

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Институт наук о Земле
Кафедра инженерной геологии

Саркисян Армен Георгиевич

**«Инженерно-геокриологическая характеристика территории строительства
автодороги и поселка в долине р. Ерката-Яха на п-ове Ямал и прогноз
взаимодействия проектируемых сооружений с многолетнемерзлыми породами»**

Магистерская диссертация
по направлению 05.04.01 "Геология"

Научный руководитель:
К.г.-м.н., доцент Усов В.А.

Заведующий кафедрой:
К.г.-м.н., доцент Бурлуцкий С.Б.

Рецензент:

Санкт Петербург

2020

Оглавление

Введение	3
1.Геолого-географические условия района.....	4
1.1.Орогидрография.....	4
1.2.Климатическая характеристика района	5
1.3. Геологические условия.....	7
1.3.1. Стратиграфия.....	7
1.3.2. Тектоника.....	16
1.4. Геокриологическая характеристика района	18
1.5. Гидрогеологические условия.....	22
2. Инженерно-геокриологическая характеристика участка изысканий	24
2.1. Геоморфология участка.....	24
2.2. Геокриологические условия участка.	25
2.3. Состав и физические свойства грунтов	25
3. Прогноз взаимодействия ММП с проектируемыми сооружениями.....	27
3.1. Методика расчета и результаты вычислений.....	27
3.1.1. Расчет глубины сезонного протаивания в естественных условиях	27
3.1.2 Расчет нормативной глубины сезонного протаивания.....	31
3.1.3. Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода.....	34
3.1.4. Расчет глубины протаивания-промерзания под дном озера	36
3.1.5. Расчет чаши оттаивания под зданием	39
3.1.6. Расчет несущей способности основания на примере единичной сваи	44
Заключение	49
Список литературы	51
Приложение	53

Введение

Работа составлена по материалам инженерно-геологических изысканий, проводившихся в разные годы на п-ове Ямал в составе экспедиций института Ленгипротранс, а также по материалам практических лабораторных занятий.

Взаимодействие многолетнемерзлых горных пород (ММП) с инженерными сооружениями в долинах крупных рек является одной из главных проблем инженерно-геокриологического прогноза. Тепловое взаимодействие трубопроводов, выбор метода строительства гражданских сооружений в зависимости от ожидаемых осадок при оттаивании ММП – таковы основные задачи настоящей работы. Ее цель – представить возможные последствия возведения этих и им подобных сооружений и предупредить некоторые нежелательные последствия техногенного воздействия на ММП.

В работе представлены расчеты, произведенные по территории, прилегающей к р. Ерката-яха на Ямале, выполнено структурирование типичного для данной территории разреза и даны некоторые рекомендации для проектирования застройки будущего поселка в районе прохождения трассы магистрального газопровода.

Цель данной работы – выяснить, как взаимодействуют многолетнемерзлые породы с различными инженерными сооружениями и определить, насколько это взаимодействие может оказаться опасным для устойчивости сооружений.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить геологическое и гидрогеологическое строение территории проведения работ;
- 2) Составить инженерно-геологический разрез;
- 3) Провести расчеты для проектирования ряда сооружений, которые будут располагаться на территории распространения многолетнемерзлых грунтов.
- 4) Составить инженерно-геологическое заключение по участку.

Актуальность работы объясняется тем, что изучаемая территория сложена многолетнемерзлыми грунтами. При проектировании и при эксплуатации сооружений необходимо учитывать и регулировать теплообмен между горной породой и инженерными сооружениями. Территория полуострова Ямал активно осваивается в настоящее время. Условия территории уникальны и при дальнейших изысканиях и проектировании в области вечной мерзлоты методы применяемого прогноза должны активно учитываться.

1. Геолого-географические условия района

1.1. Орография

Западно-Сибирская плита является равниной, которая имеет форму ступенчатого амфитеатра, открытого на север. Абсолютные отметки изменяются от 1 до 300 м в пределах данной территории.

Объект исследований находится в Южно-Ямальской низменности и относится к внутренней орографической зоне, которая занимает наиболее пониженную центральную и северную части Западно-Сибирской равнины. Полуостров Ямал – плоская, террасированная равнина, абсолютные отметки в пределах которой изменяются от 0 м на побережьях Карского моря и Обской губы до 96 м в осевой части.

Полуостров интенсивно заболочен и заозерен. Преобладают низинные арктические болота. Широким распространением пользуется многолетняя мерзлота, которая оказывает большое влияние на ход современных геологических процессов. Большинство озер термокарстовые глубиной до 4 м. В долинах рек много старичных озер. В водораздельной части и центральной зоне полуострова располагаются крупные группы озер (Нейто, Ямбуто, Ярото и др.), глубиной до 50 м. Происхождением они обязаны протайке массивов реликтовых глетчерных льдов. Имеются также представления об их тектоническом происхождении. Развитая густая речная сеть в основном принадлежит к бассейну Карского моря, а реки восточной части п-ова Ямал – к бассейну Обской губы. Реки Ямала имеют равнинный характер и характеризуются широкими меандрирующими долинами (Юрибей, Тиутейяха, Мордыяха и др.). Скорость течения воды изменяется от 0,1 до 0,6 м/с. Реки почти повсеместно мелководны, несудоходны, с широкими корытообразными плоскими и заболоченными долинами. Их дельтообразные устья заливаются при сгонно-нагонных и приливно-отливных колебаниях (до 3 м) уровня моря. Во время весеннего паводка уровень воды в реках поднимается до 4 м и более, а после летних сильных дождей – на 0,7–1 м. Ледостав обычно приходится на вторую декаду октября, а ледоход происходит в июне. Реки Урала представлены бурными порожистыми потоками: Нярма (Нярма), Бол. Хута (Хуута), Мал. Хута (Хуута) и др. Реки в пределах предгорной равнины часто текут в глубоко врезанных коренных каньонах: р. Ногосовейяха (Осовей), Нгындермаяха (Нундермаяха) и др.). Они осложнены многочисленными порогами, переходящими в многоступенчатые водопады с общим перепадом воды от 1–3 до 5–7, иногда 10–12 м. Глубина рек – 0,5–3,0 м, в «котлах вымывания» до 5 м и более. Скорость течения – 0,4–0,9 м/с, на порогах и перекатах – до 1,0–1,5 м/с. В пределах денудационной равнины находится одно крупное оз. Бол. Нгосовей-То (Осовей), предположительно подпрудного генезиса.

1.2. Климатическая характеристика района

Климат района – суровый субарктический с продолжительной морозной зимой и коротким прохладным летом, обусловлен положением за Полярным кругом и определяющим влиянием арктического морского бассейна. По данным метеостанций среднегодовая температура воздуха составляет около минус 7 °С.

Зима (середина октября–середина мая) холодная, с устойчивыми морозами и частыми метелями. Средняя температура воздуха в наиболее холодные месяцы (январь–март) – 19–20 °С, нередко морозы до минус 35–40 °С. Абсолютный минимум января зафиксирован в пос. Новый Порт (–57 °С), а максимальная температура июля – плюс 30 °С. При высокой относительной влажности (зимой до 88 %) морозы, особенно с ветром, переносятся с трудом. Осадки выпадают часто (10–17 дней со снегопадом в месяц), часты метели (12–18 дней в месяц). Их продолжительность – от нескольких часов до нескольких суток. Иногда метель переходит в пургу, во время которой видимость сокращается до нескольких метров и передвижение на местности становится невозможным. Частые полярные сияния (до 13 дней в 6 в месяц) и связанные с ними магнитные бури нарушают работу магнитных приборов и радиосвязь.

Устойчивый снежный покров образуется в середине–конце октября. Максимальной мощности (0,3–0,5 м) снежный покров достигает к концу марта. На плоских вершинах водоразделов, как правило, толщина слоя снега не превышает 0,1–0,2 м. В долинах водотоков она достигает 3–5 м. С начала декабря до середины января (39 суток) длится полярная ночь, во время которой солнце не всходит над горизонтом. Лишь в околополуденные короткие (около 5 часов) сумерки возможна ориентировка на местности без искусственного освещения. Со второй половины января солнце появляется над горизонтом, день быстро увеличивается, а с начала мая наступает период белых ночей.

Весна (середина мая–начало июля) характеризуется пасмурной погодой и резкими колебаниями температуры воздуха. Ночные заморозки длятся в течение всего периода. Осадки (12–14 дней в месяц) выпадают в виде мелких дождей и мокрого снега. Часты туманы. Снежный покров сходит в середине июня. В глубоковрезанных долинах водотоков и у подножия крутых склонов на севере снежники часто сохраняются до конца августа–середины сентября. Сход снега сопровождается бурными паводками (конец июня–начало июля) по долинам всех водотоков, полностью прекрывающим передвижение наземным транспортом. Половодье длится 10–25 дней. Озера замерзают раньше и вскрываются на 5–7 дней позже, чем реки.

Лето (начало июля–конец августа) прохладное, дождливое. При средних температурах 7–9 °С, максимальные достигают плюс 15–20 °С, редко 25 °С (абс. максимум +30 °С). Часто (до 12–15 дней в месяц) выпадают осадки, преимущественно в виде морозящих дождей. Затяжные морозящие дожди или ливни часто приводят к резкому подъему воды (до 2–3 м) во всех водотоках. Для всего летнего периода характерны частые туманы (до 10–15 дней в месяц). В конце мая белые ночи сменяются полярным днем, который длится до середины июля (60 суток). Период белых ночей продолжается до середины августа.

Осень (конец августа–середина октября) холодная, дождливая (до 17 дней в месяц с осадками в виде морозящих дождей и мокрого снега). С конца сентября возможны снегопады. Ночные заморозки отмечаются в течение всего сезона. Реки замерзают в конце сентября–начале октября. Среднегодовое количество осадков, по наблюдениям метеостанций с 1950 г. составляет 344 мм при колебаниях от 211 до 477 мм. До 60 % осадков выпадает в твердой фазе.

Ветровой режим характеризуется преобладанием северных направлений в весенне-летние сезоны и южных, юго-западных – зимой и осенью. Средняя скорость ветра 6–9 м/с. Сильные ветры (15 м/с и более) чаще всего бывают зимой и весной. Во время пурги скорость ветра достигает 40 м/с.

Повсеместно распространена многолетняя мерзлота, мощность которой в горной части Урала достигает максимальных значений (до 600 м). Климат Карского моря формируется под воздействием арктического центра атмосферной циркуляции при ослабленном влиянии теплых атлантических воздушных масс и течений. Средняя температура воздуха понижается с запада на восток в самые холодные месяцы (январь–март) от –15 ° до –25 °С, а в самые теплые (июль, август) – от +6 ° до +1 °С. Температура морской воды в поверхностном слое варьирует от +0,5 ° до –2 °С зимой и от +7 ° до +4 °С летом.

Район отличается большой ледовитостью. С ноября по май море полностью покрыто льдами. Летом в этой части Карского моря формируется Новоземельский ледовый массив, который дрейфует между Новой Землей и Ямалом. Полное очищение юго-западной части моря ото льда происходит в конце августа–начале сентября. Скорость поверхностных течений составляет 1,0–1,5 узла. Изменения уровня моря складываются в основном из сезонных сгонно-нагонных явлений и приливно-отливных колебаний, амплитуда которых превышает 1 м.

1.3. Геологические условия

1.3.1. Стратиграфия

Полуостров Ямал является северо-западной оконечностью Западно-Сибирской низменности, представляющей собою эпигерцинскую платформу, покров которой сложен слабо дислоцированными породами мезозойской и кайнозойской групп. В пределах большей части Ямала непосредственно на породах палеозойского фундамента залегает маломощная кора выветривания. Эти отложения представлены сильно измененными бесструктурными, каолинизированными породами. Кора выветривания имеет незначительную мощность и сохраняется в западинах рельефа фундамента. В пределах южного Ямала эта толща является отражением крупного перерыва в осадконакоплении - континентального этапа, охватывавшего ранние эпохи мезозойской эры [Инженерная,2015].

На изучаемой территории отсутствуют выходы коренных пород, однако повсеместно распространены четвертичные отложения, которые имеют максимальные мощности, наиболее полный разрез в пределах погребенных долин и представлены супесчано-суглинистыми отложениями морского и гляциально-морского генезиса. Аллювиальные отложения, ранее залегавшие в древних долинах, вероятнее всего были перемыты и уничтожены водами наступающего моря [Инженерная,2015].

В целом четвертичный разрез отличается однообразием и представлен супесчано-суглинистыми отложениями. Литологические особенности и остатки фауны свидетельствуют о том, что накопление этих осадков происходило в условиях обширного трансгрессирующего морского бассейна, существовавшего непрерывно с начала четвертичного периода до конца среднего плейстоцена. Кроме этих осадков, широко распространен разнородный в литологическом отношении комплекс аллювиально-озерных и аллювиальных отложений.

Основная часть четвертичного разреза, представленная морскими осадками ямальской серии, подразделяется нами на три свиты - полуйскую, казымскую и салехардскую. Поставное расчленение ямальской серии произведено на основании литологических, фациальных и палеонтологических данных [Лазуков и Рейнин, 1961].

НИЖНИЙ ПЛЕЙСТОЦЕН

К отложениям нижнего плейстоцена относится полуйская свита.

Полуйская свита (m, mgl, Qi, pl) довольно хорошо изучена в долинах рр. Оби, Полуя, Казыма. Отложения полуйской свиты представлены супесчано-суглинистыми осадками с редкими прослоями и линзами песков. Супеси и суглинки обычно темно-серых тонов, иногда с зеленоватым оттенком. Отложения неслоистые, плотные, комковато-оскольчатые со значительным количеством зерен песчаной фракции, распределенных в породе равномерно. По всему разрезу встречается довольно много гравийно-галечникового и валунного материала, образующего иногда линзы и прослои.

Несмотря на общую однородность разреза полуйской свиты, имеется достаточное количество данных, показывающих и на их существенные литологические различия в разных частях района.

Общим признаком для отложений полуйской свиты является существенное преобладание плохо отсортированных пород.

В пределах всего района полуйская свита представляет собой единую толщу, в пределах которой довольно сложно произвести расчленение на более мелкие стратиграфические подразделения [Инженерная,2015].

В палеонтологическом отношении полуйская свита охарактеризована крайне слабо. Макрофауны в осадках этой свиты до сих пор не найдено. Микрофауна также почти не изучена.

Полуйская свита прослеживается в пределах значительной части района и представляет собой самостоятельный стратиграфический горизонт, залегающий всюду в основании четвертичного разреза [Инженерная,2015].

СРЕДНИЙ ПЛЕЙСТОЦЕН

Средний плейстоцен представлен осадками казымской и салехардской свит, составляющих значительную по мощности часть отложений ямальской серии. Отложения этих свит вскрыты значительно большим числом скважин, а верхняя из них - салехардская - наблюдается в многочисленных естественных обнажениях.

Казымская свита (mQ_2^1kz). Полуийская свита вверх по разрезу постепенно переходит в казымскую свиту, представленную также главным образом супесчано-суглинистыми и алевритовыми отложениями. Песчаный материал, хотя и присутствует, но залегает в преобладающем большинстве случаев отдельными линзами и прослоями. Представлен он в основном мелкозернистыми и тонкозернистыми разностями. Супеси, суглинки и алевриты имеют темно-серую и серую с зеленоватым оттенком окраску, пылеваты и очень однородны по гранулометрическому составу. Количество алевритовых частиц достигает 80-90%. Для преобладающей части разреза характерна тонкая горизонтальная и диагональная слоистость, которая прослеживается благодаря различиям в гранулометрическом составе и цвете.

В отложениях казымской свиты гравийно-галечниковый материал практически не встречается. Нередко в различных частях разреза казымской свиты встречаются мелкие растительные остатки, образующие иногда тонкие прослои «растительной сечки».

Наиболее полные разрезы казымской свиты известны в районе г. Салехарда, в районе с. Березово - р. Казым и в долине р. Полуий. В районе с. Березово и в долине р. Полуий казымская свита представлена супесчано-суглинистыми и алевритовыми отложениями. В районе Салехарда, расположенном в непосредственной близости от Урала, содержится довольно значительное количество песчаного материала, хотя последний представлен очень однородными тонко- и мелкозернистыми разностями.

Характерной особенностью осадков казымской свиты, отличающей ее от полуийской и салехардской свит, является полное отсутствие плохо отсортированных (мореноподобных) разностей осадков. Весь разрез данной свиты представлен нормально отчетливо слоистыми морскими осадками.

Мощность отложений казымской свиты в пределах всего района значительна и равняется в среднем 50-60 м. Максимальных мощностей, около 100-120 м, эта свита достигает в долине р. Оби в районе с. Березова и в низовьях р. Казым.

На морской генезис осадков казымской свиты указывают и палеонтологические данные, в частности, фораминиферы. Кроме того, в долине р. Казым найден комплекс солоноватоводных диатомовых водорослей. Макрофауны в осадках этой свиты до сих пор не встречено.

Аккумуляция осадков казымской свиты происходила в морском бассейне, соленость которого была ниже нормальной, а в климатическом отношении условия были близки к современным [Лазуков, 1957].

Салехардская свита (m, mgl Q₂² sh). Мощная толща осадков салехардской свиты завершает собой разрез отложений ямальской серии. С казымской свитой она связана постепенными переходами. Как и вся ямальская серия в целом, отложения этой свиты представлены главным образом супесчано-суглинистыми и, реже, алевроитовыми осадками. Наиболее характерным для них является наличие горизонтов плохо отсортированных мореноподобных супесей и суглинков и постоянное присутствие во всем разрезе гравийно-галечникового и валунного материала. Этой особенностью она отличается от осадков казымской свиты и похожа на отложения полуйской [Лазуков, 1957].

Подосва салехардской свиты располагается на 50-100 м ниже уровня моря, а наиболее высокие отметки кровли ее в преобладающей части района находятся на высотах около + 100 м. В верховьях р. Куноват эти отложения залегают на отметках около 200 м, а на гряде Мужинский Урал - на высоте 250 и даже 280 м. Максимальная мощность отложений салехардской свиты достигает 200-220 м.

В целом, толща отложений салехардской свиты представляет собой сложное и многократное переслаивание супесчано-суглинистых мореноподобных и хорошо отсортированных, иногда алевроитовых осадков. Изредка встречаются небольшие прослои и линзы песчаного материала, представленного тонко- и мелкозернистыми разностями. Прослои песчаного материала обычно не выдержаны по простиранию и, как правило, имеют небольшую мощность, хотя иногда они достигают 30- 40 м.

В долине р. Полуй песчаные отложения внутри салехардской свиты почти отсутствуют.

Гравийно-галечниковый и валунный материал, встречающийся более или менее равномерно по всему разрезу свиты, представлен, в основном, изверженными и метаморфическими породами уральского комплекса. Нередко встречаются обломки плотных осадочных пород (опоки, аргиллиты). Окатанность крупного обломочного материала обычно довольно плохая. В то же время гальки кремнистых пород и кварца, встречающиеся в суглинках свиты, окатаны намного лучше. Основная часть обломочного материала в осадках салехардской свиты распределена более или менее равномерно и виде отдельных включений в общей мелкоземистой массе. Иногда же они образуют линзовидные скопления мощностью до 10 м.

Среди супесчано-суглинистых отложений салехардской свиты выделяется два типа осадков, довольно резко отличающиеся друг от друга. Для первого из них характерна плохая степень отсортированности материала, отсутствие слоистости, наличие значительного количества зерен песчаной фракции, что и придает ей мореноподобный облик. Мощность прослоев мореноподобных отложений колеблется от 1-5 до 10-15 м, а местами достигает 20-30 м. Иногда в них прослеживается довольно тонкая, преимущественно горизонтальная слоистость, а зачастую наблюдаются целые прослои прекрасно отмученных, четко горизонтально-слоистых алевроитов. Кроме того, в плохо отсортированных осадках встречаются быстро выклинивающиеся прослои и линзы песка, иногда содержащего гравийно-галечниковый материал.

Второй тип представлен алевроитами, суглинками, а также глинами. Для преобладающей части осадков характерно значительное содержание пылеватых частиц (до 80-90%). Часто встречающаяся очень тонкая слоистость обусловлена цветовыми и гранулометрическими различиями и подчеркивается присыпками мучнистого алевроита по плоскостям напластования. Макроскопически эти отложения салехардской свиты очень похожи на осадки нижележащей казымской свиты. По своему литологическому облику они относятся к типично морским осадкам.

Изучение салехардских отложений по керну скважин и по естественным обнажениям свидетельствует о том, что накопление обеих литологических разностей происходило одновременно. Это подтверждается многократным переслаиванием их в разрезе и наблюдающимися в обнажениях фациальными переходами их друг в друга по простиранию.

Мореноподобный тип осадков салехардской свиты ранее определялся как морена покровного оледенения. Однако, указанные выше фациальные соотношения мореноподобных и типично морских осадков вполне определенно свидетельствуют об одновременности их аккумуляции в едином морском бассейне. Салехардская свита (особенно ее низы и верхи) накапливалась при менее благоприятных климатических условиях, чем казымская, в бассейне с более низкими температурами воды.

В северо-западной части Западно-Сибирской низменности салехардская свита представлена мощной, однородной в литологическом отношении толщей. Подразделение ее на горизонты по литологическим признакам до сих пор не удается. Однако на северо-востоке низменности (бассейн р. Енисея) времени аккумуляции осадков салехардской свиты соответствуют три разнородных в литологическом и генетическом отношении толщи (отложения самаровского оледенения, мессовские и санчуговские осадки).

Салехардской свитой заканчивается разрез осадков ямальской серии, накопление которых происходило непрерывно в течение нижнего и среднего плейстоцена. Несмотря на однородность литологического состава и однообразие условий осадконакопления, ямальская серия довольно четко, как видно из изложенного выше, подразделяется на три свиты. Нижняя (полуйская) и верхняя (салехардская) свиты имеют много общих черт: 1) наличие мореноподобных отложений, 2) переслаивание их с типично водными отложениями, 3) постоянное присутствие гравийно-галечникового и валунного материала.

Казымская свита представлена только типично морскими осадками и обычно не содержит валунно-галечникового материала и мореноподобных супесей и суглинков [Лазуков, 1957].

Конец среднего плейстоцена знаменует собой начало отступления вод ямальского бассейна. Все более молодые осадки в той или иной степени связаны с регрессивным этапом развития Ямальского бассейна.

ВЕРХНИЙ ПЛЕЙСТОЦЕН

Отложения верхнего плейстоцена также имеют очень широкое распространение в пределах рассматриваемого района. Встречаются они как на водоразделах, так и в пределах речных долин. В генетическом отношении в составе верхнего плейстоцена выделяются разнообразные типы осадков - морские, аллювиальные, озерно-аллювиальные, озерные и другие отложения.

Казанцевская свита (m, al, lal Q₃¹ kzn). Отложения этой свиты распространены довольно широко, но приурочены они преимущественно к долинам наиболее крупных рек. На междуречных пространствах выходы их наблюдаются редко и, как правило, не выше отметок + 60 м над уровнем моря. Наиболее полно казанцевские отложения изучены в долине р. Оби, в южной части п-ова Ямал и на Тазовском полуострове. В большинстве случаев отложения этой свиты залегают выше уреза рек [Инженерная, 2015].

В литологическом отношении казанцевская свита представлена песками, супесями, суглинками, алевритами и глинами. Соотношения тех или иных разностей в разрезах различны.

Среди песков преобладают мелко- и тонкозернистые очень однородные разности. Среднезернистые пески встречаются редко и только в континентальных фациях казанцевской свиты. Как правило, в песках наблюдается очень четкая слоистость разнообразных типов (горизонтальная, косая, перистая, перекрестная и т.д.). Проявляется она благодаря различиям гранулометрического состава, цвета, наличия скоплений естественного шлиха по плоскостям напластования. Довольно часто слоистость образуется также за счет тонких прослоев растительного детрита. Континентальные фации сложены почти нацело песками [Инженерная,2015].

Супесчано-суглинистые и алевритовые отложения имеют, как правило, темно-серую и зеленовато-серую окраску. В большинстве случаев для них характерна четкая горизонтальная, тонкая диагональная или перистая слоистость. Материал хорошо отмучен. Основную массу (до 90%) составляют пылеватые частицы.

Гравийно-галечниковый материал практически отсутствует. Супесчано-суглинистые и алевритовые разности широко распространены в казанцевских отложениях на Тазовском полуострове и на Ямале.

Наиболее сложное строение разреза наблюдается в районах, где существовали морские условия. В пределах суши того времени формировались обычные осадки аллювиального ряда, представленные чаще всего песками со слоистостью потокового типа (р. Ярудей, р. Танлова, р. Бол. Хуху, реки Тазовского полуострова и др.).

Мощности казанцевских отложений колеблются от 10-15 м (континентальные фации) до 50- 30 м (морские).

Анализ литологических особенностей указывает на своеобразие условий периода аккумуляции осадков. Высокое стояние уровня моря, наличие крупных ингрессионных заливов (изрезанность береговой линии), реки, впадающие в эти заливы, - все это привело к образованию сложной в литолого-фациальном отношении толщи осадков. Отложились морские, аллювиальные, озерно-аллювиальные, дельтовые отложения, а иногда и переслаивание этих литолого-фациальных типов.

Палеонтологические данные указывают на теплые межледниковые условия накопления осадков казанцевской свиты.

Отложения озерно-аллювиальной равнины (III надпойменной террасы - Ial, al, m Q₃²) имеют широкое распространение и слагают хорошо выраженную в рельефе террасу, лучше всего наблюдающуюся в долинах рек Оби, Полуя, Надыма, Пура и др. Мощность озерно-аллювиальных отложений не превышает 10-15 м, максимальная мощность достигает 25 м.

Одновременно с формированием озерно-аллювиальной террасы в материковых районах, на территории Ямальского и Тазовского полуостровов образовалась морская терраса соответствующего уровня. Таким образом, нами выделяются озерно-аллювиальные и морские отложения времени зырянского оледенения.

Морская терраса отмечается в устьевой части р. Юрибей (п-ов Ямал, побережье Байдарацкой губы). Здесь эта терраса сложена ритмично переслаивающимися супесями и песками. В большинстве разрезов преобладают супеси, серые и зеленовато-серые, легкие, обычно с четкой горизонтальной и иногда перистой слоистостью. Мощность прослоев супесей колеблется от 1- 1,5 м до 3- 4 м.

Пески серые и желтовато-серые, мелко- и среднезернистые, обычно хорошо промытые, также часто с четкой горизонтальной и диагональной слоистостью. Мощность прослоев песка 1- 1,5 м.

Геоморфологическое положение террасы, спорово-пыльцевой и диатомовый анализы, структурно-текстурные особенности осадков указывают на то, что озерно-аллювиальные отложения формировались в условиях озер, соединенных протоками, причем климатические условия времени осадконакопления были суровее современных. Исходя из этого, отложения озерно-аллювиальной и морской террасы датируются зырянским временем.

Отложения II надпойменной террасы (al, m Q₃³) имеют меньшее площадное распространение, чем вышеописанные озерно-аллювиальные осадки. Вторая надпойменная терраса развита в долинах почти всех рек района (кроме мелких). Аллювий террасы довольно однообразен. Наиболее распространенными осадками являются пески, хотя на некоторых участках преобладают супесчано-суглинистые отложения. Песчаный аллювий представлен мелко- и среднезернистыми светло-серыми и серо-желтыми песками, довольно хорошо отсортированными. Слоистость чаще всего горизонтальная и полого-волнистая. Гравийно-галечниковый материал встречается редко и приурочен обычно к нижней части разреза.

Супесчано-суглинистые разности аллювия представлены серыми, палево-желтыми однородными супесями и суглинками с горизонтальной и полого-волнистой слоистостью.

Максимальные мощности аллювия второй надпойменной террасы достигают 25 м.

На побережье Ямала и Тазовского полуострова встречается II морская терраса, сложенная, в основном, супесчаными осадками с прослоями песков.

Отложения первой надпойменной террасы (al Q₃⁴) встречаются во всех долинах района. Терраса эта имеет хорошую морфологическую выраженность. В ее строении участвуют довольно разнообразные в литологическом отношении комплексы аллювиальных отложений (суглинки, супеси, пески, торфянистые отложения). Чаще всего в них прослеживается горизонтальная и полого-волнистая слоистость, которая иногда бывает нарушена мерзлотными процессами.

Формирование первой надпойменной террасы происходило в период сартанской стадии зырянского оледенения. Об этом позволяют говорить палеоботанические данные.

ГОЛОЦЕН

К отложениям голоцена относятся осадки пойменного комплекса террас (высокой и низкой поймы), водораздельных озер и болот. Отложения эти имеют очень широкое распространение как в долинах рек, так и на водоразделах, и небольшие мощности.

Отложения пойм (al Q₄) развиты в долинах всех рек района, занимают большие площади и по своему литолого-фациальному составу довольно разнообразны. В этих отложениях очень четко прослеживаются все фации аллювия - от русловых до старичных. Кроме того, здесь встречается и торф, залегающий в виде линз и прослоев в толще пойменного аллювия, или выполняющий понижения на поверхности поймы [Инженерная, 2015].

Озерно-болотные отложения (1, n Q₄), развитые на водораздельных пространствах, представлены довольно сложным комплексом осадков: супесями, песками, глинами, илами и торфом. Мощность этих отложений невелика и лишь иногда достигает 7- 8 м. Торфяные накопления занимают значительные площади и часто покрывают аллювиальные отложения террас и водораздельные пространства [Инженерная, 2015].

Основным событием четвертичной истории была обширная по площади и длительно существовавшая во времени морская трансгрессия. Периоды потеплений и похолоданий на протяжении существования бассейна отразились лишь на многочисленных особенностях накопившихся в нем осадков.

Резких колебаний климата на протяжении четвертичного периода, за исключением казанцевского и голоценового времени, для севера Западно-Сибирской низменности не отмечается. Климат был близок к современному с незначительными отклонениями в сторону похолоданий или потеплений.

1.3.2. Тектоника

Территория изучения относится к Урало-Сибирской области завершенной складчатости (молодой платформы), включающей фрагменты современных геоструктур: Урало-Новоземельского складчато-надвигового пояса и Западно-Сибирской плиты.

Фундамент Урало-Сибирской области завершенной складчатости, сложенный дотриасовыми образованиями, в пределах Урала выходит на поверхность. Эта часть Урало-Сибирской области может рассматриваться в качестве Уральско-Новоземельского щита молодой платформы. Урало-Сибирская область завершенной складчатости связана с коллизионными событиями, происходившими в течение перми–триаса, и потому традиционно рассматривается как эпигерцинская.

В Западно-Уральской мегазоне складчато-надвиговые деформации явились следствием обдукции образований палеоокеанического сектора (Тагило-Магнитогорская мегазона) на пассивную окраину Восточно-Европейского континента.

В разрезе земной коры южной части территории достоверно выделяются три структурных этажа: байкальский, каледоно-герцинский (уральский) и мезозойско-кайнозойский. Границами их являются региональные структурные несогласия. Сведения о наличии байкальского этажа в северной части Ямала отсутствуют.

Байкальский структурный этаж представлен в выходах на поверхность ядер Полярно-Уральского и Харбейского антиклинориев преимущественно карбонатно-терригенно-вулканогенными складчатыми образованиями позднего рифея–раннего кембрия. Поздний рифей представлен (в пределах Харбейского антиклинория) немурюганской вулканогенно-карбонатно-терригенной (углеродсодержащей) формацией окраинных бассейнов. К югозападу в позднем рифее реконструируется активная континентальная окраина с островной дугой энсиалического типа, представленная на территории листа очетывисской терригенно-вулканогенной (углеродсодержащей) формацией около островодужного бассейна, и с венда по ранний кембрий – собственно островодужными лядгейской базальт-андезит-риолитовой и кызыгейской габбро-диорит-гранодиоритовой формациями.

В раннем кембрии в следствие коллизии формируется континентальная арканырдская моласса, с резким угловым несогласием срезающая структуры островодужного этапа и формирующая самостоятельный структурный подъярус. Образования байкальского структурного этажа вышеописанного типа развиты под покровом палеозойских образований и севернее, вплоть до Байдарацкого разлома. Формационная принадлежность предполагаемых образований байкальского структурного этажа к северо-востоку от Байдарацкого разлома не ясна. Севернее Харасавэйско-Каменного разлома сведения о формациях байкальского структурного этажа и их строении отсутствуют. В пределах Припайхойского района Южно-Карского шельфа вероятно отсутствие байкальских образований.

Каледоно-герцинский (уральский) структурный этаж (к юго-западу от Байдарацкого разлома) сложен дислоцированными позднекембрийско-раннепермскими образованиями и среднетриасовыми гранитоидами торасавэйского комплекса, отвечающими последовательно сменявшим друг друга геодинамическим обстановкам типичной пассивной континентальной окраины: 1) окраинно-континентального рифтогенеза – вулканогенно-терригенная, песчано-конгломератовая морская, песчано-конгломератовая континентальная и риолит-базальтовая формации среднего кембрия–раннего ордовика; 2) собственно пассивной континентальной окраины: – шельфовые – терригенные и карбонатные формации раннего ордовика– позднего девона; – континентального склона и подножья – вулканогенно-карбонатно-терригенная (углеродсодержащая) формация раннего–среднего ордовика и карбонатно-кремнисто-глинистая (углеродсодержащая) формация силура–ранней перми; 3) коллизии – флишевая формация ранней перми и монцодиоритовая среднего триаса. На границе с образованиями нижнего структурного этажа наблюдается отчетливо выраженное структурное и угловое несогласие [Инженерная,2015].

По уровню залегания, морфоструктурным особенностям рельефа фундамента и геофизическим характеристикам земной коры в Южно-Карской и Ямальской частях плиты выделяются две структурные области: внешняя и внутренняя. Внешняя область образует пояс тектонических ступеней, сопряженных со складчатыми системами обрамления и частично сохраняющих с ними структурные взаимосвязи. Блоки внешней структурной области по геофизическим свойствам и общей мощности земной коры признаются древними массивами (микроконтинентами) с дислоцированными палеозойскими чехлами.

Внутренняя область охватывает часть Южно-Карской синеклизы и Ямало-Гыданскую мегаседловину. По характеру осадков в палеозое (преобладание шельфовых

формаций) данная область может рассматриваться как «Северо-Ямальский палеозойский микроконтинент», существенно переработанный впоследствии в эпоху триасового рифтогенеза. При этом необходимо отметить, что северо-западная часть области в пределах Пухучанской впадины нередко рассматривается как реликт древнего закрывшегося океана вследствие утоненной мощности земной коры.

Мезозойско-кайнозойский структурный этаж сложен субгоризонтально залегающими юрскими, меловыми и кайнозойскими образованиями чехла Западно-Сибирской плиты. Мезозойско-кайнозойский чехол образуют песчано-аргиллитовая угленосная (J1 μ 2), глинистая (J3 μ K1), песчаноалеврито-глинистая угленосная (K1), песчано-алеврито-глинистая (K1 μ 2), опоково-глинистая (K2), алеврито-глинистая (K3 μ 1/41), глинисто-алеврито-песчаная угленосная (1/41), алеврито-глинистая, диатомитовая–опоково-глауконитовая (1/41 μ 2) формации, отражающие чередование трансгрессивных, инундационных и регрессивных режимов развития плиты [Инженерная,2015].

1.4. Геокриологическая характеристика района

Современные представления о криолитозоне полуострова Ямал изложены в трудах В.В. Баулина (Баулин, 1985, Баулин и др., 1979), В.Т. Трофимова (Трофимов, 1986, Трофимов, 1977, Трофимов, Баду, Дубиков, 1980), во втором томе «Западная Сибирь» пятитомника «Геокриология СССР» (Геокриология..., 1989) и других работах. В качестве основных характеристик ММП рассматриваются их площадное распространение, температура, мощность, сплошность по разрезу, криогенное строение, гидрогеологические условия, макрольдистость, интенсивность проявления различных криогенных процессов и явлений. Основной особенностью геокриологических условий полуострова Ямал является сплошное распространение многолетнемерзлых пород. Они встречаются на всей территории, начиная от северной оконечности Ямала до южных его границ.

Их температура, криогенное строение, мощность толщ, мощность слоя сезонного протаивания и промерзания существенно неодинаковы в разных частях территории. Это связано с тем, что многолетнемерзлые породы сформировались и развивались под влиянием большого числа природных факторов, различных в разных районах Ямала. Решающее влияние на многие параметры мерзлотных условий оказали зональные, в первую очередь, климатические факторы природных условий, а также история геологического развития территории в верхнем плейстоцене и голоцене. Региональные геологические факторы, в частности, тектоническое строение территории лишь осложняют мерзлотные особенности территории [Трофимов и др., 1986].

Единого взгляда на мощность мерзлой толщи п-ва Ямал не существует; по данным различных исследователей максимальная ее величина составляет более 500 м [Баулин, 1985], 450 – 500 м [Геокриология..., 1989], более 300 м или приближается к этой величине [Трофимов, Баду, Дубиков, 1980]. Большинство авторов признают зависимость мощности ММП от возраста и генезиса геоморфологического уровня, в пределах которого эти породы сформировались, в связи с чем, максимальные мощности ММП приурочены к наиболее древнему геоморфологическому уровню Ямала – салехардской равнине, расположенной в осевой части полуострова. В пределах казанцевской морской равнины, второй и третьей морских террас, лагунно-морских и надпойменных террас мощность ММП приводится в интервалах 150 – 300 м [Трофимов, Баду, Дубиков, 1980] или как достигающая 500 м [Баулин, 1985]. Меньшие значения мощности ММП (50 – 150 м) характерны для участков пойм рек, а также для западных и северных районов, примыкающих к Карскому морю. Наименьшие мощности (менее 50 м) мерзлых пород приводятся для лайды и приустьевых частей пойм рек [Геокриология ..., 1989]. На молодых геоморфологических уровнях (поймы, лайды, низкие террасы) севера Западной Сибири продолжается процесс многолетнего промерзания пород.

Одним из важных факторов, определяющих мощность ММП, признается тектоническое строение территории, причем важное значение имеет как общий тектонический план (глубина погружения фундамента, его возраст), так и наличие локальных структур. Влияние последних неоднозначно и зависит от присутствия в них газовых залежей. В сводовой части структур третьего порядка при отсутствии газовой залежи наблюдается уменьшение мощности ММП; наличие газовой залежи приводит к увеличению мощности мерзлых пород, но при условии, что залежь расположена на глубинах, не превышающих определенные значения (для севера Ямала эти значения 1100 – 1200 м) [Баулин, 1985]. Таким образом, мощность многолетнемерзлых пород в пределах подавляющей части полуострова составляет 200-300 м. В целом, мощность мерзлых толщ в западных, северозападных и северных районах Ямала, прилегающих к Карскому морю, существенно ниже по сравнению с мощностью их вдоль побережья Обской губы. Наиболее мощные мерзлые толщ (свыше 300 м) распространены в пределах возвышенной, осевой части полуострова.

Для геокриологических условий полуострова Ямал характерно сплошное распространение, нарушаемое подрусовыми и подозерными таликами, как правило – несквозными. Мощность ММП закономерно снижается в северо-западном направлении от

Обской губы и от древних геоморфологических уровней (350-400 м в пределах салехардской морской равнины) к более молодым (10-20 м на лаиде Карского моря). Аномально низкие мощности приурочены к зонам глубинных разломов и связаны с пространственной неоднородностью теплотоков из недр. Сквозные талики развиты под акваторией Обской губы и Карского моря. Они развиты и под наиболее крупными озерами Ямала, имеющими мощность в несколько десятков или даже сотен квадратных километров и глубины до 30-50 м. Несквозные талики развиты гораздо шире (в том числе и под озерами). Мощность их под руслами рек изучена лишь в южной части полуострова Ямал. Она изменяется от 4-8 до 20-30 м и в целом возрастает по мере увеличения реки и ее глубины. В северных районах (Новый Порт – Мыс Каменный) мощность подрусловых таликов обычно составляет 5-7 м. Под руслами мелких рек и ручьев талики не формируются [Инженерно-геологический..., 1996, Трофимов и др., 1986]. Зональность температурного режима ММП связана с геолого-структурными, геоморфологическими, геоботаническими и климатическими особенностями территории.

Определяющими факторами являются характер напочвенных покровов и условия снегонакопления. Температура пород на уровне нулевых годовых амплитуд изменяется от -0,1 / -1 °С в пределах низких уровней на юге до -8 / -10 °С на высоких водораздельных поверхностях в центральной и северной частях полуострова. Наиболее низкие среднегодовые температуры мерзлых пород (до -10 °С) отмечены в пределах арктической и лишайниковой тундр севернее широты пос. Тамбей. Изменение среднегодовых температур многолетнемерзлых пород с севера на юг обусловлено постепенным увеличением теплообеспеченности территории. Кроме того увеличение мощности растительного покрова от 6-8 до 15-20 см, а часто и более, а также сменой мохово-лишайниковой растительности мохово-кустарниковой на юге, где высота кустарников достигает 0,5-0,7 м, что в значительной степени способствует накоплению снега почти такой же мощности [Баулин, 1985].

Криогенное строение ММП полуострова определяется мерзлотно-фациальными условиями осадконакопления и развития территории в плейстоцен-голоцене. Верхняя часть разреза сложена высокольдистыми сингенетически промерзавшими породами с широким распространением сегрегационных и полигонально-жильных льдов. Максимальные мощности синкриогенных толщ приурочены к отложениям третьей и второйморских и лагунно-морских террас.

Эпикриогенными толщами, для которых более характерны инъекционные льды и ледцемент, сложены поверхности салехардской и казанцевской морских равнин центрального и северного Ямала, а также все геоморфологические уровни южнее северной

границы типичных тундр. Отличительная особенность полуострова - широкое развитие в верхней части разреза полигенетических мономинеральных льдов, образующих крупные залежи площадью до 10-15 км² и мощностью более 25-30 м. Наиболее крупные залежи льда приурочены к отложениям III морской террасы в центральной и западной частях полуострова. Важной чертой Ямала является повсеместная засоленность отложений, связанная с инфильтрацией морских вод в слаболитифицированные дисперсные породы во время позднечетвертичных морских трансгрессий. В отложениях различного генезиса по всему разрезу широко развиты напорные криопэги с минерализацией до 80-110 г/л. [Дубиков, Иванова, 1990, Дубиков, Иванова, 1996, Дубиков, 2002, Инженерно-геологический ..., 1996]. Одной из наиболее важных характеристик геокриологических условий территории является формы и интенсивность проявления криогенных процессов, которые на полуострове весьма разнообразны и многочисленны. Здесь широко развиты склоновые процессы (криогенные оползни и сплывы), морозобойное растрескивание и образование повторножильных льдов, криогенное пучение грунтов, термокарст, термоэрозия и термоабразия.

Характер изменчивости пород верхней части разреза позволяет выделить в пределах Западно-Сибирской плиты три зоны: 1) зона практически сплошного распространения ММП, 2) зона совместного распространения ММП и СМП, 3) зона распространения СМП. Изучаемый участок расположен в первой зоне, максимальная глубина залегания подошвы мерзлой толщи равняется 400 метров. Первая зона охватывает огромное тундровое пространство плиты, расположенной к северу от Полярного круга. На обширных пространствах Западно-Сибирской плиты начиная от Арктических островов и вплоть до северного Полярного круга, ММП развиты вне акваторий непосредственно с поверхности практически на всех элементах рельефа. Даже отложение морских пляжей, мелководных озер, бечевников и островов в долинах крупных рек, заливаемых в паводки, находятся в многолетнемезлом состоянии практически до самых южных границ этой территории. Здесь распространены главным образом сплошные по разрезу и площади мерзлые мощные толщи. В большинстве районов их мощность изменяется от 150 до 300 метров [Инженерная, 2015]. В пределах этой зоны преимущественно распространены синкриогенные и диакриогенные породы, а также генетически-неоднородные толщи, где синкриогенные породы подстилаются на небольшой глубине эпикриогенными.

Небольшие по площади несквозные талики мощностью до 3-6 метров (редко больше) появляются здесь на залесенных или покрытых высоким кустарником участках пойм. В самой северной части Западно-Сибирской плиты, в зоне практически сплошного распространения ММП, развиты низкотемпературные мерзлые толщи. Наиболее низкие

температуры свойственны породам, развитым на самом севере полуострова Ямал. На западном побережье Ямал, в районе мыса Харасавэй, наиболее высокие температуры (от -2,5 до -3,0 °С) наблюдается в узких долинах небольших рек и в глубинах оврагов, развитых на склонах террас и водоразделов. Из-за большой ветровой затененности в ложбинах и в узких долинах зимой накапливаются значительные мощности снега, тепляющее влияние которого приводит к развитию здесь высокого и густого кустарника и к значительному повышению среднегодовых температур по сравнению с оголенными бесснежными возвышенностями, где температура пород составляет от -7 до -9 °С [Инженерная, 2015].

1.5. Гидрогеологические условия

Гидрогеологические условия полуострова Ямал, как один из важнейших факторов, определяющих инженерно-геокриологические особенности территории, изучены весьма слабо.

Водонапорная система содержит несколько водоносных комплексов, разделенных регионально выдержанными водоупорами. В инженерно-геокриологическом отношении интерес представляют два верхних гидрогеологических комплекса, поскольку они попадают в сферу хозяйственной деятельности при освоении месторождения и в них наиболее четко выражена взаимосвязь мерзлотных и гидрогеологических условий.

Первый гидрогеологический комплекс сложен песчано-глинистыми породами палеоген-четвертичного возраста. Они могут являться как водовмещающими, так и водоупорными.

Второй гидрогеологический комплекс представлен глинистыми и нетрещиноватыми кремнистыми породами и линзами песчаного материала палеогенового и верхнемелового возраста, слагающими мощную относительно водоупорную толщу, содержащую в себе отдельные водоносные горизонты.

По отношению к ММП подземные воды Ямала подразделяются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные. Сведения о надмерзлотных и межмерзлотных водах приводятся в ряде литературных источников (Геокриология..., 1989, Инженерно-геологический..., 1996, Трофимов и др., 1986, Трофимов, 1977).

К первым относятся воды сезонноталого слоя и воды несквозных таликов. Воды сезонноталого слоя залегают на глубине 0,2-1,0 м, питаются за счет атмосферных осадков и таяния подземного льда. Воды характеризуются малой минерализацией и гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-кальциевым или гидрокарбонатно-хлоридно-натриево-магниевым составом. Воды несквозных таликов распространены под руслами рек

и озерами. Мощность водоносного горизонта от нескольких метров до десятков метров. Воды слабо минерализованы, по химическому составу близки к водам сезонного слоя.

Межмерзлотные воды на полуострове вскрыты отдельными скважинами; информация об их характеристиках ограниченная. Однако, есть данные, говорящие о высокой минерализации вод (до 90 г/л), их хлоридно-натриевом, хлоридно-натриево-магниевом или гидрокарбонатно-хлоридно-натриевом составе. Высказываются предположения об отсутствии связи вод с морем и залегании водоносных слоев в виде замкнутых линз.

Сведения о подмерзлотных водах Ямала, залегающих на больших глубинах, крайне ограничены. В литературе признается факт их наличия, высказываются предположения о приуроченности водоносного горизонта к песчаным отложениям ямальской серии (Геокриология..., 1989, Трофимов и др., 1986), дается приблизительная оценка его мощности.

2. Инженерно-геокриологическая характеристика участка изысканий

2.1. Геоморфология участка

Участок изысканий расположен на полуострове Ямал в долине реки Ерката-яха. Река имеет равнинный характер и характеризуется широкопойменной андрирующей долиной. Административно площадь работ относится к Ямало-Ненецкому автономному округу Ямальского района.

Бассейн р. Ерката-яха расположен на юго-западе Ямала и граничит с бассейнами рек Ензор-яха на юге, Хэ-яха на севере и Юрибей на востоке. Река Ерката-яха - приток Байдарацкой губы, протекает по всхолмленной, частично заболоченной равнине. Площадь водосбора и протяженность реки составляет 3440 км² и 189 км. Самый крупный приток, впадающий справа в 43 км от устья, р. Паюта-яха – 157 км.

Ниже устья р. Паюта-яхи проявляется влияние приливно-отливных течений. В пойме реки расположены многочисленные озера, большей частью соединяющиеся протоками с рекой и друг с другом постоянно или только во время паводков. Некоторые озера образовались на месте старого речного русла, другие - замкнуты, третьи - объединяются в озерные системы, где водообмен поддерживается за счет расположения водоемов на разной высоте над уровнем моря.

Озера - термакарстового происхождения, образовавшиеся при протаивании мерзлотных грунтов. Глубина озер обычно невелика - от 1 до 7 м. Часть озер в период межени стекает и сокращает свою площадь.

Ледостав на р. Еркатаяха, как и на других реках Южного Ямала, приходится на вторую декаду октября, вскрытие ото льда в зависимости от хода весны - на конец мая - середину июня (Природа Ямала, 1995). Активная реакция воды в реке и озерах бассейна близка к нейтральной (рН=6,6-7,2).

Трасса магистрального трубопровода Ямал-Центр пересекает пойму и первую террасу на правом берегу р. Ерката-Яха. Поверхность слабо заболочена, покрыта тундровой растительностью. Мощность снежного покрова уменьшается в сторону реки с 0,4 до 0,2 м, плотность снега 0,190 г/куб. см.

2.2. Геокриологические условия участка.

Температура многолетнемерзлых пород на глубине 10 м на правом берегу увеличивается по мере удаления от русла – от $-2,7^{\circ}\text{C}$ до $-0,5^{\circ}\text{C}$. Пески в верхней части разреза массивной криотекстуры, которая в пределах пойменной ложбины переходит в тонкошлировую горизонтально-слоистую криотекстуру, а в средней пойме – в атакситовую криотекстуру. Ниже залегают супеси, суглинки иловатые и пески пылеватые, у которых по всему разрезу встречается массивная криотекстура. Супеси тяжелые, залегающие ниже, у уреза воды имеют редкослоистую среднешлировую криотекстуру, которая с удалением от русла меняется на массивную, а в пределах заросшей пойменной ложбины переходит в тонкошлировую, редкослоистую криотекстуру. В основании разреза находятся глины темно-серые, криотекстура которых меняется от сетчатой в пределах бечевника у уреза воды до слоистой среднешлировой в приречной зоне поймы. В пределах пойменной ложбины глины встречаются в мерзлом состоянии с редкими горизонтальными шлирами льда.

Среднее значение температуры ММП на глубине 10 м составляет: $-1,6^{\circ}\text{C}$.

2.3. Состав и физические свойства грунтов

Инженерно-геологический разрез представлен рыхлыми отложениями разного возраста и состава. Литологическое описание разреза производится сверху вниз.

Торф, мох мощностью 0,4 м наблюдается только в пределах скв. 35.

Супесь светло-коричневая, текучая, с глубины 0,4 м мерзлая, атакситовой криотекстуры встречается только в скв. 36 в заросшей пойменной ложбине с мелкими озерами глубиной до 0,4 м.

Песок пылеватый, кварцевый светложелтый, влажный, с глубины 3-4 м мерзлый вскрывается повсеместно на всем участке работ. Криотекстура массивная. Мощность слоя до 11 м.

Песок мелкий, серый, полимиктовый, массивной текстуры встречается только в скв. 34 близко к урезу воды и имеет мощность 2,5 м.

Супесь легкая, темно-серая, массивной криотекстуры встречается в каждой скважине. В правой части разреза (скв. 35, 36) имеет прослой текучей супеси. Мощность слоя от 2 до 13 м.

Суглинок тяжелый, иловатый встречается в скважинах 33, 34, 35. Имеет мощность от 3 до 10 м. В скв. 34 залегает в интервале глубин 11-20,8 м, при этом до глубины 14 м мерзлый, массивной криотекстуры. С 14 м до 19 м текуче-пластичный, глубже – мерзлый.

Песок пылеватый серый мерзлый, массивной криотекстуры встречается по всему разрезу и имеет мощность от 5 до 7 м.

Супесь тяжелая, темно-серая встречается в скв. 33,35,36. Криотекстура в скв. 33, 36 редкослоистая, среднешлировая, в скв. 35 супесь имеет массивную криотекстуру. Мощность слоя 4 м.

Глина серая, мерзлая сетчатой криотекстуры встречается в каждой скважине и залегает на глубине 28 м.

В пределах описанного разреза по физическим свойствам и криогенному строению было выделено 8 Инженерно-Геологических Элементов (ИГЭ).

ИГЭ-1 Супесь светло-коричневая, текучая. Интервал залегания 0-2,3 м. С глубины 0,4 м мерзлая, атакситовой криотекстуры. Суммарная влажность 0,69 д.е. Плотность 1,72 кг/м³.

ИГЭ-2 Песок пылеватый, кварцевый, светло-желтый. Интервал залегания 2,3-7,7 м. С глубины 2,8 м мерзлый. Криотекстура массивная. Суммарная влажность 0,25 д.е. Плотность 1,84 кг/м³.

ИГЭ-3 Песок мелкий, серый, полимиктовый. Криотекстура массивная. Интервал залегания 7,7-9,2 м. Суммарная влажность 0,26 д.е. Плотность 1,89 кг/м³.

ИГЭ-4 Супесь легкая, иловатая, черная, с растительными остатками и прослоями песка. Криотекстура массивная. Интервал залегания 11,8-13,5 м. Суммарная влажность 0,24 д.е. Плотность 1,85 кг/м³.

ИГЭ-5 Суглинок тяжелый, пылеватый. Интервал залегания 13,5-20,8 м. Криотекстура массивная. Суммарная влажность 0,29 д.е. Плотность 1,94 кг/м³.

ИГЭ-6 Песок пылеватый, кварцевый, серый. Криотекстура массивная. Интервал залегания 20,8-26,4 м. Суммарная влажность 0,22 д.е. Плотность 1,9 кг/м³.

ИГЭ-7 Супесь тяжелая, темно-серая. Криотекстура среднешлировая. Интервал залегания 26,4-28,5 м. Суммарная влажность 0,21 д.е. Плотность 1,89 кг/м³.

ИГЭ-8 Глина темно-серая, мерзлая. Криотекстура сетчатая. Интервал залегания 28,5-40 м. Суммарная влажность 0,27 д.е. Плотность 1,8 кг/м³.

3. Прогноз взаимодействия ММП с проектируемыми сооружениями

Проектирование, строительство и эксплуатация инженерных сооружений на мерзлых грунтах имеет ряд особенностей. Одной из главных особенностей является необходимость учитывать и регулировать теплообмен грунта с сооружениями, а так же внешней средой. В случае нарушения теплообмена, изменение температуры грунта ведет к изменению состава, строения и свойств горных породы, как следствие, изменение прочности и несущей способности грунта. Возможно образование следующих процессов: термоэрозия, наледи, термокарст, солифлюкция, морозное пучение и другие криогенные процессы. Изменение глубин сезонного протаивания и промерзания и последующее изменение режима грунтовых вод часто приводит к образованию наледного процесса [Ершов, 2002]. Прогнозные мероприятия начинаются с основных вычислений – определения величины естественной и нормативной глубин сезонного оттаивания грунтов, значения которых будут использоваться в последующих расчетах.

3.1. Методика расчета и результаты вычислений

3.1.1. Расчет глубины сезонного протаивания в естественных условиях

Расчет глубины сезонного протаивания в естественных условиях по методике Кудрявцева В.А.

Все виды прогнозных расчетов глубин промерзания и протаивания пород базируются на средних температурах поверхности грунта (t_0) за период колебания, а по методике В.А. Кудрявцева, учитывающей периодически установившийся режим температурных колебаний, еще и на амплитуде этих колебаний (A_0). Среднегодовая температура на поверхности отличается от температуры воздуха. Снежный покров увеличивает среднегодовую температуру на $\Delta t_{сн}$. Растительный, особенно моховой, покров может и повышать, и понижать температуру, но чаще – понижает на $\Delta t_{раст}$. Годовая амплитуда колебания температур под снежным и растительным покровом уменьшается. Эти поправки следует внести, используя метеорологические данные.

Отепляющее действие снега на породу рассчитывается по формуле:

$$\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн} = \frac{A_в}{2} \left(1 - e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{KT}}} \right),$$

где $A_в$ – метеорологическая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха, градус; T – период колебания температур, z – мощность снежного покрова, м; K – коэффициент температуропроводности снежного покрова.

Поскольку отепляющее действие снежного покрова ограничивается зимним временем, можно принять, что $\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн}$.

Абсолютные значения величины воздействия мха на температуру и амплитуду годовых колебаний, полученные по многолетним наблюдениям, приведены ниже:

Мощность мха, м	$\Delta t_{раст}$	$\Delta A_{раст}$
0,1	0,4	2,1
0,2	0,6	3,2
0,3	0,7	3,9
0,4	0,8	4,5

Значения среднегодовой температуры и амплитуды колебаний температур на поверхности вычисляются по формулам:

$$t_0 = t_e + \Delta t_{сн} - \Delta t_{раст},$$

$$A_0 = \frac{A_e}{2} - \Delta A_{сн} - \Delta A_{раст}.$$

Исходными параметрами формул для вычисления по методике В.А. Кудрявцева глубин сезонного протаивания и промерзания являются среднегодовая температура на подошве СТС-СМС ($t_{\xi} \approx t_0$), амплитуда колебаний годовых температур на поверхности (A_0), теплопроводность ($\lambda_{ср}$) и теплоемкость (C_{th}) горных пород, теплота фазовых переходов (z_v). Методика учитывает периодически установившийся температурный режим, являясь обобщением законов Фурье, а с учетом условия Стефана на разделе фаз - и фазовые переходы.

Значения объемной теплоемкости талой породы (C_{th}) и коэффициента теплопроводности λ_{cp} определяются по СНиП 2.02.04-88. При допуске равенства теплопроводностей талой λ_{th} и мерзлой λ_f породы принимается среднее значение λ_{cp} между ними.

Теплота фазовых переходов (z_v) зависит от влажности породы за вычетом воды, не замерзающей при данной (условно – среднезимней) температуре. Последняя определяется по формуле:

$$t_{зим} = \frac{t_{min}}{2} = \frac{|t_0| + A_0}{2}.$$

Далее производится расчет:

$$z_v = z_0 (w_{tot} - w_w) \rho_{df},$$

где z_0 - удельная теплота фазовых переходов воды, равная 93 Вт·ч/кг; w_{tot} и w_w - соответственно суммарная влажность и влажность за счет незамерзшей воды; ρ_{df} - плотность сухого грунта, кг/м³.

Вычисляются две безразмерные переменные:

$$a = \frac{A_0 \cdot 2C_{th}}{z_v},$$

$$b = \frac{|t_0| \cdot 2C_{th}}{z_v}.$$

По ним определяется безразмерная величина ξ^* , а затем – мощность СТС ($\xi_{сез}$) по формулам:

$$\xi^* = \sqrt{(m + n)^2 + n} - m;$$

$$n = \ln \frac{a+1}{b+1}, \quad m = \frac{1}{2} \left[(a-b) \left(1 + \frac{1}{n} \right) - n \left(2 + \frac{1}{a-b} \right) \right].$$

$$\xi_{сез} = \sqrt{\frac{\lambda_{cp} T}{\pi C_{th}}} \xi^* .$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Данные значения будут использованы для произведения последующих вычислений.

Таблица 1 Сводная таблица исходных и рассчитанных значений

Отепляющее воздействие растительности	$\Delta t_{раст}, ^\circ\text{C}$	0,8
Отепляющее воздействие снежного покрова	$\Delta t_{сн}, ^\circ\text{C}$	4,8
Среднегодовая температура воздуха	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	-7,8
Среднегодовая температура на поверхности	$t_0, ^\circ\text{C}$	-3,8
Амплитуда годовых колебаний температуры воздуха	$A_{в}, ^\circ\text{C}$	41,8
Среднезимняя температура	$t_{зим}, ^\circ\text{C}$	7,7
Среднегодовая амплитуда температур на поверхности	$A_0, ^\circ\text{C}$	11,6
Удельная теплота фазовых переходов воды	$L_0, \text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$	93
Плотность сухого грунта	$P_{d,p}, \text{кг}/\text{м}^3$	1484
Суммарная влажность	$W_{tot}, \text{д.ед.}$	0,26
Влажность за счет незамерзшей воды	$W_w, \text{д.ед.}$	0
Теплота фазовых переходов	$L_v, \text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	35886
Объемная теплоемкость талого грунта	$C_{th}, \text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	759,8
Теплопроводность грунта	$\lambda_{cp}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	2,195
Переменная	a	0,49
Переменная	b	0,16
Переменная	n	0,25
Переменная	m	0,195
Период колебания температур	T, ч	8760
Безмерная величина	ζ^*	0,47
Глубина сезонного протаивания в естественных условиях	$\zeta_{сез}, \text{м}$	1,35

3.1.2 Расчет нормативной глубины сезонного протаивания

Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта определяется как наибольшая его глубина, наблюдаемая за срок не менее 10 лет на участках, где слой сезоннопромерзающего-оттаивающего грунта сливается с ММП; при этом опытная площадка должна быть без растительного и торфяного покрова и очищаться весной от снега. Нормативная глубина сезонного оттаивания и промерзания отличается от тех же глубин в естественных условиях, где на них действует ряд дополнительных факторов – снежный и растительный покров, инфильтрация атмосферных осадков, радиационная составляющая и др. Нормативные глубины, учитывающие условия строительной площадки, обычно оказываются больше естественных.

Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта $d_{th,n}$, м, устанавливается по данным натурных наблюдений. Поскольку организация режимных наблюдений во время изысканий не всегда возможна, при отсутствии многолетних данных нормативные глубины сезонного оттаивания допускается рассчитывать по формуле:

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th,c} - T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \frac{Q}{2q_1},$$

где Q – теплоток в мерзлые породы (тепло, расходуемое на летний обогрев ММП), ккал/м²; q_1 – количество открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе, ккал/м³;

$$Q = \left(0,25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right)(T_0 - T_{bf})k_m \sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}};$$

$$q_1 = L_v + \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0,1\right)[C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})];$$

где $t_{th,c}$ – расчетный период положительных температур, ч, определяемый по формуле

$$t_{th,c} = 1,15 \cdot t_{th,m} + 0,1 \cdot t_1;$$

t_1 – время, принимаемое равным 3600 ч; t_2 – время, принимаемое равным 7500 ч; $T_{th,c}$ – расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С, определяемая по формуле

$$T_{th,c} = 1,4T_{th,m} + 2,4;$$

$T_{th,m}$ и $t_{th,m}$ – средние по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур, °С, и продолжительность этого периода, ч, принимаются по СП 131.13330.2012; T_{bf} – температура начала замерзания грунта, °С, определяемая по СП 25.13330.2012; T_0 – расчетная среднегодовая температура ММП, °С; C_f и C_{th} – объемная

теплоемкость, соответственно, мерзлого и талого грунта, Дж/(м³·°С) [ккал/(м³·°С)]; λ_f и λ_{th} – теплопроводность, соответственно, мерзлого и талого грунта, Вт/(м·°С) [ккал/(м·ч·°С)]; k_m – коэффициент, принимаемый для песчаных пород равным 1,0, а для пылевато-глинистых – в зависимости от значения теплоемкости C_f и средней температуры грунта \bar{T} , °С, определяемой по формуле:

$$\bar{T} = (T_0 - T_{bf}) \left(\frac{t_{th,c}}{t_1} - 0,22 \right),$$

L_v – теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м³ [ккал/м³], определяемая при температуре грунта, равной $0,5\bar{T}$, °С.

Вывод: результаты расчетов приведены в табл. 2. Величина нормативной глубины сезонного оттаивания грунтов будет использована для расчета ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода, который проектируется на данном участке изучения.

Таблица 2 Сводная таблица исходных и рассчитанных значений

Расчетный период положительных температур	$t_{th,c}$, ч	3672
Расчетная температура поверхности грунта в летний период	$T_{th,c}$, °C	16,54
Температура начала замерзания грунта	T_{bf} , °C	-0,1
Средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур	$T_{th,m}$, °C	10,1
Продолжительность периода положительных температур	$t_{th,m}$, ч	2880
Объемная теплоемкость мерзлого грунта	C_f , Дж/(м ³ ·°C) [ккал/(м ³ ·°C)]	1,91 [530,2278]
Объемная теплоемкость талого грунта	C_{th} , Дж/(м ³ ·°C) [ккал/(м ³ ·°C)]	2,73 [759,909]
Теплопроводность мерзлого грунта	λ_f , Вт/(м·°C) [ккал/(м·ч·°C)]	2,48
Теплопроводность талого грунта	λ_{th} , Вт/(м·°C) [ккал/(м·ч·°C)]	1,91
Безразмерный коэффициент	k_m	1
Средняя температура грунта	\bar{T} , °C	-0,32
Теплота таяния (замерзания) грунта	L_v , Дж/м ³ [ккал/м ³]	45216,6
Количество открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе	q_1 , ккал/м ³	50225,03
Теплопоток в мерзлые породы	Q , ккал/м ²	676,8
Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта	$d_{th,n,m}$	2,15

3.1.3. Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода

На правом берегу реки Ерката-яха, на территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород, планируется строительство небольшого поселка с различными инженерными сооружениями, а также проектируется участок магистрального трубопровода Ямал-Центр.

В связи с тем, что подземные трубопроводы являются мощными источниками тепла, оказывающими большое влияние на температурное поле грунта, температура вмещающей их породы повышается и она теряет прочность. Это нужно учитывать, чтобы избежать деформаций зданий над трубопроводом, основание которых окажется в зоне такого влияния, а также для того, чтобы избежать нарушения устойчивости самого трубопровода.

Исходя из всего вышеперечисленного, появляется необходимость проведения вычислений, направленных на расчет ореола оттаивания вокруг проектируемого трубопровода.

Проектируемый низкотемпературный трубопровод будет расположен на правом берегу реки Ерката-яха. Радиус трубы, $r_{тр} = 0,65$ м, Степень заполнения трубопровода 100%, глубина заложения трубопровода, $h = 2,65$ м. Температура теплоносителя, $t_c = 5$ °С, Температура грунта, $t_0 = -2$ °С. Коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта: $\lambda_t = 1,91$ Вт/(м·°С), $\lambda_m = 2,48$ Вт/(м·°С).

Необходимо найти глубину оттаивания под центром трубы h_n , мощность мерзлого грунта над центром трубы h_b , радиус ореола оттаивания вокруг трубы $r_{от}$ и величину смещения вниз центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы.

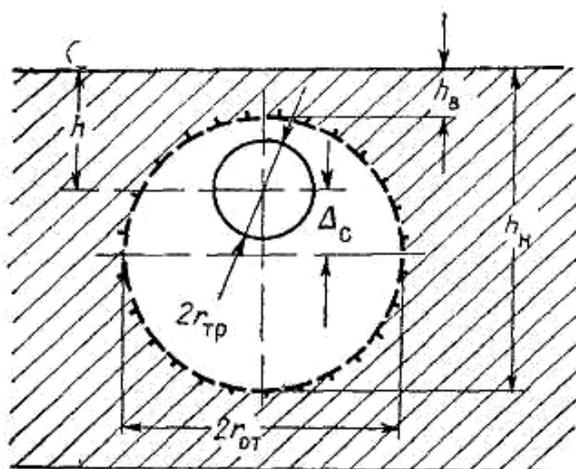


Рисунок 1 Схема к расчету ореола оттаивания многолетнемерзлых пород вокруг трубопровода

Сначала по таблице 3 находим коэффициент v , который понадобится для дальнейших расчетов, при $t_c = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ и 100% заполненности трубы.

Таблица 3 Значения коэффициента v .

$t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	v при различной степени заполнения трубы(%)		
	10	30	100
0	0,80	0,95	1,0
-2	0,75	0,85	1,0
-4	0,70	0,80	1,0
-6	0,66	0,77	1,0

$$v = 1.$$

Далее рассчитываем безразмерную температуру β_t и m (отношение глубины заложения трубы к ее радиусу):

$$\beta_t = -\lambda_{mto}/v\lambda_t t_c = 0,52$$

$$m = \frac{h}{r_{тр}}, m = 4,08.$$

Затем рассчитывается термическое сопротивление грунта теплопередаче R_t и безразмерный параметр n :

$$R_t = 1/2\pi\lambda_t \cdot \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) = 0,17 \text{ (м }^\circ\text{C)/ Вт,}$$

$$n = 2\pi\lambda_t\beta_t R_t / 1 + \beta_t = 0,71$$

Таким образом, глубина оттаивания под центром трубы h_n :

$$h_n = r_{тр} \sqrt{m^2 - 1} \cdot \frac{e^n + 1}{e^n - 1} = 7,52 \text{ м.}$$

Мощность мерзлого грунта над центром трубы h_b :

$$h_b = r_{тр} \sqrt{m^2 - 1} \cdot \frac{e^n - 1}{e^n + 1} = 0,88 \text{ м.}$$

Величина смещения вниз центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы $\Delta_{от}$:

$$\Delta_{от} = 0,5 (h_n + h_b) - h = 1,55 \text{ м.}$$

Радиус ореола оттаивания вокруг трубы $r_{от}$:

$$r_{от} = 0,5(h_n - h_b) = 3,32 \text{ м.}$$

Вывод: так как трубопровод располагается в слое песка с влажностью $W=0,25$, то возможно всплытие трубопровода из-за водонасыщенности грунта и, как следствие, деформации конструкции. Для того, чтобы предотвратить всплытие трубы, необходимо зафиксировать трубопровод нагнетательным способом.

3.1.4. Расчет глубины протаивания-промерзания под дном озера

В долине реки Ерката-яха, в пределах пойменной ложбины, распространены мелкие озера термокарстового происхождения глубиной до 0,4 м, одно из которых располагается как раз на территории проектируемого поселка. Таким образом, возникает необходимость произвести расчеты с целью прогнозирования динамики температурного режима под дном этого водоема. Цель – выяснить характер термокарста, а также определить глубину сезонного промерзания-протаивания под дном озера. В случае прогрессирующего термокарста возникает опасность глубокой деградации ММП, в случае затухания - ситуация стабилизируется.

Для этого нужно знать глубину залегания нулевой среднегодовой изотермы H_1 под слоем воды или донных осадков, глубину водоема H и мощность льда H_i . В зависимости от глубины водоема возможны 3 варианта:

1. Глубина водоема меньше H_1 , т.е. $H < H_1$. Донные отложения находятся в многолетнемерзлом состоянии и оттаивают летом на глубину $\xi_{сез}$.

2. Глубина водоема больше H_1 , но меньше мощности льда H_i ($H_1 < H < H_i$). Имеет место сезонное промерзание донных отложений, а кровля ММП залегает ниже, образуя несквозной талик. Возможен затухающий термокарст.

3. Глубина водоема больше H_i , т.е. $H > H_i$. Под водоемом развивается активный термокарст.

В нашем случае глубина озера $H = 0,4$ м. Мощность снега $m = 0,2$ м. Мощность льда $H_i = 1,4$ м. Метеорологическая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха $A_B = 41,8$ °С. Среднегодовая температура воздуха $t_B = -7,8$ °С. Отопляющее действие снежного покрова $\Delta t_{сн} = 4,81$ °С.

Сначала узнаем среднегодовую температуру на поверхности льда ($t_{0,i}$) и амплитуду годовых колебаний температур ($A_{0,i}$).

$$t_{0,i} = -2,99 \text{ °С},$$

$$A_{0,i} = 16,09 \text{ °С}.$$

Находим минимальную и максимальную температуры на поверхности озера:

$$t_{w,\min} = A_{0,i} - t_{0,i} = 19,1 \text{ °С},$$

$$t_{w,\max} = A_{0,i} + t_{0,i} = 13,1 \text{ °С}.$$

Затем определяем глубину залегания нулевой среднегодовой изотермы H_1 :

$$H_1 = H_i \left(1 + \frac{t_{w,\max}}{t_{w,\min}} \right),$$

$$H_1 = 0,34 \text{ м.}$$

Таким образом, глубина водоема больше H_1 ($0,4 > 0,34$), но меньше мощности льда H_i ($0,34 < 0,4 < 1,4$). Имеет место сезонное промерзание донных отложений, а кровля ММП залегает ниже, образуя несквозной талик. Имеем дело с затухающим термокарстом.

Для вычисления глубины сезонного промерзания или протаивания под дном водоема необходимо определить среднегодовую температуру на поверхности дна t_H и амплитуду колебаний температур A_H на дне водоема:

$$t_H = \frac{\frac{H_i - H}{H_i} t_{w,\min} + t_{w,\max}}{2},$$

$$A_H = t_{w,\max} - t_H.$$

$$t_H = -2,99 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$A_H = 16,09 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Находим среднезимнюю температуру $t_{зим}$:

$$t_{зим} = \frac{t_{\min}}{2} = \frac{|t_0| + A_0}{2}.$$

$$t_{зим} = 6,55 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Вычисляем теплоту фазовых переходов z_v :

Плотность сухого грунта (супесь) $\rho_{d,f} = 1075,6 \text{ кг/м}^3$

Суммарная влажность супеси $W_{tot} = 0,72 \text{ д.ед.}$

Влажность за счет незамерзшей воды супеси $W_w = 0,11 \text{ д.ед.}$

Удельная теплота фазовых переходов воды $L_0 = 93 \text{ Вт*ч/кг.}$

$$z_v = z_0 (w_{tot} - w_w) \rho_{d,f} = 61017,73 \text{ Вт*ч/м}^3$$

Вычисляются две безразмерные переменные a , b :

$$a = \frac{A_0 \cdot 2C_{th}}{z_v},$$

$$b = \frac{|t_0| \cdot 2C_{th}}{z_v}.$$

$$a = 2,19, b = -0,41.$$

По ним определим безразмерные величины ξ^* , m , n , а затем – мощность сезонно-талого слоя ($\xi_{\text{сез}}$).

$$\xi^* = \sqrt{(m+n)^2 + n} - m;$$

$$n = \ln \frac{a+1}{b+1}, \quad m = \frac{1}{2} \left[(a-b) \left(1 + \frac{1}{n} \right) - n \left(2 + \frac{1}{a-b} \right) \right].$$

$$n = 1,69, \quad m = 0,063, \quad \xi^* = 1,67.$$

Зная теплопроводность супесей $\lambda_{\text{cp}} = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, объемную теплоемкость в талом состоянии $C_{\text{th}} = 4159,06 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, вычисляем глубину сезонного протаивания $\xi_{\text{сез}}$,

$$\xi_{\text{сез}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{cp}} T}{\pi C_{\text{th}}}} \xi^*.$$

$$\xi_{\text{сез}} = 1,94 \text{ м}.$$

Вывод: глубина сезонного протаивания получилась равной 1,94 м. Имеет место сезонное протаивание донных отложений озера, кровля многолетнемерзлых пород залегает ниже их, образуя несквозной талик. Под озером термокарст не прогрессирует в следствие отрицательных температур на поверхности дна (затухающий термокарст).

3.1.5. Расчет чаши оттаивания под зданием

В пределах поселка проектируется большое количество зданий и сооружений, в связи с чем возникает необходимость учета их теплового воздействия на температурное поле и свойства грунтов основания вплоть до формирования чаши протаивания (рис.1).

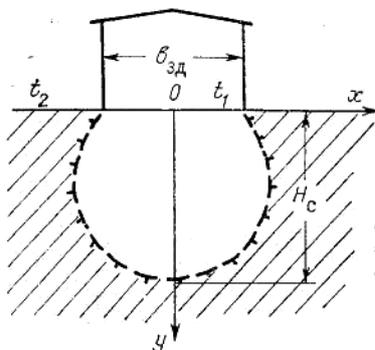


Рисунок 2 Схема к расчету чаши оттаивания в многолетнемерзлых породах

Чтобы корректно отрисовать контур чаши оттаивания, необходимо рассчитать глубину оттаивания под серединой здания H_c и под его краем H_e .

Определим параметры чаши оттаивания для одного из проектируемых сооружений, расположенного на участке с ММП сливающегося типа, к концу срока эксплуатации $\tau = 175200$ ч, если длина здания $L_{зд}=24$ м, ширина $b_{зд}=12$ м, термическое сопротивление пола $R^{\circ}=1,4$ ($\text{м}^2\text{°C}/\text{Вт}$); коэффициент теплообмена на поверхности пола $a_b=8,7$ $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$; температура воздуха в помещении $t_{зд}=19$ °C .

Грунт, в котором будет расположен фундамент сооружения, - песок с суммарной влажностью $W_{tot}=0,26$, плотностью сухого мерзлого грунта $\rho_{см}=1484,13$ $\text{кг}/\text{м}^3$, коэффициентами теплопроводности талого грунта $\lambda_t=1,91$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$, мерзлого $\lambda_m=2,48$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$; среднегодовая температура ММП на подошве слоя сезонного оттаивания вне контура здания $t^{\circ}=-2,5$ °C .

Расчет глубины оттаивания грунтов H в основании сооружения (считая от поверхности грунта под сооружением), за время его эксплуатации τ , производится по формулам:

Под серединой сооружения:

$$H_c = k_n (\xi_c - k_c) B;$$

Под краем сооружения:

$$H_e = k_n (\xi_e - k_e - 0,1\beta\sqrt{\psi}) B,$$

где H_c и H_e – глубина оттаивания грунтов, соответственно, под серединой и краем сооружения, м; k_n – коэффициент, определяемый по табл. 4 в зависимости от отношения L/B (соответственно длина и ширина сооружения, м) и значений параметров β и Ψ ; ξ_c, k_c и ξ_e, k_e – коэффициенты, определяемые по графикам (рис. 3, 4, 5, 6) в зависимости от значений параметров α_R, β и Ψ .

Сначала найдем значения параметров α_R, β и Ψ :

$$\alpha_R = \frac{\lambda_{th} R_0}{B}; \alpha_R = 0,22.$$

$$\beta = -\frac{\lambda_f (T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th} (T_{in} - T_{bf})}; \beta = 0,16.$$

$$\psi = \frac{\lambda_{th} T_{in} \tau}{L_v B^2}, \Psi = 0,98.$$

Далее по табл. 4 находим значение k_n :

при $\Psi = 0,98, \beta = 0,16, L/B = 2, k_n = 0,93$.

Таблица 4 Значения k_n

Ψ	Значения коэффициента k_n																
	для круглых в плане сооружений при β , равном					для прямоугольных в плане сооружений при											
						$L/B=1$ и β , равном					$L/B=2$ и β , равном						$L/B > 3$
	0	0,4	0,8	1,2	2,0	0	0,4	0,8	1,2	2,0	0	0,4	0,8	1,2	2,0		
0,10	0,97	0,87	0,82	0,76	0,71	1,00	0,93	0,87	0,83	0,80	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95	1,0
0,25	0,93	0,79	0,71	0,64	0,61	0,95	0,85	0,78	0,74	0,68	1,00	0,97	0,92	0,89	0,87	0,86	1,0
0,50	0,91	0,71	0,62	0,61	0,61	0,94	0,78	0,68	0,66	0,68	0,99	0,95	0,88	0,85	0,83	0,82	1,0
1,00	0,90	0,64	0,57	0,59	0,61	0,92	0,70	0,63	0,66	0,68	0,97	0,90	0,82	0,79	0,77	0,76	1,0
1,50	0,89	0,59	0,56	0,59	0,61	0,90	0,64	0,63	0,66	0,68	0,96	0,87	0,80	0,77	0,75	0,74	1,0
2,50	0,88	0,54	0,56	0,59	0,61	0,89	0,58	0,63	0,66	0,68	0,95	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	1,0
3,50	0,87	0,53	0,56	0,59	0,61	0,88	0,57	0,63	0,66	0,68	0,94	0,83	0,77	0,74	0,72	0,71	1,0

По графикам (рис. 3-6) определяем ξ_c , k_c , ξ_e , k_e :

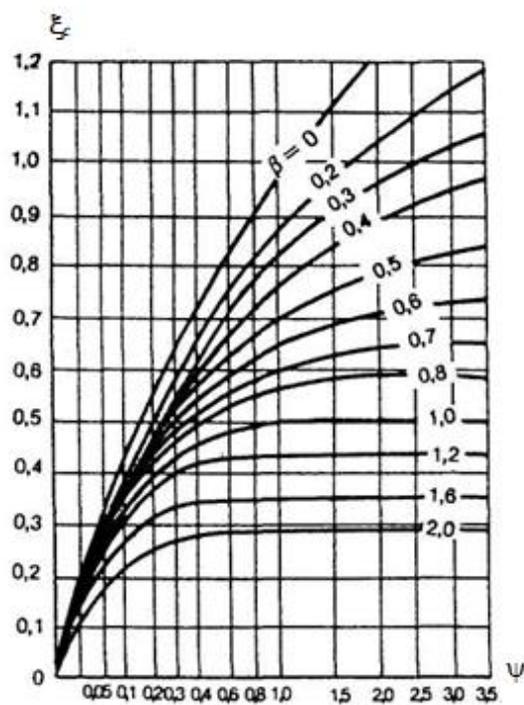


Рисунок 3 График для определения коэффициента ξ_c

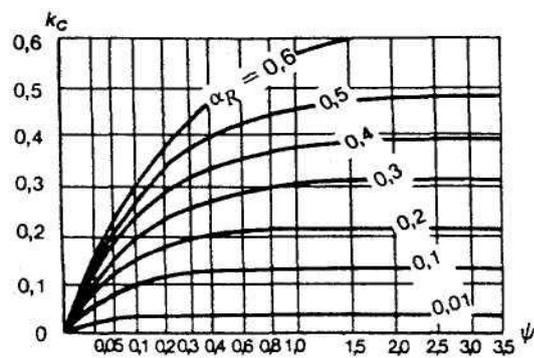


Рисунок 4 График для определения коэффициента k_c

$$\xi_c = 0,86; k_c = 0,22;$$

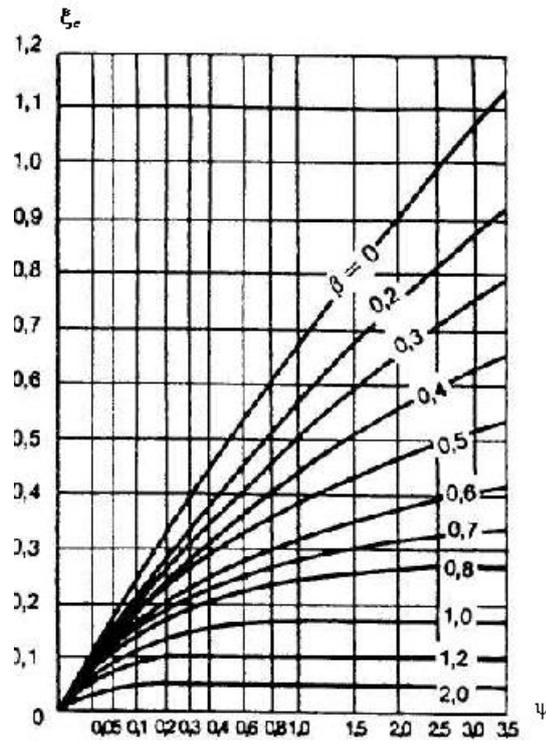


Рисунок 5 График для определения коэффициента ξ_c

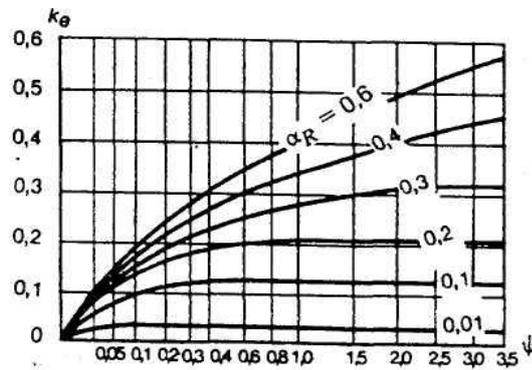


Рисунок 6 График для определения коэффициента k_e

$$\xi_c = 0,56; k_e = 0,21;$$

Исходя из этого, находим глубину оттаивания грунтов под серединой и краем сооружения.

Под серединой:

$$H_c = k_n(\xi_c - k_e)B; H_c = 7,14 \text{ м.}$$

Под краем:

$$H_e = k_n(\xi_c - k_e - 0,1\beta\sqrt{\psi})B, H_e = 3,73 \text{ м.}$$

Теперь необходимо определить осадку S фундамента здания, чтобы предупредить возможные деформации конструкции.

Величина осадки определяется по формуле Пчелинцева А.М.:

$$S = \frac{p_s(W_{tot}-W_m)}{1+p_s} * h ,$$

где p_s – плотность минеральных частиц грунта, г/см³; W_m – влажность минеральных прослоев, доли ед.; h – мощность оттаянного слоя, см; W_{tot} – суммарная влажность грунта, доли ед.

Таким образом, $S = 2,66*(0,25-0,1)*7,14 / (1+2,66) = 0,77 \text{ м} = 77 \text{ см}$.

Вывод: в результате проведенных расчетов глубины оттаивания выяснилось, что для проектируемого здания ее значение составит 7,14 м, и при этом возникнет огромная осадка (77 см) при оттаивании грунтов, которая в 2 раза превышает допустимую (5см/м оттаявшего грунта). Поэтому в целях предотвращения возможных деформаций, связанных с большой величиной осадки, рекомендуется выбрать свайный фундамент. При этом сваи будут проходить через слой песков (ИГЭ-1) и упираться в супеси (ИГЭ-2).

А для ограничения глубины оттаивания грунтов в основании сооружения следует предусмотреть 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 ниже глубины заложения подошвы фундамента путем регулирования температуры воздуха в подпольях или технических этажах здания.

3.1.6. Расчет несущей способности основания на примере единичной сваи

Для предотвращения разрушения и деформации как фундаментов, так и самих зданий на данном участке необходимо рассчитать несущую способность основания – максимальную нагрузку, которую способны нести сваи. Превышение данного значения ведет к предельному состоянию – когда элемент конструкции начинает разрушаться.

Величина несущей способности сваи может также учитываться при проектировании и строительстве мостовых переходов автодороги через пониженные участки (ложбины) территории, так как для них тоже необходимо свайное основание.

Для вычисления несущей способности было выбрано то же здание, что и в предыдущих расчетах.

Несущая способность основания, F_u , кН (кгс), вертикально нагруженной висячей сваи определяется по формуле:

$$F_u = m(RA + \sum_{i=1}^n R_{a.f.i}A_{a.f.i}),$$

где m - коэффициент условий работы грунтового основания (таблица 5); R – расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи, кПа (кгс/см²); A – площадь опирания сваи на грунт, м² (см²); $R_{a.f.i}$ – расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания фундамента в пределах i -го слоя грунта, кПа (кгс/см²); $A_{a.f.i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м² (см²); n – число выделенных при расчете слоев ММП.

Для проектируемого сооружения, длина которого 24 м, а ширина 12 м, был выбран свайный фундамент с забивными сваями 0,3х0,3 м длиной 14 метров. Грунтами основания являются супеси (ИГЭ-4), залегающие под песками (ИГЭ-1).

Таким образом, коэффициент условий работы грунтового основания, исходя из таблицы 5, равен 1,2.

Таблица 5 Значения коэффициента условий работы m

Фундаменты	Значения m при заглублении фундамента в ММП	
	<2 м	≥2 м
Сваи:		
буроопускные и опускные бурозабивные	-	1,1
забивные и бурозасадные	-	1,2
Столбчатые фундаменты:		
при $t^{\circ} = -2^{\circ}\text{C}$	1,2	1,1
при t° выше -2°C	1,1	1,0
Примечание. t° - температура ММП на глубине 10 м		

Для начала расчета несущей способности основания необходимо определить расчетную температуру, которая соответствует минимальной несущей способности. Для свайного фундамента это будет максимальная в течение года температура ММП на глубине заложения подошвы или острия. Поэтому значения R принимается при расчетной температуре грунта T_z на глубине z , равной глубине погружения сваи (z – глубина, отсчитываемая от подошвы слоя сезонного оттаивания).

Расчетная температура грунта определяется по формуле:

$$T_z = (T_0' - T_{bf})\alpha_z + (T_0 - T_0')k_1 + T_{bf};$$

где α_z – коэффициент сезонного изменения температуры пород основания, принимаемые по табл.6 в зависимости от значения параметров $z\sqrt{C_f/\lambda_f}$, $c^{0,5}(q^{0,5})$, где z – расстояние от подошвы СТС до уровня, на котором определяется температура, м; C_f , λ_f – объемная теплоемкость, Дж/(м³·°C) [ккал/(м³·°C)], и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C) [ккал/(м·ч·°C)], мерзлых пород; k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты теплового влияния сооружения, принимаемые по табл. 7 в зависимости от отношений L/B и z/B , где L и B – длина и ширина сооружения, м.

Таблица 6 Значения коэффициента α_z

Коэффициенты	Значения $z\sqrt{C_f/\lambda_f}, c^{0,5}(ч^{0,5})$									
	0 (0)	1000 (25)	2000 (50)	3000 (75)	4000 (100)	6000 (125)	8000 (150)	10000 (175)	15000 (250)	20000 (300)
α_z	0 (0)	0,30 (0,40)	0,52 (0,67)	0,67 (0,85)	0,80 (0,95)	0,95 (1,01)	1,02 (1,03)	1,03 (1,03)	1,01 (1,01)	1,00 (1,00)

Таблица 7 Коэффициенты k для определения T_z

Форма сооружения в плане	L/B	Коэффициенты k для определения T_z											
		k_1 при z/B				k_2 при z/B				k_3 при z/B			
		0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0
Прямоугольная	1	<u>0,41</u>	<u>0,68</u>	<u>0,87</u>	<u>0,96</u>	<u>0,17</u>	<u>0,28</u>	<u>0,39</u>	<u>0,47</u>	<u>0,06</u>	<u>0,10</u>	<u>0,17</u>	<u>0,22</u>
	2	<u>0,33</u>	<u>0,56</u>	<u>0,80</u>	<u>0,93</u>	<u>0,15</u>	<u>0,26</u>	<u>0,37</u>	<u>0,45</u>	<u>0,04</u>	<u>0,06</u>	<u>0,14</u>	<u>0,20</u>
	3	<u>0,32</u>	<u>0,53</u>	<u>0,76</u>	<u>0,91</u>	<u>0,15</u>	<u>0,25</u>	<u>0,36</u>	<u>0,44</u>	<u>0,04</u>	<u>0,08</u>	<u>0,13</u>	<u>0,19</u>
	≥ 5	<u>0,29</u>	<u>0,50</u>	<u>0,71</u>	<u>0,84</u>	<u>0,15</u>	<u>0,25</u>	<u>0,35</u>	<u>0,42</u>	<u>0,03</u>	<u>0,07</u>	<u>0,12</u>	<u>0,18</u>
Круглая	-	<u>0,45</u>	<u>0,71</u>	<u>0,89</u>	<u>0,97</u>	<u>0,22</u>	<u>0,32</u>	<u>0,40</u>	<u>0,45</u>	-	-	-	-

Таким образом, получились следующие значения температуры:

Глубина, м	2	4	6	8	10	12	14
$T_z, ^\circ\text{C}$	-0,5	-0,66	-1,02	-1,23	-1,34	-1,5	-1,55

Теперь, зная температуру грунтов, с помощью таблицы 8 можно узнать расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания фундамента R_{af} .

Таблица 8 Расчетные сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания

Грунты	R_{af} (МПа) при различной температуре грунта ($^\circ\text{C}$)											
	-0,3	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-2,5	-3,0	-3,5	-4,0	-6,0	-8,0	-10,0
Песчаные	0,05	0,0	0,13	0,16	0,2	0,23	0,26	0,29	0,33	0,38	0,44	0,5
Глинистые	0,04	8 0,0 6	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23	0,25	0,30	0,34	0,38

Глубина, м	2	4	6	8	10	12	14
$T_z, ^\circ\text{C}$	-0,5	-0,66	-1,02	-1,23	-1,34	-1,5	-1,55
$R_{af}, \text{МПа}$	0,08	0,1	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16

Осталось найти расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи R.

Для этого, зная температуру грунта, его состав и глубину погружения сваи, находим соответствующее значение по таблице

Таблица 9 Расчетное сопротивление мерзлых грунтов под нижним концом сваи R

Грунты	Глубина погружения сваи, м	Расчетные давления R, кПа (МПа), при температуре грунта, °С											
		-0,3	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-6	-8	-10
При льдистости $i_i < 0,2$:													
1. Крупнообломочные	При любой глубине	2,50	3,00	3,50	4,00	4,30	4,50	4,80	5,30	5,80	6,30	6,80	7,30
2. Пески крупной и средней крупности	То же	1,50	1,80	2,10	2,40	2,50	2,70	2,80	3,10	3,40	3,70	4,60	5,50
3. Пески мелкие и пылеватые	3-5	0,85	1,30	1,40	1,50	1,70	1,90	1,90	2,00	2,10	2,60	3,00	3,50
	10	1,00	1,55	1,65	1,75	2,00	2,10	2,20	2,30	2,50	3,00	3,50	4,00
	15 и более	1,00	1,70	1,80	1,90	2,20	2,30	2,40	2,50	2,70	3,30	3,80	4,30
4. Супеси	3-5	0,75	0,85	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,70	1,80	2,30	2,70	3,00
	10	0,85	0,95	1,25	1,35	1,45	1,60	1,70	1,90	2,00	2,60	3,00	3,50
	15 и более	0,95	1,05	1,40	1,50	1,60	1,80	1,90	2,10	2,20	2,90	3,40	3,90
5. Суглинки и глины	3-5	0,65	0,75	0,85	0,95	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,80	2,30	2,80
	10	0,80	0,85	0,95	1,10	1,25	1,35	1,45	1,60	1,70	2,00	2,60	3,00
	15 и более	0,90	0,95	1,10	1,25	1,40	1,50	1,60	1,80	1,90	2,20	2,90	3,50
При льдистости грунтов $0,2 \leq i_i \leq 0,4$													
6. Все виды грунтов, указанные выше	3-5	0,40	0,50	0,60	0,75	0,85	0,95	1,00	1,10	1,15	1,50	1,60	1,70

$$R = 1,35 \text{ МПа.}$$

Теперь известны все необходимые данные для расчета несущей способности:

$$F_u = m(RA + \sum_{i=1}^n R_{a.f_i} A_{a.f_i})$$

$$F_u = 1,2 \cdot 10^4 (1,35 \cdot 0,09 + 0,3 \cdot 2 \cdot 7 \cdot (0,08 + 0,1 + 0,13 + 0,14 + 0,15 + 0,16 + 0,16)) = 8082 \text{ кН.}$$

Вывод: для строительства данного жилого здания будет использована не одна, а как минимум несколько свай, с теми же параметрами, что и данная. Значение несущей способности основания, рассчитанное для данных геологических условий, позволит проектировщикам безошибочно определить их необходимое количество и расположение.

Заключение

Изучение взаимодействия многолетнемерзлых грунтов с инженерными сооружениями проводилось на территории полуострова Ямал, сложенной мощной толщей рыхлых четвертичных отложений, отличающихся повышенной льдистостью и потому особой чувствительностью к техногенному воздействию. В результате освоения этой территории возникают проблемы создания инфраструктуры, т.е. комплекса сооружений, возводимых в сложных геолого-географических условиях. На данной площади повсеместно распространены многолетнемерзлые породы. Сочетание преимущественно рыхлого материала и мерзлого льдистого субстрата и создает основные проблемы строительства самых разных сооружений от жилых зданий до подземных сооружений. В данной работе рассмотрено взаимодействие этих сложных сооружений инфраструктуры с ММП, что вызывает необходимость использования методов инженерно-геокриологического прогноза.

В качестве модели рассмотрен инженерно-геологический разрез одной из рек на полуострове Ямал, который показал высокую изменчивость и разнообразие слагающих его пород. Было выделено 8 инженерно-геологических элементов (по составу и физическим свойствам). Исходя из их свойств и параметров проектируемых инженерных сооружений, была произведена количественная оценка устойчивости сооружений, а в некоторых случаях – возникновения опасных криогенных процессов, особенно многолетнего оттаивания пород. Был изучен ряд вариантов или типов сооружений, для которых ММП служат основанием.

1) Расчет чаши оттаивания под зданием показал, что глубина оттаивания под серединой $H_c = 7, 14$ м, под краем $H_c = 3,73$ м. При этом возникнет огромная осадка (77 см) при оттаивании грунтов, которая в 2 раза превышает допустимую (5см/м оттаявшего грунта).

2) Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода дал следующий результат: радиус оттаивания равен 3,32 м. Возможно всплытие трубопровода из-за высокой влажности слоя. Для предотвращения всплытия трубы и ее деформации, необходима фиксация трубопровода.

3) Расчет несущей способности показал, что максимальная нагрузка, которую может выдержать свая в данных условиях, равна 8082 кН. Данное значение необходимо использовать при проектировании зданий на данной территории, а также при строительстве и проектировании мостовых переходов автодороги через пониженные участки территории (ложбины).

Результаты приведенных расчетов являются, естественно, ориентировочными и не распространяются на весь комплекс инфраструктуры. Но, тем не менее, расчеты показывают, что здания-тепловыделители и погруженные в мерзлоту трубопроводы (газ или водоснабжение) непременно приведут к сложностям их эксплуатации. Более компетентные прогнозные расчеты требуют и более массовых, статистически значимых исследований.

Таким образом, учет разнообразных взаимодействий ММП и сооружений необходимо проводить как на стадии изысканий, так и при проектировании объектов инфраструктуры. В этой работе приводятся лишь некоторые примеры подобного прогноза, учитывая высокое разнообразие условий в области вечной мерзлоты.

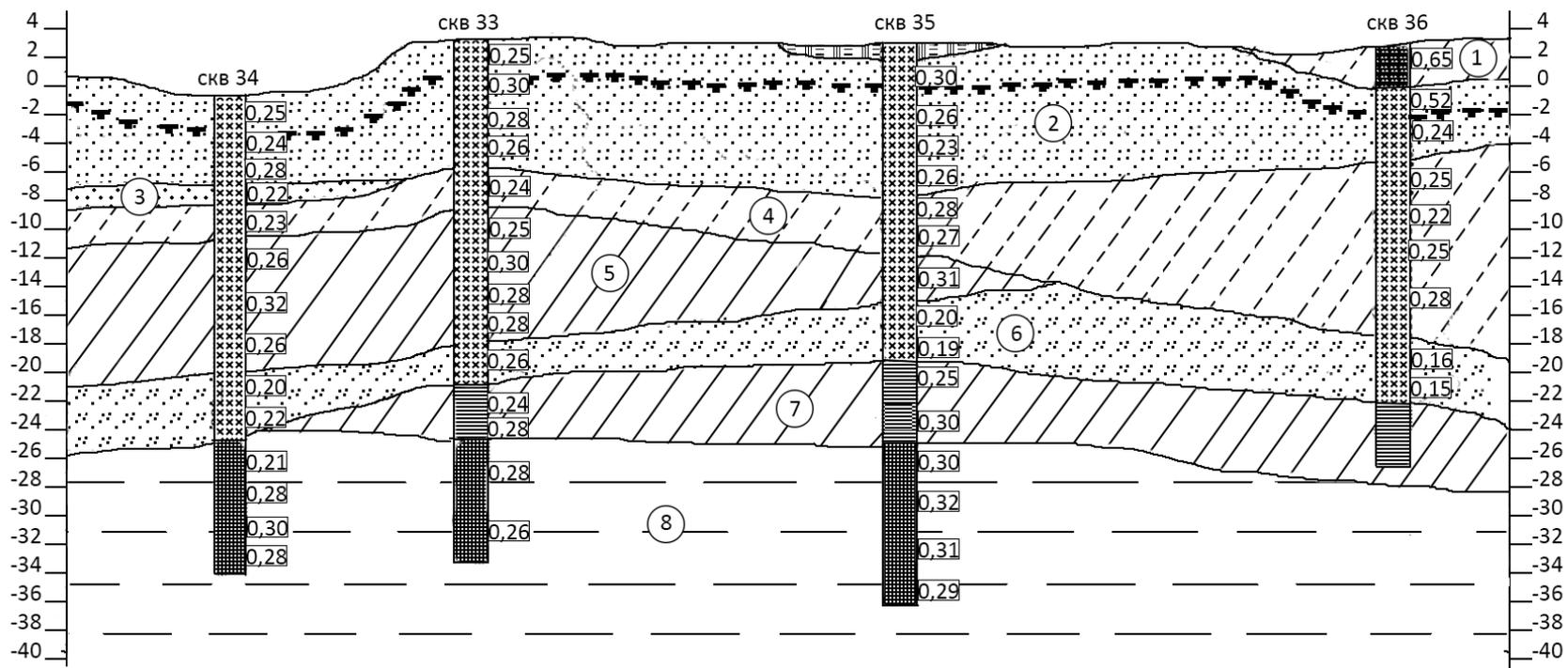
Список литературы

- 1) Ершов Э.Д. Общая геокриология. Изд МГУ, 2002. 683 с.
- 2) Баулин В.В., Чернядьев В.П. Мерзлотные условия Западной Сибири и вопросы их исследования в связи с переброской части стока рек в южные районы. – Инженерная геология, 1979.
- 3) Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР. В кн.: Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М.: Наука. 1990.
- 4) Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Состояние и засоленность грунтов прибрежных участков Карского моря // Материалы I конференции геокриологов России. Кн. 1. М.: Изд-во МГУ, 1996.
- 5) Геокриология СССР. Западная Сибирь, под ред. Э.Д. Ершова. Москва, Изд-во Недра, 1989, 514 стр.
- 6) Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: ГЕОС, 2002. – 246 с.
- 7) Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. М.: Недра. 1985. 176 с.
- 8) Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т.1 // Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.Д. Дубиков и др. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1996. 240 с.
- 9) Геология России. Том 3. Инженерно-геологические структуры России /под редакцией Трофимова В.Т, Аверкина Т.И. – Издательский дом "КДУ" Москва, 2015, с.710.
- 10) Инженерная геокриология. Справочное пособие/ Под ред. Ершова Э.Д. – М.: Недра, 1991. – 439 с.
- 11) Лазуков Г.И., Рейнин И.В. Стратиграфия четвертичных отложений Обско-Пуровского междуречья. Решения и труды межведомственного совещания по доработке и уточнению стратиграфических схем Западной Сибири. Гостоптехиздат, 1961.
- 12) Лазуков Г.И. К вопросу о стратиграфическом расчленении четвертичных отложений бассейна Нижней Оби. Тр.Межведомственного совещания по стратиграфии Сибири. Гостоитехиздат, Л., 1957.

- 13) Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. – М., МГУ, 1980. 246с.
- 14) Трофимов В.Т, Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (Инженерно-геологический очерк). М.: Изд-во МГУ, 1986. 211 с.
- 15) Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. – М.: Изд-во МГУ, 1977, - 280 с.
- 16) СНиП 2.02.04-88. Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 199

Инженерно-геокриологический разрез

Масштаб
вертикальный 1:200
горизонтальный 1:500



Условные обозначения

Песок пылеватый

Песок мелкий

Супесь

Суглинок

Глина

Естественная глубина СТС

7 Номер ИГЭ

0,23 Значение влажности

Криотекстуры:

Сетчатая

Массивная

Среднешлировая

Атакситовая