотности 1800 кг/м^3 и влажности 24%: июнь со сваей(а), июнь грунт со сваей и утеплением(б), июль со сваей(в), июль грунт со сваей и утеплением(г), август со сваей(д), август грунт со сваей и утеплением(е), сентябрь со сваей(ж), сентябрь грунт со сваей и утеплением(ж).

Оценим влияние конуса растепления на несущую способность грунта. Изменение несущей способности грунта в течение года, при эксплуатации свайного фундамента, приведены на рисунке 19.

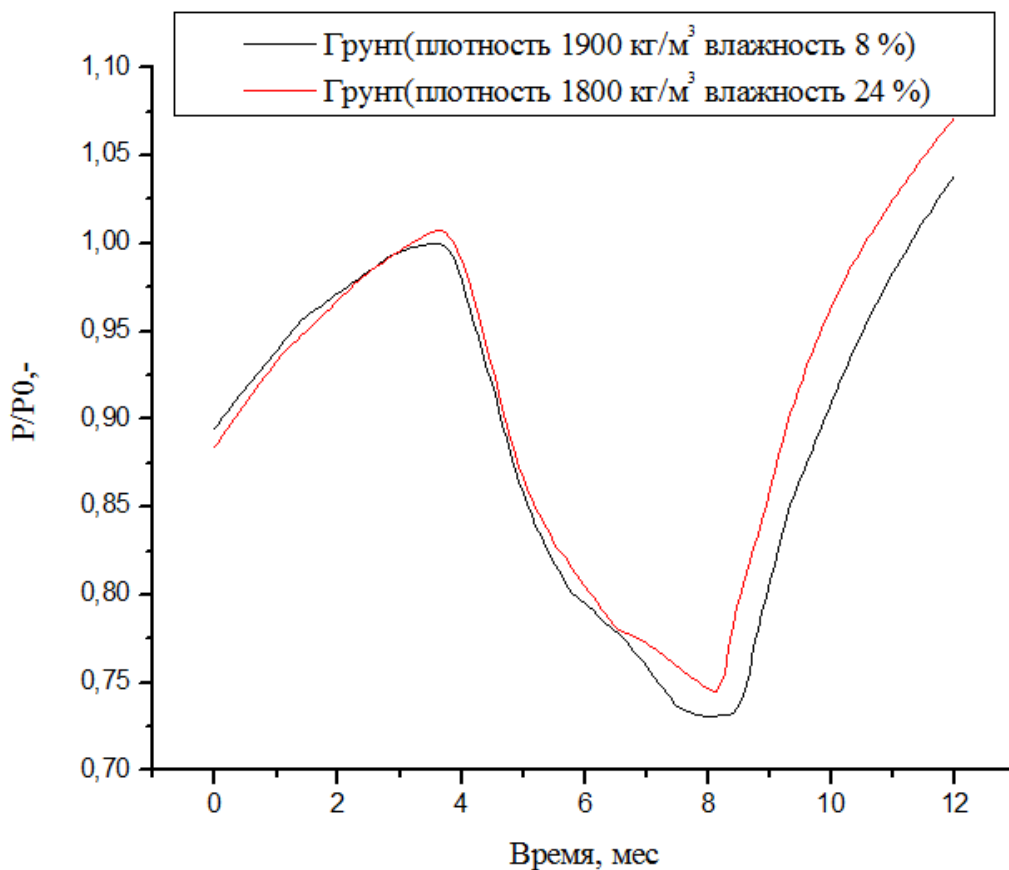


Рисунок 19 – Изменение несущей способности грунта при эксплуатации свайного фундамента в течение года.

Как следует из рисунка 19, в летний период времени происходит снижение несущей способности свайного фундамента на 25 %. Данный факт необходимо учитывать при строительстве зданий в условиях вечной мерзлоты.

Выводы:

Наличие свай приводит к увеличению теплового потока в летний период времени на 7-8 %. Использование дополнительного утепления позволяет снизить общие тепловые потери. Однако утеплитель нужно использовать в летнее время.

В окрестностях свай образуется конус растепления, использование утеплителя позволяет снизить размер конуса от 2 до 5 раз.

Колебание несущей способности грунта в течении года составляет порядка 25%, минимальная несущая способность в июле.

При проектировании свайного фундамента необходимо учитывать температурные изменения в грунте, а раздел с теплофизическими расчетами грунта желательно включить в проектную документацию.

Заключение.

В рамках работы было исследовано влияние свайного фундамента на процессы теплообмена в грунте. Влияние оценивалось путем решения уравнения теплопроводности в пакете программ COMSOL Multiphysics.

Наличие свай приводит к образованию дополнительного теплового потока, величина которого составляет 7-8 % от общей величины. Снизить данное влияние можно за счет использования утеплителя. При этом целесообразно использовать утеплитель в летний период времени. Дополнительный тепловой поток приводит к образованию конуса растепления. Использование дополнительного утепления приводит к снижению площади конуса растепления от 2 до 5 раз. Образование конуса растепления приводит к снижению несущей способности грунта, причем в летний период времени несущая способность снижается на 25 %. Данный факт необходимо учитывать при проектировании зданий в условиях вечной мерзлоты. Соответственно, при проектировании свайного фундамента необходимо учитывать температурные изменения в грунте, а раздел с теплофизическими расчетами грунта желательно включить в проектную документацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зона Севера// Электронная библиотека [Электронный ресурс]: libraryno.ru - Режим доступа: http://libraryno.ru/5-5-zona-severa-region_ekonom/
2. Алёшина Т. Строительство на мерзлоте: опыт и новшества //Газета СФУ "Сибирский форум. Интеллектуальный диалог" 2010 [Электронная версия] - Режим доступа: <http://sibforum.sfu-kras.ru/node/>.
3. Север как проблемная территория // Студопедия [Электронный ресурс]: studopedia.org - Режим доступа: <https://studopedia.org/8-151275.html>.
4. Бурение в вечной мерзлоте больше не проблема//Приборостроение//Наука и технологии [Электронный ресурс]: neftegaz.ru - Режим доступа: <https://neftegaz.ru/science/view/963-Burenie-v-vechnoy-merzlotte-bolshe-ne-problema> .
5. Многолетняя мерзлота//Википедия - свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: wikipedia.org - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многолетняя_мерзлота .
6. Растепление мерзлой породы//Буровой портал [Электронный ресурс]: drillings.ru - Режим доступа: <http://www.drillings.ru/rastep> .
7. Официальный сайт города Норильска [Электронный ресурс]: norilsk-city - Режим доступа: <http://www.norilsk-city.ru/about/1242/>
8. Свод Правил (СП 25.13330.2012) «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.04-88. Издание официальное». Минрегионразвития РФ. М., 2012г.
9. ГОСТ 25100-95 «Грунты. Классификация». — М., 1995.
10. ГОСТ 25358-82. «Грунты. Методы полевого определения температуры». — М., 1982.
11. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». — М., 2010.
12. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985.

13. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. – Взамен СП 23-101-2000 ; введ. 01.06.2004. – Москва : ФГУП ЦПП, 2004. – 140 с.

14. Статистическое моделирование работы системы ГЕТ, установленной в основании нефтяного резервуара /Г.М. Долгих и др.// Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С.70—77.

15. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика /М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. 2-е изд., доп. и перераб. Киев: Факт, 2005. 704с.:

16. Рило И.П. Влияние внутренних устройств термостабилизатора на процессы теплопереноса в двухфазных системах /И. П.Рило, К. А.Желудкова, Д. А.Клещин// Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы. Труды международной конференции /под ред. В.П. Мельникова и Д.С. Дроздова. Тюмень: Изд-во Эпоха, 2015. 472 с.

17. Пахомов Г. Я. Основания и фундаменты. М.: Изд-во Эксмо, 2010. 250с.

18. Федотов С. И., Коперин И. Ф., Андреев В. И. Строительство в вечномерзлых грунтах. М.: Изд-во «Высшая школа», 2008. 220 с.

19. Домокеев А. Г. Грунты. М.: Изд-во «Высшая школа», 2006.

20. Кроник Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне// Материалы IV Конференции геокриологов России, Том 3., ч. 8, С. 285 – 292, М., Университетская книга, 2011.

21. Ибрагимов Э.В., Гамзаев Р.Г. Системы термостабилизации грунта для зданий и сооружений с проектным решением полов по грунту// Журнал нефтегазового строительства, 2014, № 1, С. 40 – 45.

22. Хрусталева Л.Н. Проблемы инженерной геокриологии на рубеже XXI века. // Криосфера Земли, 2000, том IV, №1, с. 3 – 10.

23. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям и инженерно-геотехническим исследованиям// ДОО «Спецгазавтотранс», 2015.

24. Ибрагимов Э.В., Кроник Я.А., Куплинова Е.В. Экспериментальные исследования инновационных конструкций пологонаклонных термостабилизаторов грунта// Вестник ТГАСУ № 4, 2014.

25. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебное пособие для строит. спец. вузов / Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др.; под ред. С.Б. Ухова. — 4-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2007. — 566с.:ил
26. Бикбау М.Я., Высоцкий Д.В. Система «ИМЭТ» – наше решение для строительства на вечной мерзлоте // Время Инноваций [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <http://time-innov.ru/page/jurnal/2013-6/rubric/2/article/34> (дата доступа: 15.12.2016).
27. Алексеев С.И. Основания и фундаменты. Ч. 12: учебное пособие для студентов строительных специальностей. СПб., 2007. 113 с.
28. Уразова С. Строим на вечной мерзлоте // ТехСовет. 2006. № 2(33).
29. Лушникова О.Ю. Особенности строительства в районах Крайнего Севера и на приравненных к ним территориях// Вестник Уральского отделения РАН. 2009. № 2(28). С. 34-37.
30. Сидоренко Л.П. Технология сооружения подстанций. М.: Энергоиздат, 1981.
31. Карпов В.М., Пузанов И.И. Строительство и вечная мерзлота. М.: Стройиздат, 1970.
32. Докучаев В.В., Маркин К.Ф. Свайные фундаменты в вечномерзлых грунтах. Л.:Стройиздат, 1972.
33. СП 131.13330.2012. Строительная климатология.
34. Атаев С.С., Данилов Н.Н., Прыкин Б.В. Технология строительного производства: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1984.
35. Литвинов О.О., Беляков Ю.И. Технология строительного производства. Киев: Высшая школа, 1985.
36. Юшков Б.С., Репецкий Д.С. Сваи для промерзающих грунтов // Жилищное строительство. Москва. Издательство Ладье, 2004.
37. Долгих Г.М., Окунев С.М., Поденко Л.С., Феклисов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Там же, 2008б, с. 34–39.

38. Гвоздик В.И., Андреев М.А., Абросимов А.И., Миронов И.А. Устройство оснований и фундаментов крупных нефтяных резервуаров в условиях Крайнего Севера // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007, № 6.

39. Kolunin V.S., Kolunin A.V. Heat and mass transfer in saturated porous media with ice inclusions // Intern. J. Heat Mass Transfer, 2006, vol. 49, p. 2514–2522

40. Семелит В.Ю., Грузин А.В. Влияние температуры на несущую способность сваи в условиях вечной мерзлоты//Проблемы геологии и освоения недр//с. 422

41. РСН 67–87.Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 40 с

42. Хрусталева Л.Н.Основы геотехники в криолитозоне. М.: Изд-во МГУ, 2005.544 с.

43. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны / А.П. Попов, В.И. Милованов, В.В. Жмулин и др. // Инженерная геология. 2008. № 3. С. 22–39.

44. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны / А.П. Попов, В.И. Милованов, В.В. Жмулин и др. // Инженерная геология. 2008. № 3. С. 22–39

45. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции (под редакцией Е.С. Мельникова). – Издательство «Наука», 1983, 165с.

46. Akagawa S, Kim K, Huang S, Kanie S, Fukuda M, (2004). "Frost heave prediction of chilled gas pipeline in non-permafrost section of discontinuous permafrost," Proc Int conf Cryosphere of oil-and gas bearing provinces, Tyumen, p 43.

47. Kanie S, Akagawa S, Sato M, Mikami T (2004). "Evaluation of interactive behavior between chilled gas pipeline and frost soil for structural design," Proc Int conf Cryosphere of oil-and gas bearing provinces, Tyumen, p 53.

48. Grechishchev, S, (2004), "Estimation of frost heave pressure around cold buried pipelines" Proc Int conf Cryosphere of oil-and gas bearing provinces, Tyumen, p 122

49. Стрижков С.Н. Снижение техногенного воздействия зданий и сооружений на грунтовые основания и их геомониторинг в криолитозоне // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 8—12

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный
институт
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

подпись

инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2020 г.


МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Теплотехнические аспекты подземных этажей и фундаментов в условиях
промерзания грунта


Тема

код и наименование направления

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель  03.07.20 Юсупов К.Т.И.С.С. Добросмыслов
подпись, дата, должность, ученая степень, инициалы, фамилия

Выпускник:  _____ И. А. Сорокин
подпись, дата

Рецензент  _____ к.т.н. ЕТ Плоскунов
подпись, дата, должность, ученая степень, инициалы, фамилия

Красноярск 2020